Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ)

Кафедра общей физики физического факультета

СОГЛАСОВАНО

Декан ФЕН

__________________ Резников В. А.
Подпись

5 октября 2020 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

ФИЗИКА
специальность 04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия
направленность (профиль): Фундаментальная и прикладная химия

Форма обучения: очная

Разработчик:
профессор
д.ф.-м.н., Пуртов П.А..

Зав. каф. общей физики
д.ф.-м.н., Погосов А.П.

Руководитель программы:
д.х.н., доц. Емельянов В.А.

Новосибирск, 2020

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1. Осуществляет поиск и обработку информации в соответствии с поставленной задачей	- имеет представление о фундаментальных основах физики анализа
	УК-1.2. Проводит критический анализ информации	- умеет логически мыслить, строить доказательную цепочку рассуждений - умеет выделять в проблеме главное, имеющее принципиальное значение
	УК-1.3. Решает поставленные задачи с применением системного подхода	- знает и умеет применять алгоритмы решения базовых задач, основанных на применении основных законов физики
УК-6. Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1. Планирует свою деятельность и эффективно использует свое время и иные ресурсы в рамках реализуемого проекта или проводимого исследования	- знает основные понятия и определения по дисциплине, формулировки утверждений, схемы и методы доказательств
ОПК-4. Способен планировать работы химической направленности, обрабатывать и интерпретировать полученные результаты с использованием теоретических знаний и практических навыков решения математических и физических задач	ОПК-4.1. Использует базовые знания в области математики и физики при планировании работ химической направленности	- способен составлять физические и математические модели химических процессов
	ОПК-4.2. Обрабатывает данные с использованием стандартных способов аппроксимации численных характеристик	- умеет пользоваться методами теории возмущений

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
	ОПК-4.3. Интерпретирует результаты химических наблюдений с использованием физических законов и представлений	- умеет исследовать простейшие физические модели химических процессов
ОПК-5. Способен использовать существующие программные продукты и информационные базы данных для решения задач профессиональной деятельности с учетом основных требований информационной безопасности	ОПК-5.1. Использует современные IT-технологии при сборе, анализе, обработке и представлении информации химического профиля	- имеет представление о методах приближенных вычислений и компьютерной реализации основных понятий физики

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физика» является частью математического и естественнонаучного цикла ООП, базовая часть (общепрофессиональные дисциплины), по направлению подготовки 04.03.01- Химия, квалификация (степень) «бакалавр».

Результаты освоения дисциплины «Физика» используются в следующих дисциплинах данной ООП:

- химическая термодинамика;
- строение вещества;
- химия твердого тела;
- общая химическая технология;
- химическая кинетика;
- охрана окружающей среды;
- физические методы исследования твердых тел.

3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося

Трудоемкость дисциплины (631 ч)

Форма промежуточной аттестации: 2, 3, 4,5 семестр – экзамен

№	Вид деятельности	Семестр			
		2	3	4	5
1	Лекции, ч	32	54	64	51
2	Практические занятия (семинары), ч	32	36	32	34
3	Лабораторные занятия, ч	-	-		-

4	Групповые занятия с преподавателем, ч,	9	9	9	9
5	Контактная работа с преподавателем, ч	5	5	5	5
6	в электронной форме, ч	-	-		-
7	консультаций, час.	4	5	5	5
8	Самостоятельная работа во время занятий, ч	33	43	43	23
9	Самостоятельная работа во время промежуточной аттестации, ч.	24	24	18	13
10	Всего, ч	139	176	176	140

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

2 семестр

Лекции (32 ч)

Наименование разделов и тем	Количество часов				
	Лекции	Семинары	Групповые занятия, контактная работа, консультации	Самостоятельная работа	Всего часов
1. Предмет механики, модельные объекты, системы отсчета, векторы, скорость, ускорение.	4 ч.	4 ч	2 ч.	10 ч.	20 ч.
2. Законы Ньютона, преобразования Галилея	6 ч.	6 ч.	2 ч.	10 ч.	24 ч
3. Центр масс, закон сохранения импульса.	4 ч.	4 ч.	2 ч.	5 ч.	15 ч
4. Скалярное произведение. Работа. Потенциальная и кинетическая энергия. Закон сохранения энергии.	6 ч.	6 ч	4 ч.	10 ч.	26 ч
5. Векторное произведение. Момент импульса. Момент силы. Уравнение моментов. Сохранения момента импульса. Тензор инерции.	4 ч.	6 ч.	3 ч.	10 ч.	23 ч
6. Малые колебания. Вынужденные и затухающие колебания. Нормальные колебания.	6 ч.	6 ч.	3 ч.	10 ч.	25 ч

7. Принцип наименьшего действия. Связи. Уравнения Лагранжа. Уравнения Гамильтона.	2 ч.		2 ч.	2 ч.	6 ч.
Итого по курсу:	32 ч.	32 ч.	18 ч.	57 ч.	139 ч.

Содержание отдельных разделов и тем.

1.Предмет механики. Модельные объекты механики: материальная точка, абсолютно твердое тело.

2.Системы отсчета. Системы координат. Прямоугольные декартовы координаты, правая и левая системы декартовых координат. Цилиндрическая и сферическая системы координат. Полярные координаты. Радиус-вектор. Разложение по ортам. Производная вектора. Скорость, угловая скорость. Ускорение, нормальная и тангенциальная составляющие ускорения.

3.Свободное тело. Инерциальные системы отсчета. Первый закон Ньютона. Преобразования Галилея. Преобразования скорости и ускорения. Принцип относительности Галилея. Масса. Импульс. Второй закон Ньютона. Сила. Третий закон Ньютона.

4.Описание системы частиц. Радиус-вектор центра масс системы. Второй закон Ньютона для центра масс. Замкнутые системы. Закон сохранения импульса. Движение центра масс замкнутой системы частиц. Использование свойств симметрии для нахождения центра масс системы. Начальные условия при интегрировании уравнений движения.

5.Скалярное произведение векторов, его свойства. Дифференцирование скалярного произведения. Работа силы. Работа тангенциальной и нормальной составляющей силы. Мощность. Кинетическая энергия и ее связь с работой силы. Поле сил. Стационарные и нестационарные поля. Консервативные силы. Потенциальная энергия частиц. Связь силы с потенциальной энергией. Полная механическая энергия. Закон сохранения энергии. Однородное поле. Потенциальная энергия частицы в однородном и центрально-симметричном полях, потенциальная энергия пружины. Нахождение величины силы из потенциальной энергии. Пример непотенциальных сил. Система невзаимодействующих частиц в поле консервативной силы.

6.Кинетическая энергия изолированной системы частиц. Потенциальная энергия взаимодействия двух частиц. Сохранение энергии изолированной системы из двух взаимодействующих частиц. Полная механическая энергия замкнутой системы взаимодействующих частиц. Закон сохранения энергии незамкнутой системы частиц. Столкновения частиц. Приведенная масса. Абсолютно упругий и неупругий удары. Представление кинетической энергии системы частиц в виде суммы энергии поступательного движения центра масс и энергии относительного движения (теорема Кёнига).

7.Векторное произведение, его свойства, геометрический смысл. Полярные и аксиальные векторы. Момент силы. Нахождение векторного произведения с помощью проекций векторов. Дифференцирование векторного произведения. Двойное векторное произведение.

8.Момент импульса и уравнение моментов для материальной точки. Уравнение моментов для системы материальных точек. Преобразование момента импульса и момента сил при смене начала отсчета.

9.Преобразование уравнения моментов при переходе от неподвижной к движущейся системе отсчета. Уравнение моментов в системе центра масс. Вращение твердого тела вокруг неподвижной оси. Момент инерции. Кинетическая энергия вращающегося твердого тела. Работа момента сил. Сравнение вращательного движения с поступательным. Параллельный перенос оси вращения (теорема Гюйгенса–Штейнера).

10.Описание движения абсолютно твердого тела как поступательного движения некоторой точки этого тела и вращения относительно этой точки. Мгновенная ось вращения.

11.Момент импульса абсолютно твердого тела. Связь момента импульса, угловой скорости и кинетической энергии вращающегося абсолютно твердого тела. Тензор инерции.

12.Геометрический смысл тензора. Главные оси и главные значения тензора, их нахождение. Вид тензора в системе главных осей. Главные моменты инерции. Свободные оси твердого тела. Асимметричный, симметричный и шаровой волчки. Линейный ротатор. Плоские тела. $I_{zz} = I_{xx} + I_{yy}$. Использование свойств симметрии для нахождения главных осей. Плоскость симметрии, ось второго порядка. Оси высших порядков. Прецессия быстро вращающегося волчка под действием момента внешней силы.

13.Одномерное движение. Уравнения движения. Начальные условия. Интегрирование уравнений движения. Движение в потенциальной яме. Гармонический осциллятор. Уравнение движения гармонического осциллятора. Затухающие и незатухающие колебания. Решение уравнения движения незатухающего гармонического осциллятора. Частота, амплитуда, фаза. Общее решение однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, принцип суперпозиции (без доказательств). Связь решения с круговым движением. Комплексная амплитуда. Затухающие колебания. Добротность. Вынужденные колебания. Движение осциллятора под действием периодической внешней силы. Резонанс. Малые колебания около положения равновесия. Системы с несколькими степенями свободы. Нормальные колебания.

14.Задача двух тел. Переход к новым переменным – радиус-вектору центра масс и радиус-вектору относительного расположения частиц. Приведенная масса. Эквивалентность задачи двух тел задаче о движении частицы с приведенной массой в поле центральной силы. Двухатомная молекула. Колебания двухатомной молекулы. Колебания сложной молекулы. Колебательные степени свободы.

15.Число степеней свободы. Обобщенные координаты и скорости. Вывод уравнения Лагранжа из второго закона Ньютона для одномерного движения материальной точки в потенциальном поле.

16.Принцип наименьшего действия. Вывод уравнения Лагранжа для одномерного движения материальной точки из принципа наименьшего действия. Иллюстрация принципа наименьшего действия для свободного движения материальной точки. Примеры применения уравнения Лагранжа: плоское движение в декартовых и полярных координатах, нормальные колебания. Обобщенные сила и импульс.

17.Функция Гамильтона. Уравнения Гамильтона. Фазовое пространство. Фазовая траектория.

3 семестр

Лекции (54 ч)

2.2.Тематический план курса (распределение часов).

Наименование разделов и тем	Количество часов				
	Лекции	Семинары	Групповые занятия, контактная работа, консультации	Самостоятельная работа	Всего часов
1. Закон Кулона. Теорема Гаусса. Потенциал. Принцип суперпозиции.	9 ч.	6 ч	3 ч.	11 ч.	29 ч.
2. Энергия электрического поля. Условия равновесия зарядов в проводнике. Электрический диполь.	9 ч.	6 ч.	3 ч.	11 ч.	29 ч
3. Диэлектрики	9 ч.	6 ч.	3 ч.	11 ч.	29 ч
4. Магнитное поле в вакууме	9 ч.	6 ч	3 ч.	11 ч.	29 ч
5. Силы в магнитном поле. Магнитное поле в веществе. Электромагнитная индукция	9 ч.	6 ч.	3 ч.	11 ч.	29 ч
6. Электромагнитное поле, интерференция, дифракция	9 ч.	6 ч.	3 ч.	12 ч.	30 ч
Итого по курсу:	54 ч.	36 ч.	18 ч.	67 ч.	176.ч.

Содержание отдельных разделов и тем

1. Электрический заряд, закон сохранения заряда. Точечный заряд, взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона. Напряженность электрического поля точечного заряда. Принцип суперпозиции полей электрических зарядов. Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема Гаусса. Поле плоскости, бесконечного цилиндра. Дивергенция вектора напряженности электрического поля. Связь теоремы Остроградского с теоремой Гаусса.
2. Работа электрических сил. Циркуляция вектора напряженности электрического поля. Потенциал электрического поля. Связь между напряженностью и потенциалом. Нули отсчета потенциала. Потенциал поля точечного заряда, сферы, системы точечных зарядов, распределенного заряда, заряда распределенного на плоскости. Уравнения Пуассона и Лапласа. Электростатическая энергия системы распределенных и точечных зарядов.

3. Проводники. Условия равновесия зарядов в проводнике. Поле вблизи поверхности заряженного проводника. Проводник во внешнем поле. Емкость проводника. Плоский конденсатор. Энергия заряженного проводника. Энергия конденсатора. Плотность энергии электрического поля. Давление электрического поля.
4. Электрический диполь. Потенциал диполя. Поле диполя. Потенциальная энергия взаимодействия диполя с полем. Взаимодействие двух диполей. Силы, действующие на диполь во внешнем электрическом поле.
5. Диэлектрики. Электрическое поле в диэлектриках. Поляризация диэлектриков. Поляризационные заряды. Вектор поляризации. Вектор электрической индукции. Поляризуемость. Тензор поляризуемости. Плоский конденсатор, заполненный однородным диэлектриком. Диэлектрическая постоянная.
6. Теорема Гаусса для диэлектриков. Поле точечного заряда в диэлектрике. Закон Кулона для бесконечного однородного диэлектрика. Условия на границе раздела двух диэлектриков во внешнем электрическом поле. Уравнение Пуассона для однородных диэлектриков. Энергия системы электрических зарядов в диэлектрике. Поле в щели и сферической полости.
7. Электрический ток в проводниках. Плотность тока. Уравнение неразрывности. Закон Ома для плотности тока. Удельная проводимость, удельное сопротивление. Закон Ома для однородного проводника. Закон Джоуля-Ленца. Примитивная электронная теория протекания тока через металл. Ток в газах, жидких и твердых телах. Электродвижущая сила. Закон Ома для произвольного участка цепи. Правила Кирхгофа.
8. Магнитное поле постоянного тока в вакууме. Закон Био - Савара. Магнитное поле движущегося заряда. Магнитное поле прямого тока Магнитное поле на оси кругового тока.
9. Циркуляция вектора индукции магнитного поля. Магнитное поле соленоида. Дивергенция и ротор вектора индукции магнитного поля. Уравнения магнитостатики и электростатики в вакууме.
10. Векторный потенциал магнитного поля. Связь вектора ***B*** и векторного потенциала.
11. Магнитный момент прямоугольного контура с током, произвольного контура, системы токов. Магнитный момент системы движущихся зарядов. Гиромагнитное отношение.
12. Сила, действующая на движущийся заряд в магнитном поле (сила Лоренца). Закон Ампера. Силы и момент сил, действующие на магнитный момент во внешнем магнитном поле. Потенциальная энергия магнитного момента в магнитном поле. Движение электрона в магнитном поле. Ларморовская частота. Диамагнетизм и парамагнетизм.
13. Магнитное поле в веществе. Вектор намагниченности. Магнитная восприимчивость. Магнитная проницаемость. Векторы ***B*** и ***H***, соотношение между ними. Граничные условия на векторы ***B*** и ***H***.
Уравнения магнитостатики.
14. Электромагнитная индукция. Закон Фарадея. $rot\, \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t$.
15. Взаимная индукция. Самоиндукция. Коэффициенты взаимной и самоиндукции. Индуктивность. Плотность энергии магнитного поля. Энергия катушки с током.
16. Токи смещения. Уравнения Максвелла.
17. Существование электромагнитной волны. Волновое уравнение.
18. Плоские волны. Монохроматические волны. Поляризация электромагнитных волн. Длина волны, волновой вектор, волновое число. Энергия электромагнитного поля. Поток энергии. Вектор Умова-Пойнтинга. Отражение и преломление плоской волны на границе диэлектрика.
19. Когерентные и некогерентные источники света. Длина и время когерентности. Интерференция двух плоских волн, распространяющихся под углом друг к другу.

Интерференция света от двух точечных когерентных источников. Максимальный порядок интерференции света из цугов волн длительности τ и немонохроматического света с полосой частот Δω. Связь между этими представлениями.
20. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракционная решетка. Разрешающая способность дифракционной решетки. Дифракционная расходимость параллельных пучков света. Дифракция на круглом отверстии. Понятие о разрешающей способности оптических систем.

4 семестр

Лекции (64 ч)

Наименование разделов и тем	Количество часов				
	Лекции	Семинары	Групповые занятия, контактная работа, консультации	Самостоятель-ная работа	Всего часов
2. Соотношение неопределен-ности. Волновая функция. Операторы, собственные функции, собственные зна-чения.	16.ч.	6 ч	3 ч.	10 ч.	35 ч.
2. Физический смысл собст-венных значений операто-ров. Решение стационар-ного уравнения Шрединге-ра.	8 ч.	4 ч.	3 ч.	10 ч.	25 ч
3. Теория возмущений.	12 ч.	6 ч.	3 ч.	11 ч.	32 ч
4. Теория представлений	10 ч.	4 ч	3 ч.	10 ч.	27 ч
5. Квантовый момент импуль-са. Атом водорода.	10 ч.	6 ч.	3 ч.	10 ч.	29 ч
6. Спин. Сложение моментов. Влияние квантового момен-та импульса и спина на строение атомов и молекул.	8 ч.	6 ч.	3 ч.	10 ч.	27 ч
Итого по курсу:	64 ч.	32 ч.	18 ч.	61 ч.	175 ч.

Содержание отдельных разделов и тем.

1. **Соотношение неопределенности. Волновая функция. Операторы, собственные функции, собственные значения.**

1.1. Противоречие опытных данных по микроскопическим объектам представлениям классической механики. Стабильность атома. Фотоэффект. Дифракция частиц на атомных решетках. Волны де Бройля. Принцип неопределенности. Соотношение неопределенности.
1.2. Вероятность события. Плотность вероятности. Сумма вероятностей и их произведение. Нормировка. Средние значения. Волновая функция. Плотность вероятности в квантовой механике. Фазовый множитель волновой функции. Нормировка волновой функции. Квантово-механические операторы. Представление физической переменной в квантовой механике. Операторы координаты, потенциальной энергии, импульса.
1.3. Действия с квантовомеханическими операторами. Сложение операторов. Произведение операторов. Коммутативность. Принцип соответствия. Оператор полной энергии (гамильтониан). Строгий вывод соотношения неопределенности. Некоторые свойства квантовомеханических операторов. Линейность. Сопряженный, самосопряженный (эрмитов) оператор. Собственные значения оператора, их связь со значением физической величины. Состояние с определенным импульсом.
1.4. Ортогональность волновых функций, соответствующих разным собственным значениям физического оператора. Принцип суперпозиции. Волновая функция системы невзаимодействующих частиц. Волновая функция системы с независимыми степенями свободы.

2. Физический смысл собственных значений операторов. Решение стационарного уравнения Шредингера

2.1. Уравнение Шредингера. Плотность потока вероятности. Плотность потока вероятности для волны де Бройля. Стационарные состояния. Стационарное уравнение Шредингера. Разложение общего решения уравнения Шредингера по стационарным волновым функциям.
2.2. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Стационарные волновые функции, их ортогональность. Уровни энергии. Частица в трехмерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Стационарные волновые функции. Уровни энергии. Вырождение.
2.3. Отражение и прохождение через потенциальные барьеры: ступеньку, прямоугольный барьер. Формула Гамова. Общие свойства волновой функции. Непрерывный и сплошной спектр. Роль граничных условий.
2.4. Гармонический осциллятор. Стационарные волновые функции, их ортогональность, уровни энергии.

3. Теория возмущений.

3.1. Теория возмущений, не зависящих от времени. Поправки первого и второго порядка к уровням энергии и первого порядка к волновой функции в случае невырожденных исходных уровней. Условие применимости теории возмущений.
3.2. Ортогонализация вырожденных волновых функций. Стационарная теория возмущения в случае вырождения. "Правильные" волновые функции. Секулярное уравнение. Частичное и полное снятие вырождения.
3.3. Возмущения, зависящие от времени. Волновая функция возмущенного состояния. Переходы под влиянием конечного во времени возмущения. Вероятность перехода. Связь вероятности перехода с разложением Фурье оператора возмущения.

3.4. Переходы под влиянием периодического возмущения. Вероятность перехода. δ-функция Дирака. "Золотое" правило Ферми.

4. Теория представлений

4.1. Полный набор одновременно измеримых величин. Роль коммутации операторов в квантовой механике.
4.2. Матричный аппарат квантовой механики. Кет- и бра-векторы. Скалярное произведение векторов. Разложение вектора по базису. Оператор разложения вектора по базису (единичный оператор). Матричное представление оператора. Матрица оператора в собственном базисе. Матрица эрмитова оператора.
4.3. Обобщение матричного аппарата на непрерывный базис. Кет- и бра-векторы в непрерывном базисе, разложение вектора по непрерывной системе ортов. Волновая функция. Единичный оператор. Матричное представление операторов для непрерывной системы ортов. Ортонормированность базиса. Нормировка волновой функции оператора импульса.
4.4. Оператор в базисе из собственных функций для непрерывной системы ортов. Перевод оператора из одного базиса в другой. Представления динамических квантовых величин и операторов. *x*-представление. Матрица оператора $\hat{x}$ в собственном базисе. Оператор импульса в *x*-представлении.
4.5. *p*-представление. Матрица оператора импульса в собственном представлении. Оператор $\hat{x}$ в *p*-представлении. Волновая функция в *p*-представлении, ее связь с волновой функцией в *x*-представлении. Е-представление. Шредингеровский и гайзенберговский варианты Е-представления волновой функции.

5. Квантовый момент импульса. Атом водорода.

5.1. Оператор момента импульса. Коммутационные соотношения операторов момента. Повышающий и понижающий операторы, правила коммутации для них. Вид операторов момента в сферической системе координат. Гамильтониан в сферической системе координат, его коммутация с операторами момента
5.2. Собственные функции и собственные значения оператора $\hat{L}_z$. Собственные значения оператора $\hat{L}^2$. Матричные элементы операторов момента.
5.3. Собственные функции оператора $\hat{L}^2$. p_x-, p_y- и p_z-функции.
5.4. Полярная диаграмма шаровых функций. Полярная диаграмма *p*-функций. Движение в центрально-симметричном поле. Гамильтониан. Общий вид решения уравнения Шредингера. Уравнение Шредингера для радиальной части волновой функции в случае водородоподобного атома.
5.5. Решение уравнения Шредингера для водородоподобного атома. Уровни энергии. Степень вырождения.
5.6. Оператор инверсии координат. Четность состояния. Четность решений уравнения Шредингера для водородоподобного атома.

6. Спин. Сложение моментов. Влияние квантового момента импульса и спина на строение атомов и молекул.

6.1. Спин частиц. Опыты Штерна-Герлаха. Операторы спинового момента. Коммутационные соотношения. Собственные функции оператора $\hat{S}_z$ спина 1/2 в собственном базисе.
6.2. Матрицы Паули. Коммутационные соотношения между ними. Действие операторов $\hat{\sigma}_x$, $\hat{\sigma}_y$, $\hat{\sigma}_z$, $\hat{\sigma}_+$ и $\hat{\sigma}_-$ на собственные функции оператора $\hat{S}_z$ спина 1/2.

6.3. Сложение моментов в слабовзаимодействующих системах. Оператор суммарного момента. Коммутационные соотношения для суммарного момента. Величина квадрата суммарного момента. Проекция суммарного момента на выделенную ось.
6.4. Сложение двух моментов. Правило поиска суммарного значения и значения проекции суммарного момента.
6.5. Векторная диаграмма сложения моментов. Волновые функции, описывающие состояния суммарного момента. Коэффициенты Клебша-Гордана, принципы поиска коэффициентов. Сложение двух спинов 1/2. Триплетное и синглетное состояния.
6.6. Системы тождественных частиц. Принцип неразличимости тождественных частиц. Перестановка тождественных частиц. Фермионы и бозоны, их волновые функции. Многоэлектронные системы. Детерминант Слэтера. Спин-орбитали. Принцип Паули. Волновая функция двухэлектронной системы.

5 семестр

Лекции (51 ч)

Наименование разделов и тем	Количество часов				
	Лекции	Семинары	Групповые занятия, контактная работа, консультации	Самостоятельная работа	Всего часов
1.Классическая постулативная термодинамика.	12 ч.	10 ч.	3 ч.	10 ч	35 ч.
2. Статистический подход к описанию сложных систем. Статистические распределения.	6 ч.	5 ч.	3 ч.	4 ч	18 ч
3. Микроканоническое распределение и его приложения. Статистическое определение энтропии.	8 ч.	3 ч.	3 ч.	2 ч	16 ч
4. Каноническое распределение Гиббса и его приложения.	13 ч.	12 ч.	3 ч.	10 ч	38.ч
5. Явления переноса.	6 ч.	4 ч.	3 ч.	8 ч	21.ч
6. Тождественность частиц и квантовые статистики.	6 ч.		3 ч.	2 ч	11 ч
Итого по курсу:	51 ч.	34 ч.	18 ч.	36 ч	139 ч.

Содержание отдельных разделов и тем.

1. Предмет и задачи термодинамики и статистической физики. Термодинамический и статистический подходы. Теорема о приходе термодинамической системы к равновесию. Функции состояния. Нулевое начало термодинамики - введение температуры. Первое начало термодинамики. Теплоемкость, ее зависимость от пути. C_P и C_V, их связь. Компенсация. Второе начало термодинамики. Равновесные и неравновесные процессы. Обратимые и необратимые процессы. Уравнение равновесного адиабатического процесса для идеального газа.

2. Крутизна адиабаты и изотермы на PV-диаграмме. Непересекаемость адиабат. Цикл Карно. Теорема Карно. Термодинамическое определение энтропии. Изэнтропа. Основное термодинамическое равенство. Основное термодинамическое неравенство.

3. Связь между термическим и калорическим уравнениями состояния. Термодинамические потенциалы. Вычисления T и P.

3. Общие условия термодинамического равновесия. Установление равновесия в изолированной системе. Энтропия в равновесных и неравновесных адиабатических процессах. Неравновесный адиабатический процесс, состоящий из суммы квазиравновесных. Установление равновесия при $T = const., V = const., N_i = const$; при $T = const., P = const., N_i = const$. Общее условие равновесия в химической реакции.

4. Максимальная работа системы при постоянной температуре. Третье начало термодинамики. Сводка важнейших термодинамических формул.

5. Простейшие статистические системы. Функции распределения. Распределение Максвелла в декартовых координатах. Давление, энергия и температура идеального газа. Распределение Максвелла в сферических координатах. Средние значения скорости и потока частиц.

6. Биномиальное распределение. Распределение по ориентациям системы спинов 1/2. Гауссово распределение.

7. Экспоненциальное распределение. Распределение по длинам и временам свободного пробега молекул в идеальном газе.

8. Свойство флуктуаций в системах их большого числа частиц. Системы и ансамбли. Временное усреднение и усреднение по ансамблю. Теорема Лиувилля. Требования к физическим функциям распределения.

9. Микроканонический ансамбль. Фазовое пространство, конфигурационное подпространство, μ- пространство. Принцип равной вероятности всех допустимых классических состояний системы. Число микросостояний системы. Функция распределения.

10. Энтропия. Фазовый объем равновесного состояния. Энтропия равновесного состояния. Энтропия как среднее значение логарифма вероятности. Энтропия системы спинов 1/2. Энтропия равновесного состояния системы спинов 1/2. Энтропия идеального газа.

11. Применения микроканонического ансамбля к описанию равновесия. Тепловое равновесие. Температура. Механическое равновесие. Давление. Равновесие при переменном числе частиц. Химический потенциал. Химический потенциал идеального газа. Стандартное значение химического потенциала. Основное термодинамическое равенство. Основное термодинамическое неравенство.

12. Канонический ансамбль. Функция распределения Гиббса. Распределения Максвелла и Больцмана как частные случаи распределения Гиббса. Барометрическая формула. Частицы со спином 1/2 во внешнем магнитном поле. Дипольный момент во внешнем электрическом поле. Закон Кюри.

13. Термодинамические функции канонического ансамбля. Энтропия. Свободная энергия Гельмгольца. Связь энергии со статистической суммой. Вычисления S и P.

Статистическая сумма идеального одноатомного газа. Энергия, свободная энергия Гельмгольца и энтропия идеального газа.

14. Гармонический осциллятор в термостате. Статсумма в классическом и квантовом рассмотрении. Энергия квантового осциллятора, теплоемкость C_V. Вымораживание колебательных степеней свободы. Характеристическая температура вымораживания. Энтропия квантового осциллятора, ее зависимость от температуры. Классический и квантовый ротатор. Статсуммы. Энергия и теплоемкость. Характеристическая температура вымораживания вращательной степени свободы. Волчок. Энергия и теплоемкость - классическое рассмотрение. Внутреннее вращение молекул.

15. Квантовые поправки к статсумме вращательного движения - число симметрии и число спиновых состояний. Ортоводород и параводород. Статсумма молекулы. Степени свободы. Теорема о равнораспределении энергии по степеням свободы.

16. Газ Ван-дер-Ваальса. Статсумма. Конфигурационный интеграл, его оценка. Уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса.

17. Большое каноническое распределение. Большая статистическая сумма. Среднее число частиц в системе. Изотермическо - изобарический ансамбль.

18. Молекулярно-кинетические явления. Релаксация. Роль столкновений молекул в установлении равновесия в газе. Среднее число столкновений в единицу времени. Константа скорости бимолекулярной химической реакции.

19. Явления переноса. Коэффициенты вязкости, диффузии, теплопроводности в газе и конденсированной среде. Уравнения диффузии и теплопроводности. Движение диффузионного фронта. Соотношение Эйнштейна $x^2 \sim Dt$.

20. Логические погрешности учета тождественности частиц в классических статистиках. Вывод распределения Гиббса с помощью большого канонического распределения. Квантовые распределения для идеального газа, статистики Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Критерий вырожденности идеального газа.

21. Электронный газ в металле. Функция распределения, ее вид при абсолютном нуле и при T>0. Максимальная и средняя энергия электронов при абсолютном нуле. Температура вырождения электронного газа. Свободные электроны. Оценка теплоемкости электронного газа. Фото- и термоэлектронная эмиссия.

22. Фотонный газ, его свойства в полости. Химический потенциал фотонного газа. Условие равновесия фотонного газа в полости. Поглощательная и излучательная способность твердого тела, их связь с плотностью энергии фотонов. Абсолютно черное тело. Формула Планка. Формула Вина и закон Релея-Джинса. Равнораспределение по степеням свободы. Термодинамические функции излучения.

5. Перечень учебной литературы

1. Савельев И. В. *Курс общей физики. Т. I, 2.* М.: Наука, 1974.

2. Сивухин Д.В. *Общий курс физики. Т. I, 2.* М.: Наука, 1986.

3. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. *Берклеевский курс физики. Т.I. Механика.* М.: Наука, 1971

4. Филатова Е.С., Филиппова Л.Г. *Сборник задач по механике и теории относительности. Уч. пос.*, Новосибирск: Изд-во НГУ, 1984.

5. Меледин Г.В. *Физика в задачах.* М.: Наука, 1990.

6. Иродов И.Е. "Основные законы электромагнетизма", М.: Высшая школа, 1991.

7.Д. И. Блохинцев, *Основы квантовой механики*. М.: Высш. шк., 1963.

8.Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Квантовая механика.* М.: Наука, 1974.

9.Р. Г. Левич и др., *Курс теоретической физики*. М.: Наука, 1971, Т. 2.

10.П. А. Дирак, *Принципы квантовой механики.* М.: Физматгиз, 1960.

11.Р. Фейнман и др., *Фейнмановские лекции по физике.* М.: Мир, 1978, Т. 8,9.

12.В. А. Толкачев и др., Задачи по квантовой механике. Новосибирск: НГУ, 2003.
.13. П.Базаров. Термодинамика. Высшая школа, М. 1976.
14. Киттель. Статистическая термодинамика. Наука, М. 1977.
15.В.Г. Левич. Введение в статистическую физику.
16. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. Наука, М. 1979.
17. В.А.Толкачев. Термодинамика и статистическая физика, учебное пособие, НГУ, 1996.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся

1. П.А. Пуртов, К.М. Салихов. Методические указания к курсу лекций по квантовой механике для студентов 2 - го курса химического отделения факультета естественных наук. Новосибирск, НГУ, 1987, 29 стр.
2. В.А. Толкачев, В.Л. Вязовкин, В.А. Багрянский, Б.В. Большаков, П.А. Пуртов, М. Ф. Ступак. Задачи по квантовой механике. Новосибирск, НГУ, 2003, 100 стр.
3. П.А. Пуртов, С.В. Анищик, В.А. Багрянский, Б.В. Большаков, В.Л. Вязовкин, Д.В. Стась. Задачи по термодинамике и статистической физике. Новосибирск, НГУ, 2005, 84 стр.
4. П.А. Пуртов, Замураев В.П. Учебно-методический комплекс. Физика. Механика. Новосибирск, НГУ, 2011, 80 стр.
5. П.А. Пуртов, Замураев В.П. Учебно-методический комплекс. Физика. Электродинамика. Новосибирск, НГУ, 2011, 81 стр.
6. П.А. Пуртов, Замураев В.П. Учебно-методический комплекс. Физика. Квантовая механика. Новосибирск, НГУ, 2011, 82 стр.
7. В.В. Замащиков, П.А. Пуртов. Электростатика. Новосибирск, НГУ, 2012, 150 стр.
8. П.А. Пуртов, Замураев В.П. Учебно-методический комплекс. Физика. Термодинамика и статистическая физика. Новосибирск, НГУ, 2012, 124 стр.
9. Пуртов П. А., Глебов Е.М., Стась Д.В. Задачи по механике: учебное пособие/ Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015. 150 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

7.1 Ресурсы сети Интернет

Освоение дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС, электронную почту, социальные сети, а также посредством сервиса Google Meet https://meet.google.com

7.2 Современные профессиональные базы данных:

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

8.1 Перечень программного обеспечения

Windows и Microsoft Office. Специализированное программное обеспечения для реализации курса не требуется.

8.2 Информационные справочные системы

Не используются.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для реализации дисциплины Физика используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации;
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень результатов обучения по дисциплине Физика и индикаторов их достижения представлен в виде знаний, умений и владений в разделе 1.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине Физика

Текущий контроль успеваемости:

Для текущего контроля учебным планом предусмотрена сдача в течение семестра каждым из студентов шести домашних заданий по разделам курса. Сдача заданий проводится в форме коллоквиумов. Студент на каждом коллоквиуме должен представить решения задач соответствующего домашнего задания и в письменном виде ответить на теоретический вопрос и решить две задачи. За каждое задание студент может получить до 200 баллов. В середине семестра проводится контрольная работа, в которой студентам предлагается решить пять задач, относящихся к первой половине курса. Стоимость первой контрольной – 700 баллов. В конце семестра проводится вторая контрольная работа, в которой студентам предлагается ответить на три теоретических вопроса и решить пять задач из второй половины курса. Теоретическая часть второй контрольной оценивается в 400 баллов, решение задач – в 700 баллов. Выполнение этих работ является обязательным для всех студентов, а результаты текущего контроля служат основанием для выставления оценок в ведомость контрольной недели на факультете. Если сумма набранных в семестре баллов превышает 2700 баллов из 3000 возможных, то студенту выставляется оценка «отлично» без экзамена. Для получения оценки «хорошо» без экзамена необходимо набрать более 2100 баллов, и при этом не менее 130 баллов в ответах на теоретические вопросы. Для получения оценки «удовлетворительно» без экзамена необходимо набрать в семестре не менее 1500 баллов и преодолеть порог в 130 баллов в ответах на теоретические вопросы.

Промежуточная аттестация:

Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен письменный экзамен из трех вопросов по теоретическому материалу стоимостью в 400 баллов и решению шести задач, которые оцениваются в 1100 баллов. Оценка выставляется по сумме баллов набранных на экзамене и в семестре. Если сумма превышает 2700 баллов, то студент претендует на оценку «отлично». Для получения оценки «хорошо» необходимо набрать более 2100 баллов, а для оценки «удовлетворительно» – 1500 баллов. Кроме суммы набранных баллов учитывается результат, полученный непосредственно на экзамене. Если в теоретической части экзамена набрано менее 130 баллов и/или за решение задач получено менее 250 баллов или сумма баллов за теорию и решение задач менее 450, то полученные на экзамене баллы не включаются в общую сумму и оценка, полученная в семестре, остается без изменений. Для получения оценки «отлично» кроме набора требуемой суммы баллов необходимо на экзамене набрать при решении задач не менее 600 баллов, а сумму баллов за теорию и решение задач – не менее 900. Для получения оценки «хорошо» необходимо на экзамене набрать при решении задач не менее 400 баллов, а сумму баллов за теорию и решение задач – не менее 670.

Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

1-й курс, II семестр (Механика)

Задание 1

Векторы, скорость, ускорение

Вопросы к коллоквиуму

1. Системы координат: декартова, сферическая и цилиндрическая. Их связь. Элемент объема в этих координатах.
2. Доказать, что перпендикулярная радиус-вектору составляющая скорости равна произведению модуля радиус-вектора на угловую скорость.
3. Вывести выражение для величины нормальной составляющей ускорения.

Задачи

1.1. Начальное значение скорости равно $\vec{v}_1 = (\vec{i} + 3\vec{j} + 5\vec{k})$ м/с, конечное $\vec{v}_2 = (2\vec{i} + 4\vec{j} + 6\vec{k})$ м/с. Найти $\Delta\vec{v}$, $|\Delta\vec{v}|$, $\Delta|\vec{v}|$.

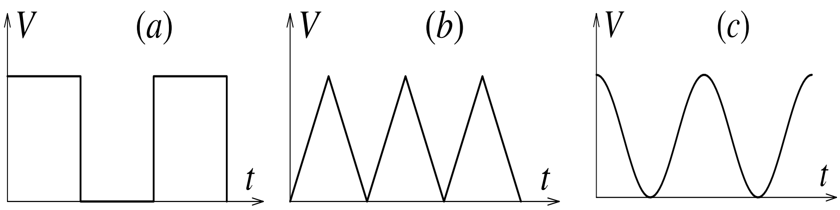
1.2. Вектор $\vec{a}$ повернулся без изменения длины на угол ϕ. Написать для $|\Delta\vec{a}|$ точное выражение и приближенное, справедливое при $|\phi| << 1$.

1.3. В пространстве сил даны точки $A = (0, -2)$, $B = (4, 2)$ и $C = (4, -2)$. В начале координат приложены силы $\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC}$. Построить их равнодействующую $\overrightarrow{OM}$. Выразить силы $\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC}$ и $\overrightarrow{OM}$ через орты $\vec{i}$ и $\vec{j}$ координатных осей.

1.4. Пусть $a = a(t)$ – скаляр, $\vec{b} = \vec{b}(t)$ – вектор. Доказать, что

$$\frac{d}{dt}a\vec{b} = \frac{da}{dt}\vec{b} + a\frac{d\vec{b}}{dt}.$$

1.5. Начертить графики зависимостей от времени пути и ускорения некоторых тел, если даны графики зависимости их скоростей от времени.



1.6. Тело движется по криволинейной траектории. Его скорость меняется по закону $\vec{v} = a\vec{i} + bt\vec{j} + c\sqrt{t}\vec{k}$, где t – время, a, b, c – константы, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты. Найти тангенциальное ускорение в момент времени t.

1.7. По взаимно перпендикулярным и прямолинейным дорогам по направлению к перекрестку движутся две машины с постоянными скоростями v_1 и v_2 ($v_1 > v_2$). В начальный момент времени машины находились от перекрестка на расстояниях s_1 и s_2 соответственно. В какой момент времени расстояние между машинами станет наименьшим? Задачу решить двумя способами: а) в системе отсчета, связанной с Землей; б) в системе отсчета одной из машин.

Срок для выполнения задания – 1 неделя.

Задание 2

Законы Ньютона

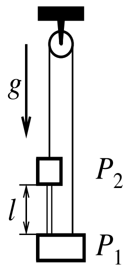
Вопросы к коллоквиуму

1. Второй закон Ньютона для центра масс. Закон сохранения импульса.
2. Начальные условия для интегрирования уравнений движения.

Разобрать задачи с решениями по: [4], гл. 2, §1, № 3 и 4; [5], № 1.30, 1.32, 1.35.

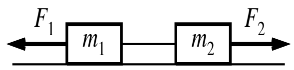
Задачи

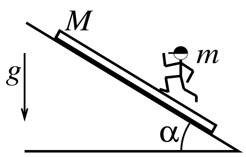
2.1. Летучая рыба, выскакивая из воды под углом 20°, поднимается до высоты 0,5 м и снова падает в воду на расстоянии 7 м от того места, где она выскочила. Пользуется ли рыба плавниками для планирования в полете?



2.2. На перекинутой через блок нити неподвижно висят грузы весом P_1 и P_2 ($P_1 > P_2$). Грузы соединены резиновым шнуром, сила натяжения F которого зависит от его длины l по закону $F = k(l - l_0)$, где l_0 – длина нерастянутого шнура, k – константа. Найти длину шнура и силу натяжения нити.

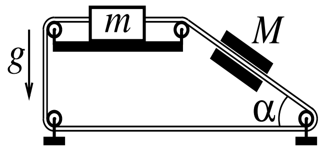
2.3. Два тела с массами m_1 и m_2 связаны нитью. Нить выдерживает без разрыва натяжение $\le T$. К телам приложены силы $F_1 = \alpha t$ и $F_2 = 2\,\alpha t$ (α – постоянный коэффициент, t – время). Определить момент разрыва нити.



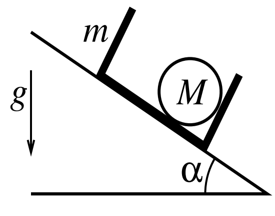


2.4. Доска массы M может скользить без трения по плоскости, наклоненной под углом α к горизонту. В каком направлении и с каким ускорением должен бежать по доске человек массы m, чтобы она оставалась неподвижной?

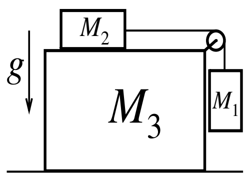
2.5. Тело массы M скользит с ускорением a по наклонной части каната, туго растянутого с помощью блоков. Каково ускорение тела массы m, если трение в блоках и тела m о подставку отсутствует?



2.6. Ящик массы m с находящимся внутри него шаром массы M соскальзывает с плоскости, наклоненной под углом α к горизонту. Коэффициент трения ящика о плоскость равен μ. Найти силы, с которыми шар действует на дно и стенки ящика.



2.7. Груз массы M_1 падает и через невесомый блок приводит в движение груз массы M_2. Масса плиты, к которой прикреплен блок, равна M_3. Определить силу давления плиты на пол. Плита неподвижна. Трение отсутствует.



Срок для выполнения задания – 2 недели.

Задание 3

Центр масс. Закон сохранения импульса

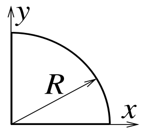
Вопросы к коллоквиуму

1. Радиус-вектор центра масс системы. Использование симметрии для нахождения центра масс.

Задачи

3.1. Найти положение центра масс молекулы аммиака NH_3. Длины связей N-H равны 1,01 Е, углы H-N-H равны 107,3^{o}.

3.2. Доказать, что центр масс треугольника находится на пересечении медиан.

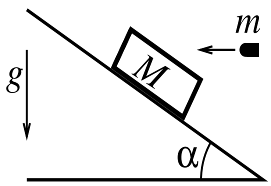


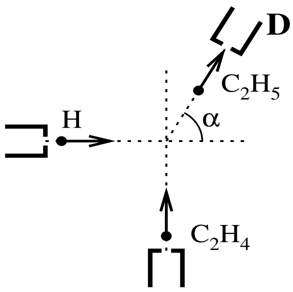
3.3. Найти координаты центра масс четверти круглого диска радиуса R.

3.4. Найти центр масс конуса с радиусом основания R и высотой h.

3.5. Плот массы $M_1 = 400$ кг и длиной $l = 10$ м покоится на неподвижной воде. Два мальчика массами $M_2 = 60$ кг и $M_3 = 40$ кг, стоящие на концах плота, одновременно начинают двигаться друг к другу с одинаковыми скоростями и останавливаются при встрече. На какое расстояние при этом сместится плот?

3.6. По наклоненной под углом α к горизонту гладкой плоскости соскальзывал без начальной скорости брусок массы M. Когда брусок находился на расстоянии l от исходной точки, в него попала летевшая горизонтально пуля массы m. В результате брусок с застрявшей в нем пулей остановился. Определить скорость пули. Время движения пули внутри бруска считать пренебрежимо малым.





3.7. В скрещенных пучках изучают реакцию $H + C_2H_4 \rightarrow C_2H_5$. Под каким углом α к пучку атомов водорода нужно расположить детектор **D** для регистрации этильных радикалов? Какова скорость движения радикалов? Скорость атомов H в пучке равна 1200 м/с, скорость молекул этилена – 300 м/с. Как выглядит процесс в системе центра масс сталкивающихся частиц?

Срок для выполнения задания – 1 неделя.

Задание 4

Скалярное произведение. Работа и энергия. Законы сохранения энергии и импульса

Вопросы к коллоквиуму

1. Потенциальная энергия (в общем виде, без примеров). Взаимосвязь силы и потенциальной энергии.
2. Закон сохранения энергии изолированной системы трех взаимодействующих частиц.
3. Закон сохранения энергии незамкнутой системы.
4. Теорема Кёнига.

Разобрать задачи с решениями по: [4], гл. 2, § 2, № 4; [5], №№ 1.61, 1.73.

Задачи

4.1. Для векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ известны их сумма $\vec{s}=11\vec{i}-\vec{j}+5\vec{k}$ и разность $\vec{a}-\vec{b}=-5\vec{i}+11\vec{j}+9\vec{k}$. Найти: а) угол между $\vec{a}$ и $\vec{b}$; б) угол между $\vec{a}$ и $\vec{s}$.

4.2. Определить углы в треугольнике ABC, вершины которого имеют координаты:

$$A = (2, -1, 3);\ B = (1, 1, 1);\ C = (0, 0, 5).$$

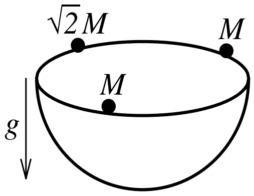
4.3. Доказать, что если $\left|\vec{a}+\vec{b}\right| = \left|\vec{a}-\vec{b}\right|$, то векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ взаимно перпендикулярны.

4.4. Тело массы m тянут с силой F вдоль плоскости, наклоненной под углом α к горизонту, до подъема на высоту h. Коэффициент трения между телом и плоскостью равен μ. Определить работу силы трения.

4.5. Привязанный к кораблю упругим тросом космонавт массы m удалялся со скоростью V от корабля в момент, когда трос полностью распрямился. Сила упругости (F) зависит от удлинения троса (x) как $F = \beta x^3$. Определить удлинение троса в момент остановки космонавта. Какую работу совершит сила упругости, когда удлинение троса составит половину от максимального? Масса космонавта много меньше массы корабля.

4.6. Летящая вертикально вверх со скоростью 720 км/час ракета-носитель на высоте 2000 км от поверхности Земли выпускает в направлении своего движения спутник массой в одну тонну. Скорость удаления спутника от ракеты равна 540 км/час. Покинет ли спутник Землю? Масса спутника много меньше массы ракеты.

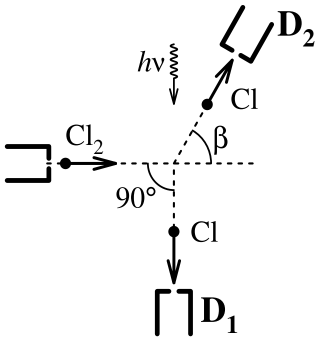
4.7. Три небольших груза массы M, M и $\sqrt{2}\,M$ одновременно соскальзывают с края гладкой полусферы и сталкиваются абсолютно неупруго в ее нижней точке. При каком расположении грузов выделившееся при столкновении тепло будет максимальным и каково количество этого тепла?



4.8. В молекулярном пучке исследуют процесс фотодиссоциации молекулярного хлора:

$$Cl_2 + h\nu \rightarrow Cl + Cl\ .$$

Скорость молекулы хлора $V_0 = 400$ м/с. Один из атомов хлора, движущийся со скоростью $V_1 = 1530$ м/с, регистрируется детектором $\mathbf{D}_1$. Под каким углом β следует расположить детектор $\mathbf{D}_2$, чтобы зарегистрировать второй атом хлора? Какова его скорость? Определить энергию диссоциации (в кДж/моль) молекулярного хлора. Длина волны используемого света $\lambda = 365$ нм, энергия фотона $E = h\nu$, $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ Дж·с. Импульсом фотона пренебречь.



4.9. Атом аргона налетает на покоящуюся молекулу хлора. Найти минимальное значение скорости атома, при которой еще возможна диссоциация молекулы хлора

$$Ar + Cl_2 \rightarrow Ar + Cl + Cl\ .$$

Энергия разрыва связи Cl–Cl равна 239 кДж/моль.

4.10. Может ли атом аргона остановиться после удара о неподвижную молекулу метана? А метан после удара об аргон?

Срок для выполнения задания – 2 недели.

Задание 5

Векторное произведение. Вращательное движение.

Тензор инерции

Вопросы к коллоквиуму

1. Момент инерции (определение). Теорема Гюйгенса – Штейнера.
2. Уравнение моментов при вращении твердого тела в общем виде. Уравнение моментов и кинетическая энергия при вращении твердого тела вокруг оси.
3. Связь момента импульса и угловой скорости твердого тела при произвольном вращении. Пояснить геометрический смысл тензора инерции.
4. Тензор инерции (определение). Главные оси, главные значения. Главные моменты инерции. Связь главных моментов инерции плоского твердого тела. Свободные оси твердого тела.

Разобрать задачи с решениями по: [4], гл. 3, № 2, 3, 5.

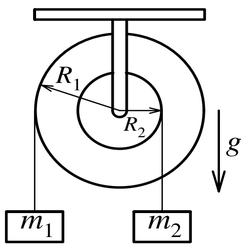
Задачи

5.1. Векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ составляют угол 45°, $|\vec{a}| = |\vec{b}| = 5$. Найти площадь треугольника, построенного на векторах $\vec{a} - 2\vec{b}$ и $3\vec{a} + 2\vec{b}$.

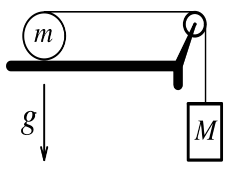
5.2. Задан треугольник ABC с вершинами в точках $A = (1, -2, 8)$, $B = (0, 0, 4)$, $C = (6, 2, 0)$. Вычислить его площадь и высоту BD.

5.3. Показать, что $\vec{a} \times \vec{b} \cdot \vec{c} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}$.

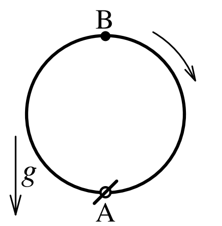
5.4. Доказать, что $\vec{a} \times \vec{b} \cdot \vec{c} = \vec{a} \cdot \vec{b} \times \vec{c}$.



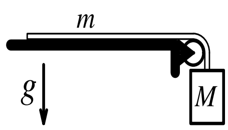
5.5. На ступенчатый цилиндрический блок, радиусы частей которого равны R_1 и R_2, а момент инерции – I, намотаны в противоположных направлениях две легкие нити. К концам нитей прикреплены грузы m_1 и m_2. Найти ускорения грузов и натяжение нитей.



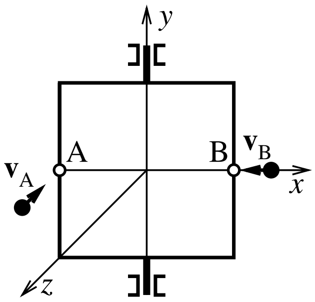
5.6. Нерастяжимая, невесомая нить намотана на сплошной цилиндр радиуса R, массы m. К переброшенному через невесомый блок концу нити прикреплен груз массы M. Чему равно ускорение груза, если цилиндр катится без проскальзывания?



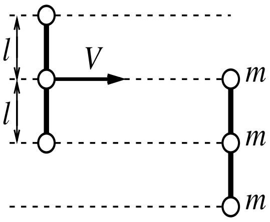
5.7. Обруч радиуса R может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через точку A перпендикулярно его плоскости. Обруч подняли так, что диаметрально противоположная точка B заняла наивысшее положение, и отпустили без толчка. Найти скорость точки B в момент прохождения ею крайнего нижнего положения.



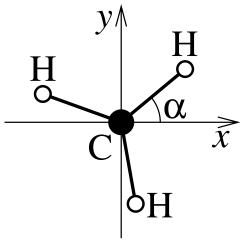
5.8. Веревка массы m и длины l лежит на горизонтальном столе. Ее конец перекинут через блок, представляющий собой сплошной цилиндр массы m_1, радиуса R ($R << l$), и прикреплен к грузу массы M. В начальный момент груз подтянут вплотную к блоку. Коэффициент трения веревки о стол равен μ. Веревка вращает блок без проскальзывания. Определить скорость веревки в момент соскальзывания ее свободного конца со стола.



5.9. Однородная тонкая квадратная пластина массы m, способная свободно вращаться вокруг оси y, являющейся осью симметрии фигуры, первоначально располагалась в состоянии покоя в плоскости XY. В точки А и В на пластине одновременно попали и прилипли два одинаковых пластилиновых шарика массы m каждый, летевших со скоростями $\vec{v}_A = -v\vec{k}$ и $\vec{v}_B = -v\vec{i}$. Какая энергия перешла в тепло при соударении?



5.10. Три одинаковых, закрепленных на жестком невесомом стержне пластилиновых шарика массы m каждый, двигаясь со скоростью V по гладкой плоскости, столкнулись и прилипли к такой же покоившейся системе. Найти выделившееся тепло. Трение о плоскость пренебрежимо мало.



5.11. Определить тензор инерции метильного радикала в системе координат, показанной на рисунке. Найти главные моменты инерции. Все атомы лежат в плоскости XY. Длины C–H-связей равны d. Одна из них составляет угол α с осью x.

5.12. Тонкий диск радиуса R и массы m жестко скреплен с осью так, что угол между ней и плоскостью диска равен ϕ. Диск вращается вокруг этой оси с угловой скоростью ω. Найти модуль вектора момента импульса диска. Какой угол составляет вектор момента импульса с осью вращения?

Срок для выполнения задания – 3 недели.

Задание 6

Колебания

Вопросы к коллоквиуму

1. Уравнение движения гармонического осциллятора. Решение уравнения движения гармонического осциллятора. Изображение решения на комплексной плоскости.
2. Потенциальная энергия осциллятора. Нахождение частоты колебаний из энергетических соображений. Малые колебания. Колебания двухатомной молекулы. Приведенная масса в задаче о двухатомной молекуле.
3. Затухающие колебания. Анализ решения уравнения движения затухающего осциллятора. Декремент затухания, добротность.
4. Вынужденные колебания. Анализ решения уравнения движения осциллятора с внешним гармоническим воздействием. Резонанс. Амплитуда и фаза стационарного колебания как функция частоты воздействия.

Разобрать задачи с решениями по: [4], гл. 5, № 3, 5, 6.

Задачи

6.1. Точка движется вдоль оси X по закону $x = 2\ \cos(\omega t - \pi/6)$. Построить графики: а) смещения, скорости и ускорения точки как функций времени t; б) скорости и ускорения как функций смещения x.

6.2. Найти круговую частоту и амплитуду гармонических колебаний частицы, если известно, что на расстояниях x_1 и x_2 от положения равновесия ее скорость равнялась v_1 и v_2 соответственно.

6.3. Потенциальная энергия частицы в поле имеет вид $U(r) = ar^{-2} - br^{-1}$ (константы a и b положительны). Нарисовать графики $U(r)$ и силы $F(r)$. Найти положение равновесия частицы r_0. Проверить, устойчиво ли равновесие в этой точке. Найти максимальное значение силы притяжения.

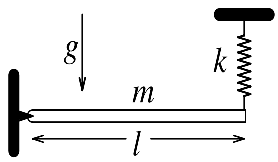
6.4. Определить частоту малых колебаний частицы массы m в поле:
а) потенциала Морзе:

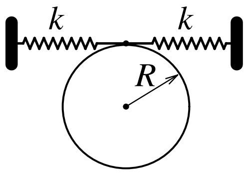
$$U(x) = U_0\,[e^{-2\alpha x} - 2e^{\alpha x}];$$

б) потенциала Леннарда – Джонса:

$$U(x)=U_0\left[\left(\frac{a}{x}\right)^{12}-\left(\frac{a}{x}\right)^{6}\right].$$

6.5. Найти частоту малых колебаний однородного стержня длины l массы m. Один конец стержня закреплен на горизонтальной оси, вокруг которой он может свободно вращаться, а второй удерживается пружиной жесткости k. Равновесное положение стержня – горизонтальное.

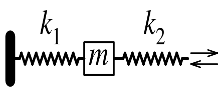


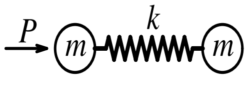


6.6. Найти период малых колебаний однородного диска массы M радиуса R, совершаемых под действием двух пружин жесткости k. Ось вращения диска проходит через его центр.

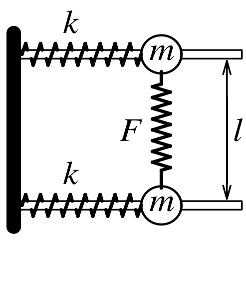
6.7. На невесомой пружине жесткости 20 Н/м подвешен шарик весом в 50 г. На него действует вертикально направленная гармоническая сила с частотой $25\ \text{с}^{-1}$. При установившихся колебаниях смещение шарика отстает по фазе от вынуждающей силы на $3\pi/4$. Найти добротность осциллятора.

6.8. К грузу массы m прикреплены две пружины, коэффициенты жесткости которых равны k_1 и k_2. Конец первой пружины неподвижен, а конец второй движется по закону $x = A\ \cos(\omega t)$, где $\omega=\sqrt{k_1/m}$. Найти амплитуду вынужденных колебаний груза. Трение очень мало.





6.9. Атому покоившейся двухатомной молекулы мгновенно сообщили направленный вдоль связи импульс P. Найти частоту и амплитуду малых колебаний молекулы. Масса каждого из атомов равна m, жесткость связи атомов – k.



6.10. Две бусины массы m каждая могут двигаться без трения по горизонтальным параллельным стержням, расположенным на расстоянии l один от другого. На стержни надеты и прикреплены к бусинам одинаковые пружины жесткости k. Между собой бусины соединены третьей пружиной, натянутой с силой F. Пренебрегая изменением F при малых смещениях бусин из положений равновесия, найти частоты и вид нормальных колебаний такой системы.

Срок для выполнения задания – 3 недели.

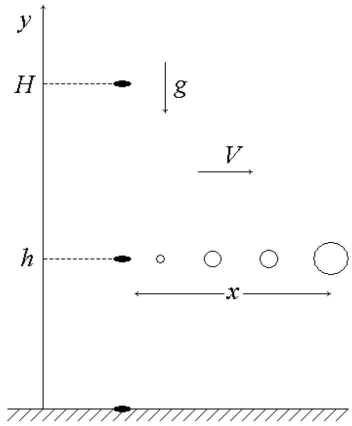
Образцы вопросов для подготовки к экзамену

1. Системы координат: декартова, сферическая и цилиндрическая. Их связь. Элемент объема в этих координатах.
2. Доказать, что перпендикулярная радиус-вектору составляющая скорости равна произведению модуля радиус-вектора на угловую скорость.
3. Вывести выражение для величины нормальной составляющей ускорения.
4. Второй закон Ньютона для центра масс. Закон сохранения импульса.
5. Начальные условия для интегрирования уравнений движения.
6. Радиус-вектор центра масс системы. Использование симметрии для нахождения центра масс.
7. Потенциальная энергия (в общем виде, без примеров). Взаимосвязь силы и потенциальной энергии.
8. Закон сохранения энергии изолированной системы трех взаимодействующих частиц.
9. Закон сохранения энергии незамкнутой системы.
10. Теорема Кенига.
11. Момент инерции (определение). Теорема Гюйгенса – Штейнера.
12. Уравнение моментов при вращении твердого тела в общем виде. Уравнение моментов и кинетическая энергия при вращении твердого тела вокруг оси.
13. Связь момента импульса и угловой скорости твердого тела при произвольном вращении. Пояснить геометрический смысл тензора инерции.
14. Тензор инерции (определение). Главные оси, главные значения. Главные моменты инерции. Связь главных моментов инерции плоского твердого тела. Свободные оси твердого тела.
15. Уравнение движения гармонического осциллятора. Решение уравнения движения гармонического осциллятора. Изображение решения на комплексной плоскости.
16. Потенциальная энергия осциллятора. Нахождение частоты колебаний из энергетических соображений. Малые колебания. Колебания двухатомной молекулы. Приведенная масса в задаче о двухатомной молекуле.
17. Затухающие колебания. Анализ решения уравнения движения затухающего осциллятора. Декремент затухания, добротность.
18. Вынужденные колебания. Анализ решения уравнения движения осциллятора с внешним гармоническим воздействием. Резонанс. Амплитуда и фаза стационарного колебания как функция частоты воздействия.

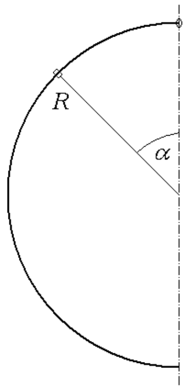
Примеры задач на контрольных работах и экзаменах

Первая контрольная работа

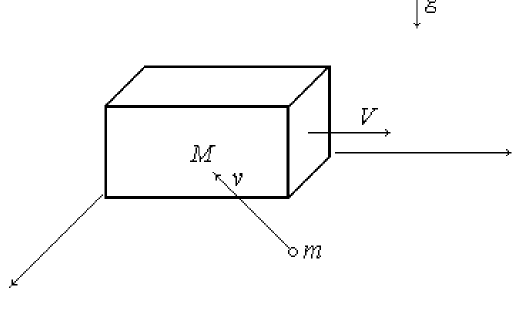
1. (100 б.) Дымовая шашка падает без начальной скорости с высоты H. Дым сносится ветром, скорость которого V не зависит от высоты. На какое расстояние x будет снесен дым на высоте h к моменту падения шашки на землю?



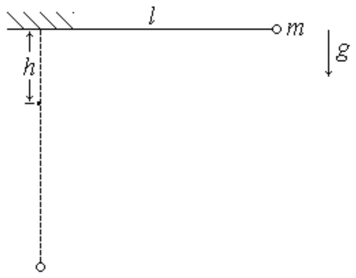
2. (120 б.) Гладкий прут изогнут в виде полуокружности радиуса R. На прут надето колечко, которое может двигаться по нему без трения. Колечко начинает двигаться из верхней точки без начальной скорости под действием силы тяжести. Найти тангенциальное и нормальное ускорение колечка в момент, когда прямая, проведенная из центра полуокружности к колечку, составляет угол α с вертикалью.



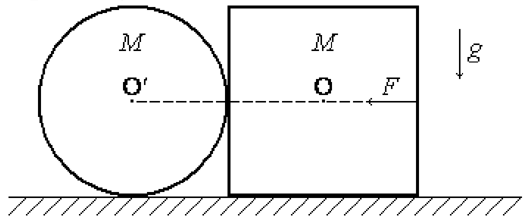
3. (140 б.) Брусок массы M двигался по гладкой поверхности с постоянной скоростью V, когда в него врезалась горизонтально летящая пуля массы m со скоростью v и застряла в нем. Под каким углом к направлению движения бруска произведен выстрел, если известно, что модуль импульса бруска после попадания пули не изменился?



4. (160 б.) Подвешенный на нерастяжимой нити длины l шарик массы m отпускают из положения, в котором нить горизонтальна. Под точкой подвеса расположен гвоздь, в который нить упирается при движении шарика. Определить минимальное расстояние h между гвоздем и точкой подвеса, при котором происходит разрыв нити. Известно, что для разрыва нити к ее концам необходимо приложить силу T.



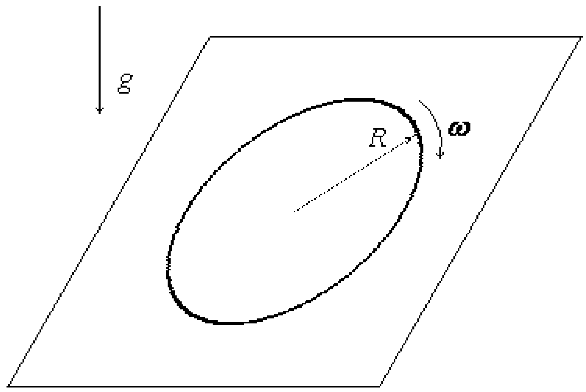
5. (180 б.) На горизонтальной поверхности лежат касающиеся друг друга кубик и цилиндр массы M каждый. С какой минимальной силой F, направленной вдоль горизонтальной прямой OO′, проходящей через центры тел, надо толкать кубик, чтобы при движении системы цилиндр не вращался? Коэффициенты трения обоих тел о поверхность и между собой равны μ.



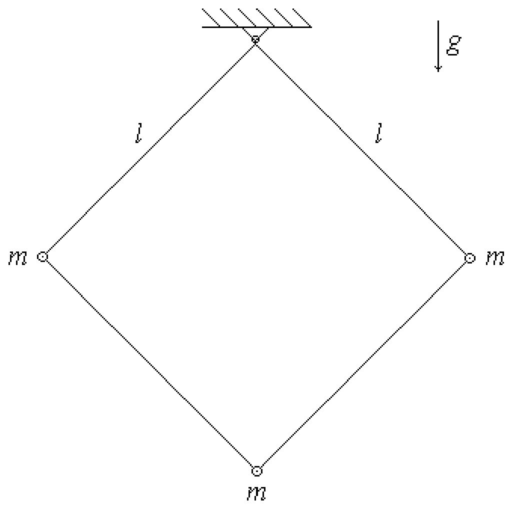
Примечание. Во всех задачах предполагается наличие поля тяжести. Ускорение свободного падения g.

Вторая контрольная работа

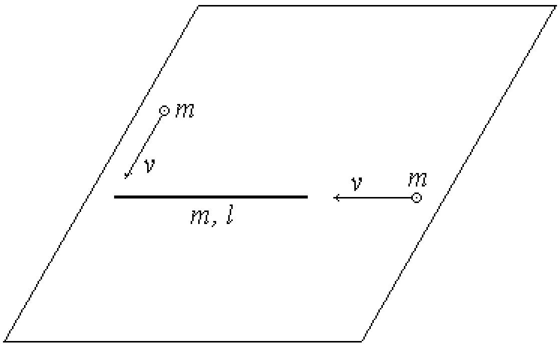
1. (100 б.) Однородный тонкий обруч радиусом R раскрутили вокруг его оси до угловой скорости ω и плашмя положили на стол. Коэффициент трения обруча о поверхность стола равен μ. Сколько времени понадобится для остановки обруча? Сколько оборотов он сделает до остановки?



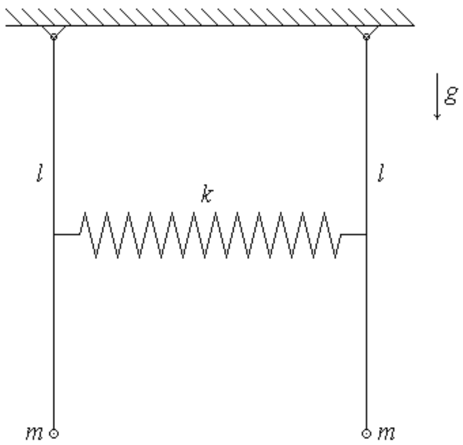
2. (120 б.) В трех углах квадрата, собранного из тонких невесомых спиц длиной a, закрепили три шарика с равными массами m. Квадрат подвесили за свободный угол. Найти частоту малых колебаний системы, если они происходят в плоскости квадрата.



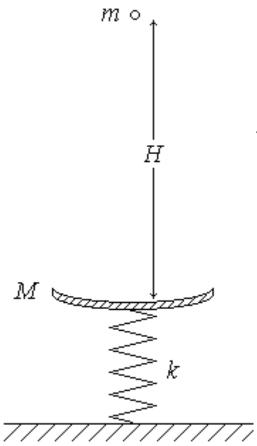
3. (140 б.) Тонкий стержень массой *m* длиной *l* лежит на гладкой плоскости. К концам стержня одновременно прилипают два шарика массой *m*. Один из шариков летел со скоростью *v* вдоль стержня, а другой – с такой же скоростью, но перпендикулярно стержню. Найти энергию, выделившуюся в виде тепла.



4. (160 б.) Система состоит из двух одинаковых маятников. Каждый маятник представляет собой шарнирно закрепленный жесткий невесомый стержень длиной *l*, к нижнему концу которого прикреплен груз малого размера массой *m*. Маятники связаны пружиной жесткостью *k*, концы которой закреплены на серединах стержней. В равновесии пружина не деформирована. Найти частоты малых колебаний системы и нормальные координаты. Колебания происходят в плоскости, проходящей через оба стержня, когда они находятся в равновесном положении.



5. (180 б.) Груз массой m отпускают без начальной скорости с высоты H на чашку пружинных весов. Масса чашки равна M, жесткость пружины – k. При ударе груз прилипает к чашке. Найти частоту и амплитуду его колебаний на весах.



Примечание. В задачах 1, 2, 4, 5 предполагается наличие поля тяжести Земли с ускорением свободного падения g.

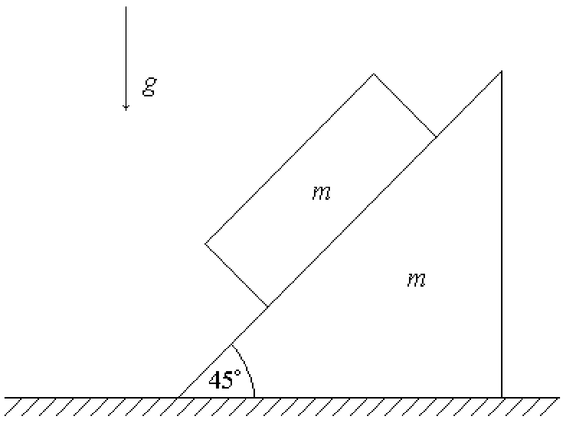
Экзамен

1. (120 б.) Скорость частицы меняется во времени t по закону

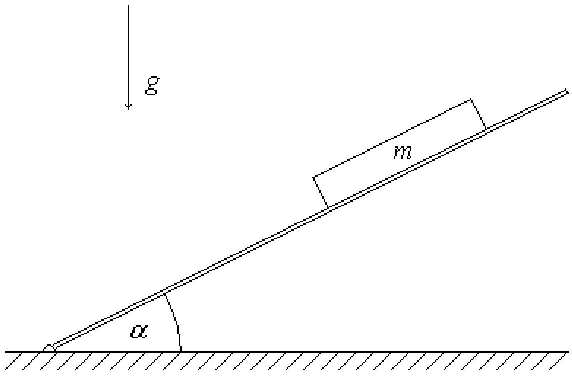
$$\vec{v} = (1 - t/\tau)\vec{v}_0,$$

где τ – известная положительная величина, $\vec{v}_0$ – постоянный вектор. В момент времени $t = 0$ частица находилась в начале координат. В какие моменты времени она будет находиться на расстоянии S от начала координат?

2. (150 б.) Клин с углом наклона 45° к горизонту находится на гладкой горизонтальной плоскости. С него без трения соскальзывает брусок с массой, равной массе клина. Найти ускорение клина.

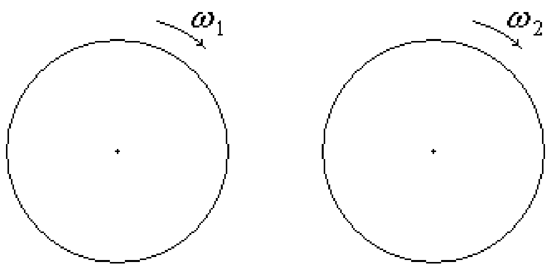


3. (180 б.) На доске лежит брусок массой m. Один конец доски шарнирно закреплен на полу, другой конец поднимают. Найти зависимость от угла α между доской и полом силы трения, действующей на брусок. Нарисовать график этой зависимости. Коэффициент трения бруска о доску равен μ.

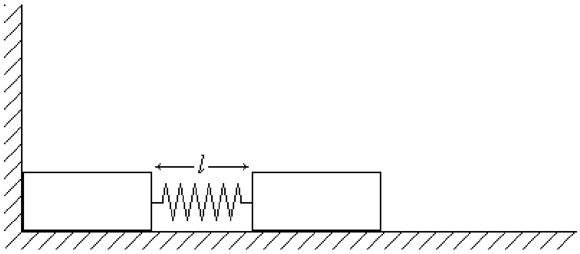


4. (200 б.) Частица массы m налетает со скоростью v_1 на покоящуюся частицу и после абсолютно упругого удара отлетает со скоростью v_2 перпендикулярно к направлению своего первоначального движения. Найти массу частицы.

5. (220 б.) Два одинаковых шероховатых цилиндра раскрутили вокруг их осей до угловых скоростей ω_1 и ω_2 и привели в соприкосновение боковыми поверхностями. Оси цилиндров параллельны. Найти установившиеся спустя достаточно продолжительное время угловые скорости вращения цилиндров.



6. (230 б.) На гладкой горизонтальной плоскости лежат два одинаковых соединенных пружиной бруска. Длина пружины в недеформированном состоянии равна l. Левый брусок упирается в стенку. Правый брусок прижимают так, что пружина укорачивается вдвое, и отпускают. Найти максимальную и минимальную длины пружины, которые достигаются при свободном движении системы.

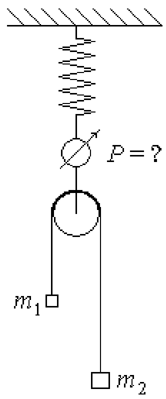


Примечание. В задачах 2 и 3 предполагается наличие однородного поля тяжести с ускорением свободного падения g.

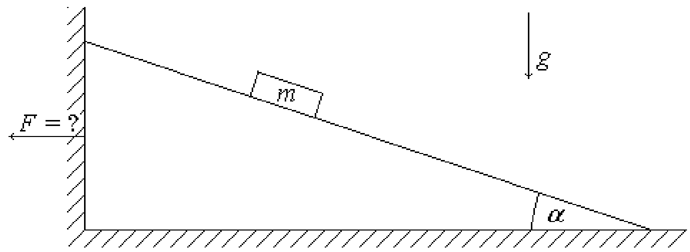
Переэкзаменовка

1. (120 б.) Покинув источник, частица пролетает с постоянной скоростью расстояние l, а затем тормозится с постоянным ускорением a. При какой скорости вылета частицы из источника время ее движения до остановки будет минимальным?

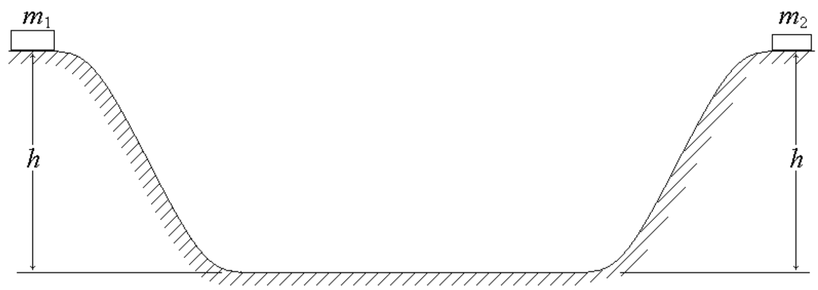
2. (150 б.) К концам перекинутой через невесомый блок нерастяжимой невесомой нити привязаны грузы массой m_1 и m_2. Блок подвешен к пружинным весам. Каковы показания весов при свободном движении грузов?



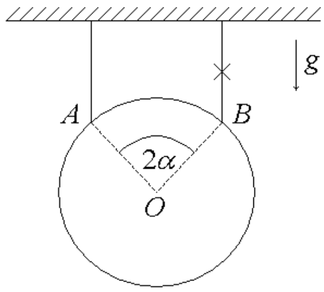
3. (180 б.) Клин с углом наклона α лежит на гладкой горизонтальной плоскости, упираясь в стенку. На него кладут груз массой m. С какой силой клин давит на стенку? Коэффициент трения груза о клин равен μ.



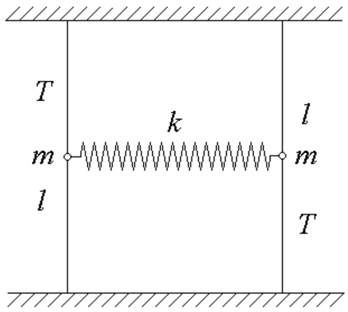
4. (180 б.) Два бруска с массами m_1 и m_2 одновременно начинают соскальзывать навстречу друг другу с горок высотой h. При столкновении бруски слипаются. На какую высоту поднимутся бруски после столкновения? Бруски движутся без трения.



5. (220 б.) Однородный диск массой m подвешен на двух одинаковых нитях в точках A и B, расположенных на одной горизонтали. Угол AOB равен 2α. Правую нить перерезают. Найти силу натяжения левой нити сразу после того, как будет перерезана правая нить.



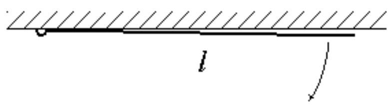
6. (250 б.) Две одинаковые тонкие невесомые струны длиной l расположены в одной плоскости и натянуты с силой T. На серединах струн закреплены грузы массой m каждый. Грузы связаны недеформированной пружиной жесткости k. Найти частоты малых нормальных колебаний системы и нормальные координаты. Колебания происходят в плоскости, проходящей через струны.



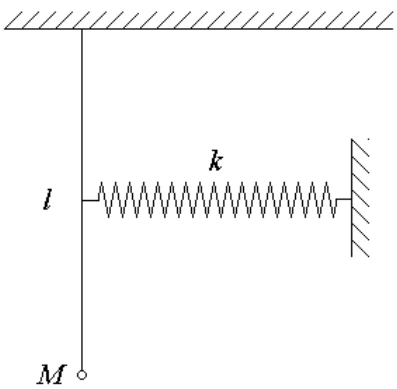
Примечание. В задачах 2–5 предполагается наличие однородного поля тяжести с ускорением свободного падения g.

Вторая переэкзаменовка

1. (100 б.) Стержень длины l шарнирно закреплен одним концом. Первоначально стержень занимает горизонтальное положение. Его отпускают. Найти скорость свободного конца стержня в нижней точке.

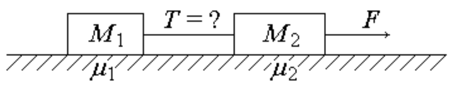


2. (100 б.) Найти период колебаний груза массы M на невесомом стержне длины l, если к середине стержня прикреплена пружина жесткости k.



3. (100 б.) Ускорение тела при прямолинейном движении изменяется по закону $a = a_0(1 - t/\tau)$. Найти пройденный путь к моменту времени, когда скорость тела станет равной нулю. Начальная скорость тела была равна нулю.

4. (100 б.) Найти силу натяжения нити в системе, изображенной на рисунке. Массы тел M_1 и M_2. Коэффициенты трения μ_1 и μ_2.



2-й курс, III семестр (Электродинамика)

Часть 1

Закон Кулона. Теорема Гаусса. Потенциал. Принцип суперпозиции

Вопросы к коллоквиуму

1. Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность (теорема Гаусса).
2. Дивергенция вектора напряженности электрического поля.
3. Потенциал электрического поля системы зарядов.
4. Уравнения Пуассона и Лапласа.

1.1. Тонкий прямой стержень длиной $2a$ заряжен с линейной плотностью λ. Для точек, лежащих на прямой, перпендикулярной к оси стержня и проходящий через его центр, найти напряженность электрического поля как функцию расстояния r от центра стержня. Найти ту же величину для бесконечного стержня, пользуясь теоремой Гаусса. Сравнить и проанализировать результаты.

1.2. Равномерно заряженная бесконечная нить с плотностью заряда $+\delta$ перпендикулярна равномерно заряженной бесконечной плоскости, плотность заряда которой $+\sigma$. Найти величину поля в пространстве.

1.3. Определить потенциал и напряженность электрического поля внутри и вне равномерно заряженного по объему шара радиуса R. Объемная плотность заряда ρ. Нарисовать графики.

1.4. Внутри шара радиуса R, равномерно заряженного по объему с плотностью ρ, имеется незаряженная сферическая полость радиуса R_1. Центр полости находится на расстоянии a от центра шара ($a + R_1 < R$). Найти электрическое поле в полости.

1.5. Потенциал некоторого поля имеет вид $\varphi = \alpha(xy - z^2)$, где α – константа. Найти модуль вектора $\boldsymbol{E}$ в точке (1, 2, 1).

1.6. Найти распределение плотности зарядов, при котором напряженность электрического поля равна $\boldsymbol{E} = \alpha r^2\boldsymbol{r}$.

1.7. Найти зависимость плотности зарядов от координат $x, y, z,$ при которой напряженность поля описывалась бы функцией $\boldsymbol{E}= x\boldsymbol{i} + 2y^2\boldsymbol{j}+ 3z^3\boldsymbol{k}$. Найти потенциал этого поля в точке (1,1,0), если $\varphi(0, 0, 0) = 0$.

1.8. Частица массы m с зарядом q и скоростью v приближается с очень большого расстояния к заряженному кольцу, двигаясь по его оси. Радиус кольца R, масса M, заряд Q. При какой наименьшей скорости v частица пройдет через кольцо в случаях: а) кольцо закреплено; б) кольцо не закреплено и начальная скорость кольца равна нулю?

Срок выполнения задания 2 недели.

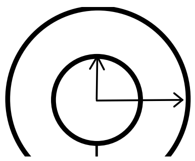
Часть 2

Энергия электрического поля. Условия равновесия зарядов в проводнике. Электрический диполь

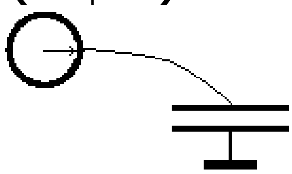
Вопросы к коллоквиуму

1. Электростатическая энергия системы распределенных зарядов. Плотность энергии электрического поля.
2. Граничные условия на поверхности проводника.
3. Емкость проводника. Емкость плоского конденсатора. Энергия плоского конденсатора.
4. Потенциал диполя. Поле диполя. Потенциальная энергия взаимодействия диполя с полем.

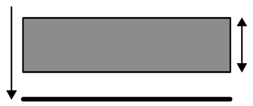
2.1. Четыре непроводящих шарика радиусом R, в центре каждого из которых находится заряд q, расположены вдоль прямой, касаясь друг друга. Какую работу нужно совершить, чтобы сложить из этих шариков пирамидку (правильный тетраэдр)? Вес шариков не учитывать.



2.2. Внутри равномерно заряженной сферы с радиусом b и зарядом q находится заземленная проводящая сфера радиуса a ($a < b$). Центры сфер совпадают. Найти напряженность электрического поля и его потенциал вне большой сферы на расстоянии r от центра.



2.3. Одну пластину незаряженного конденсатора емкостью C заземляют, а другую присоединяют длинным тонким проводом к проводящему шару радиуса R с зарядом q, удаленному от окружающих предметов. Какой заряд останется на шаре?



2.4. В плоский заряженный конденсатор с зазором $2d$ внесли металлическую пластину толщиной d. Найти, как изменится: а) разность потенциалов между обкладками; б) поле, если разность потенциалов поддерживается постоянной.

2.5. В плоском заряженном конденсаторе с зарядом q и зазором $2d$ находится металлическая пластина толщиной d, параллельная обкладкам конденсатора. Площадь обкладки и пластины равна S. Найти работу, которую надо совершить, чтобы вынуть пластину из конденсатора.

2.6. Найти электрическую энергию системы, состоящей из двух концентрических проводящих сфер, радиусом R и $R/2$ и зарядами Q и q соответственно.

2.7. Определить силу, действующую на электрический диполь d в поле заряда q, когда диполь направлен на заряд, от заряда и перпендикулярно к направлению на заряд. Нарисовать графически зависимости силы и потенциальной энергии от расстояния для этих трех случаев.

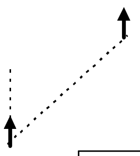
2.8. Оценить (в кДж/моль) энергию взаимодействия:

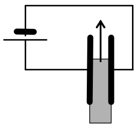
1) двух частиц с зарядом e и $-e$;
2) частицы с зарядом e и частицы с дипольным моментом $d = ea$, где $a = 0{,}2$ Å;
3) двух частиц с дипольными моментами d.

Расстояние между частицами во всех случаях 4 Å; e – заряд электрона; 1 Å = 10^{-10} м.

2.9. Определить дипольный момент молекулы H_2O. Эффективный заряд атомов водорода $5\cdot10^{-20}$ Кл, угол H-O-H равен $104{,}5^{\circ}$, длина O-H связи 0,96 Å.

2.10. Найти силу, с которой взаимодействуют два электрических диполя, расположенных, как показано на рисунке. Диполи лежат в одной плоскости.





Срок выполнения задания 2 недели.

Часть 3

Диэлектрики

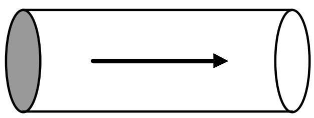
Вопросы к коллоквиуму

1. Вектор поляризации. Его связь со средним полем. Поляризуемость. Связанные заряды. Связь поверхностных связанных зарядов с вектором поляризации. Диэлектрическая постоянная.
2. Вектор электростатической индукции, его связь с вектором поляризации. Теорема Гаусса для диэлектриков.
3. Граничные условия для векторов $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{D}$ в диэлектриках. Уравнение Пуассона.
4 . Энергия системы электрических зарядов в диэлектрике.

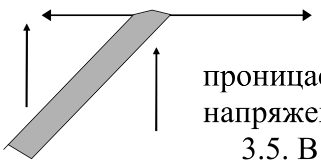
3.1. Газообразный гелий находится в однородном электрическом поле E. Найти наведенный дипольный момент атома гелия, если при концентрации газа n диэлектрическая проницаемость равна ε. Газ считать разреженным.

3.2. Пространство между обкладками плоского конденсатора с расстоянием между обкладками d заполнено двумя слоями диэлектрика. Диэлектрические проницаемости этих слоев ε_1 и ε_2, а толщины d_1 и d_2, причем $d_1 + d_2 = d$. Определить емкость конденсатора.

3.3. Найти напряженность электрического поля в центре равномерно поляризованного цилиндра с замороженной поляризацией $\boldsymbol{P}$. Вектор поляризации параллелен оси цилиндра, его радиус R, длина d.

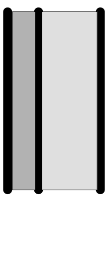


3.4. В пространство с однородным электрическим полем $\boldsymbol{E}$ внесена под углом α к вектору поля большая плоская пластина из однородного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε. Пренебрегая краевыми эффектами, найти напряженность поля в диэлектрике и поверхностную плотность зарядов.



3.5. В конденсатор, образованный двумя квадратными пластинами (сторона квадрата a = 30 см), расположенными на расстоянии 3 мм друг от друга, вводят со скоростью v = 4 мм/сек диэлектрик с $\varepsilon = 2$. Конденсатор присоединен к источнику напряжения U = 250 В. Найти ток, текущий по проводам.

3.6. Три пластины расположены параллельно друг другу. Расстояние от средней пластины до крайних – d и $2d$. На первой пластине равномерно распределен заряд с плотностью $+\sigma$, на второй -2σ , на третьей $+3\sigma$. Между пластинами находятся диэлектрики с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2. Определить разность потенциалов между пластинами.



Срок выполнения задания 2 недели.

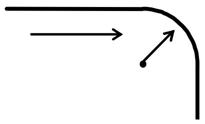
Часть 4

Магнитное поле в вакууме

Вопросы к коллоквиуму

1. Закон Био – Савара.
2. Магнитная индукция прямого и кругового тока (на оси).
3. Дивергенция и ротор вектора магнитной индукции.
4. Векторный потенциал (определение, принцип расчета). Связь векторного потенциала и вектора индукции магнитного поля. Расчет поля прямого тока через векторный потенциал.

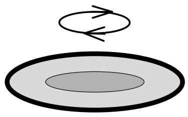
4.1. Определить магнитное поле на оси цилиндрического соленоида конечной длины. Длина цилиндра h, радиус a, число витков на единицу длины n, сила тока I.



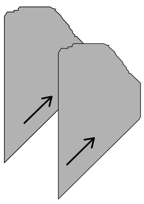
4.2. Провод состоит из двух прямолинейных кусков, идущих из бесконечности под углом 90^{o}, соединенных дугой окружности, как показано на рисунке. По проводу течет ток I. Определить магнитную индукцию в точке O.

4.3. Атом водорода состоит из протона и электрона. Считая, что электрон движется вокруг протона по круговой орбите радиуса 0,53 Å, определить:

1) напряженность электрического поля, создаваемого протоном в точке, где находится электрон;
2) скорость электрона v;
3) отношение скорости электрона к скорости света v/c;
4) силу тока, которой соответствует круговое движение электрона;
5) магнитную индукцию, которую создает электрон в месте расположения протона.



4.4. Тонкий заряженный диск с поверхностной плотностью зарядов $+\sigma$ при $r < R_1$ и $-\sigma$ при $R_2 > r > R_1$ вращается вокруг своей оси с угловой скоростью ω. Найти магнитную индукцию на оси возле самой поверхности.



4.5. По двум безграничным параллельным проводящим плоскостям течет ток с линейной плоскостью i. Найти индукцию магнитного поля и силу притяжения пластин, действующую на единицу площади.

4.6. По бесконечному прямолинейному цилиндрическому проводу радиуса R течет ток. Плотность тока i постоянна по сечению провода. Определить магнитное поле вне и внутри провода.

Срок выполнения задания 2 недели.

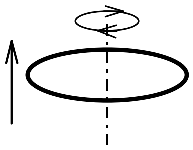
Часть 5

Силы в магнитном поле. Магнитное поле в веществе.
Электромагнитная индукция

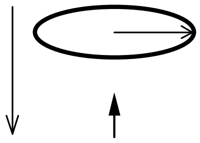
Вопросы к коллоквиуму

1. Сила Лоренца. Сила, действующая на проводник с током (закон Ампера).
2. Магнитный момент и магнитное поле контура с током.
3. Сила и момент сил, действующие на магнитный момент во внешнем магнитном поле. Потенциальная энергия магнитного момента в поле.
4. Токи намагничивания. Вектор намагниченности. Векторы ***B*** и ***H***, сотношение между ними. Уравнения магнитостатики в веществе. Граничные условия на векторы ***B*** и ***H***.
5. Электромагнитная индукция. Закон Фарадея, $rot\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial}$, и интерпретация закона.
6. Коэффициенты взаимной и самоиндукции. Индуктивность.
7. Энергия магнитного поля.

5.1. Заряд q равномерно распределен по длине твердого непроводящего тонкого кольца массой m. Кольцо может свободно вращаться вокруг своей оси. Вначале кольцо покоилось, магнитное поле было равно нулю. Затем включили однородное магнитное поле $\boldsymbol{B}(t)$, перпендикулярное плоскости кольца и меняющееся во времени по закону $\boldsymbol{B}(t) = \boldsymbol{B}_o[1–\exp(t/\tau)]$. Найти угловую скорость вращения кольца. Собственным полем кольца пренебречь; τ – константа.

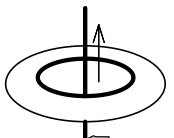


5.2. Кольцо проводника радиусом a с током I висит горизонтально в поле тяжести. Под кольцом на расстоянии a от его центра закреплен магнитный диполь $\boldsymbol{P_m}$, ориентированный вверх. Кольцо находится в равновесии. Найти массу кольца.

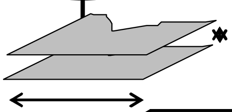


5.3. Магнитный момент протона равен $1{,}4\cdot10^{-26}$ Дж/Тл. Определить энергию магнитного момента протона в поле движущегося электрона задачи 4.3, если момент протона ориентирован вдоль поля. Какую долю составляет эта энергия от кинетической энергии электрона?

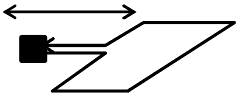
5.4. Тор из магнетика с магнитной проницаемостью μ находится в поле длинного провода, по которому течет ток I. Найти магнитную индукцию внутри магнетика как функцию расстояния от провода.



5.5. Вычислить индуктивность единицы длины двухпроводной ленточной линии. Расстояние между лентами $h \ll b$, где b – ширина лент.



5.6. Рамка с площадью S находится в магнитном поле, перпендикулярном рамке, индукция которого меняется по закону $\boldsymbol{B}(t)=\boldsymbol{B}_o\exp(-t/\tau)$. Сколько энергии выделится в сопротивлении R за бесконечный промежуток времени от момента $t = 0$?



Срок выполнения задания 2 недели.

Часть 6

Электромагнитное поле, интерференция, дифракция

Вопросы к коллоквиуму

1. Волновое уравнение для электромагнитного поля.
2. Плотность потока энергии в электромагнитной волне.
3. Интерференция света от двух точечных когерентных источников.
4. Максимальный порядок интерференции.
5. Дифракционная расходимость параллельных пучков света.

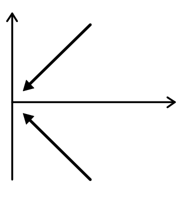
6.1. Найти амплитуду колебания, возникшего в результате сложения следующих трех колебаний:

$A_1 = a\cos\omega t$; $A_2 = 2a\sin(\omega t+\pi/4)$; $A_3 = 1{,}5a\cos(\omega t - \pi/3)$.

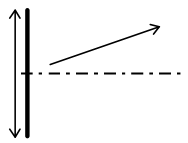
Воспользоваться сложением векторов на комплексной плоскости.

6.2. Лазер на углекислом газе дает пучок инфракрасного излучения с длиной волны 10,6 мкм. Диаметр пучка 1 см, мощность 20 Вт. Определить амплитуды электрического и магнитного полей в пучке.

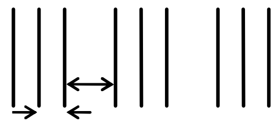
6.3. Две плоские электромагнитные волны распространяются в вакууме в направлениях, показанных на рисунке, и имеют частоту ω. Электрические поля волн перпендикулярны плоскости XY и имеют амплитуду E. Найти зависимость электрического поля от времени в точке $(0, y)$, если в начале координат оно равно нулю.



6.4. Антенна излучает когерентные волны с длиной волны λ во всех направлениях. Найти закон изменения интенсивности I излучения вдали от антенны при изменении угла φ. Длина антенны λ. Считать, что все точки антенны излучают волну в одной фазе. Построить график $I(\varphi)$.



6.5. Свет с длиной волны λ падает по нормали на пропускающую дифракционную решетку. Структура расположения штрихов на решетке приведена на рисунке. Число штрихов N велико. Найти зависимость интенсивности прошедшего излучения от угла отклонения.



6.6 Два спутника, сближающиеся с относительной скоростью v и движущиеся параллельно земле на высоте h, должны состыковаться над телескопом с диаметром объектива D, помощью которого ведется наблюдение за ними. Оба спутника зондируются монохроматическим светом с длиной волны λ. За какой интервал времени до истинной стыковки на Земле будет воспринято, что стыковка произошла?

Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Образцы вопросов для подготовки к экзамену

1 Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность (теорема Гаусса).

2. Дивергенция вектора напряженности электрического поля.
3. Потенциал электрического поля системы зарядов.
4. Уравнения Пуассона и Лапласа.
5. Электростатическая энергия системы распределенных зарядов. Плотность энергии электрического поля.
6. Граничные условия на поверхности проводника.
7. Емкость проводника. Емкость плоского конденсатора. Энергия плоского конденсатора.
8. Потенциал диполя. Поле диполя. Потенциальная энергия взаимодействия диполя с полем.
9. Вектор поляризации. Его связь со средним полем. Поляризуемость. Связанные заряды. Связь поверхностных связанных зарядов с вектором поляризации. Диэлектрическая постоянная.
10. Вектор электростатической индукции, его связь с вектором поляризации. Теорема Гаусса для диэлектриков.
11. Граничные условия для векторов ***E*** и ***D*** в диэлектриках. Уравнение Пуассона.
12. Энергия системы электрических зарядов в диэлектрике.
13. Закон Био – Савара.
14. Магнитная индукция прямого и кругового тока (на оси).
15. Дивергенция и ротор вектора магнитной индукции.
16. Векторный потенциал (определение, принцип расчета). Связь векторного потенциала и вектора индукции магнитного поля. Расчет поля прямого тока через векторный потенциал.
17. Сила Лоренца. Сила, действующая на проводник с током (закон Ампера).
18. Магнитный момент и магнитное поле контура с током.
19. Сила и момент сил, действующие на магнитный момент во внешнем магнитном поле. Потенциальная энергия магнитного момента в поле.

20. Токи намагничивания. Вектор намагниченности. Векторы $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{H}$, соотношение между ними. Уравнения магнитостатики в веществе. Граничные условия на векторы $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{H}$.

21. Электромагнитная индукция. Закон Фарадея, $rot\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$, и его интерпретация.

22. Коэффициенты взаимной и самоиндукции. Индуктивность.

23. Энергия магнитного поля.

24. Волновое уравнение для электромагнитного поля.

25. Плотность потока энергии в электромагнитной волне.

26. Интерференция света от двух точечных когерентных источников.

27. Максимальный порядок интерференции.

28. Дифракционная расходимость параллельных пучков света.

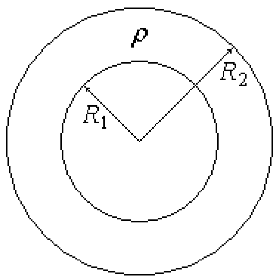
Примеры задач на контрольных работах и экзаменах

Первая контрольная работа

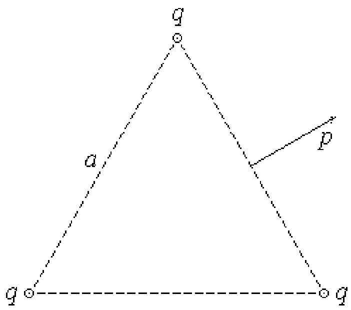
1. (100 б.) Плотность электрического заряда зависит от расстояния до начала координат по закону:

$$\rho(r) = \begin{cases} 0, & r < R_1 \cup r > R_2 \\ \alpha / r^3, & R_1 \le r \le R_2 \end{cases},$$

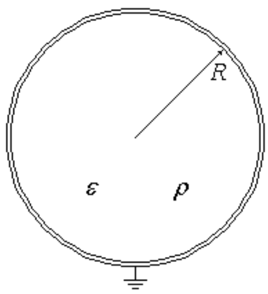
где α – константа. Найти напряженность поля во всем пространстве.



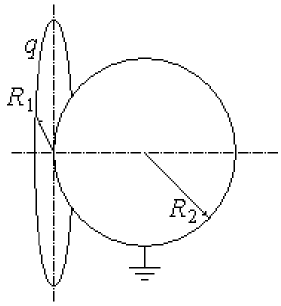
2. (120 б.) В вершинах правильного треугольника со стороной a расположены три одинаковых заряда q каждый. В точке на середине одной из сторон треугольника находится диполь p, направленный наружу перпендикулярно стороне. Какую работу надо совершить, чтобы перенести диполь в центр треугольника?



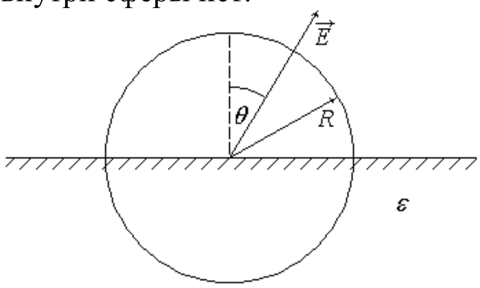
3. (150 б.) Равномерно заряженный шар радиусом R с диэлектрической проницаемостью ε и объемной плотностью заряда ρ окружен заземленной металлической сферой того же радиуса. Найти электростатическую энергию системы.



4. (150 б.) Кольцо радиусом R_1 несет заряд q. Проводящая заземленная сфера радиусом R_2 расположена так, что ее центр находится на оси кольца на расстоянии R_2 от его плоскости. Найти заряд на сфере.

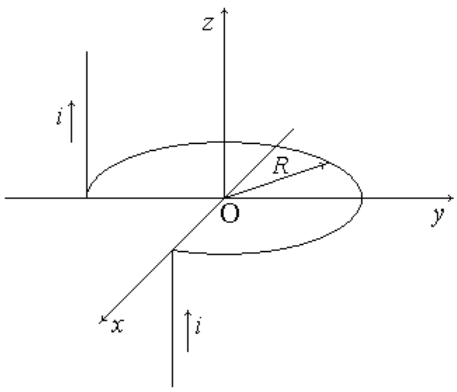


5. (180 б) Электрическое поле $\vec{E}$ выходит из диэлектрика, имеющего плоскую границу, под углом θ к нормали. Найти поток вектора $\vec{E}$ через поверхность сферы радиуса R, наполовину «погруженный» в диэлектрик. Диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна ε, свободных зарядов внутри сферы нет.

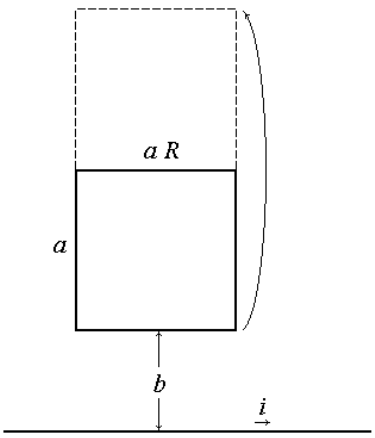


Вторая контрольная работа

1. (100) Длинный тонкий проводник изогнут, как показано на рисунке. Виток представляет собой три четверти окружности радиуса R. По проводнику течет ток i. Найти модуль вектора индукции магнитного поля в начале координат.

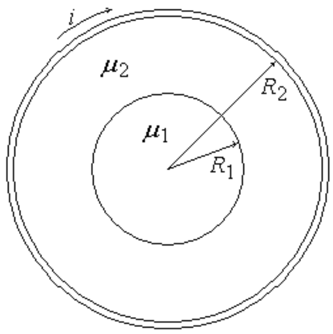


2. (120) Очень длинный тонкий провод с током i и квадратный контур из тонкого проводника со стороной a располагаются в одной плоскости, как показано на рисунке.

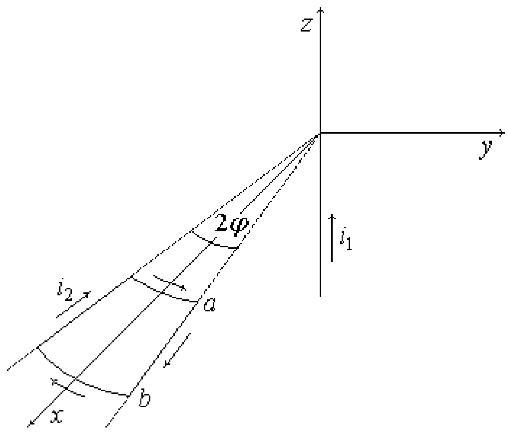


Расстояние от провода до ближайшей стороны контура равно b. Сопротивление контура равно R. Контур поворачивают вокруг дальней от провода стороны на 180º. Какой заряд протечет по контуру?

3. (150) Длинный цилиндрический однородный соленоид заполнен двумя магнетиками, как показано на рисунке. По обмотке соленоида течет ток силой i. Число витков в обмотке на единицу длины равно n. Магнитная проницаемость внутреннего магнетика равна μ_1, внешнего – μ_2. Радиус внутреннего цилиндра равен R_1, внешнего цилиндра – R_2. Найти плотность поверхностных молекулярных токов в магнетиках.

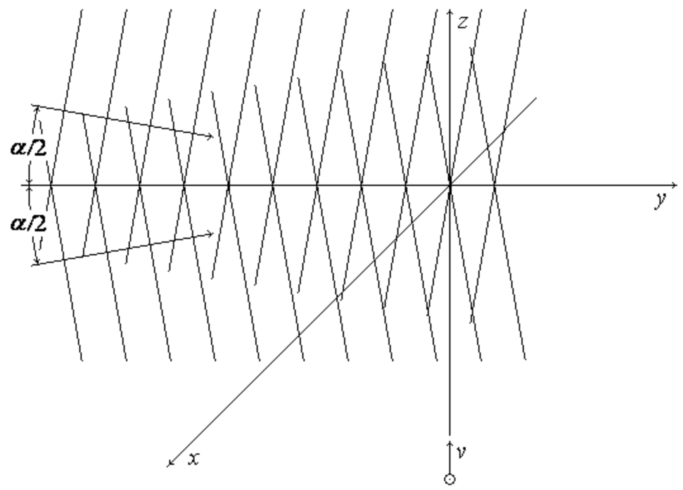


4. (150) По длинному тонкому проводу течет ток i_1.



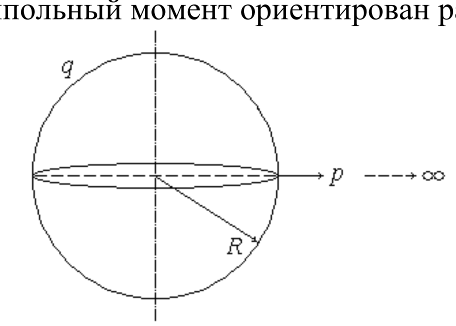
В перпендикулярной к нему плоскости располагается рамка с током i_2, как показано на рисунке. Рамка представляет собой две дуги окружности с радиусами a и b ($a < b$), соединенные прямыми отрезками. Дуги имеют общий центр, располагающийся на проводе. Угол между прямыми отрезками равен 2φ. Найти момент сил, действующий на рамку.

5. (180) Две распространяющиеся в вакууме когерентные плоские световые волны пересекаются под малым углом α, как показано на рисунке. Плоскости поляризации волн совпадают. Длина волны света равна λ. Малая частица, диаметр которой близок к длине волны света, летит вдоль оси z. Рассеянный частицей свет попадает в объектив приемника. Какова скорость частицы, если приемник зарегистрировал изменение интенсивности рассеянного частицей света с периодом T?



Экзамен 1

1. (120 б.) Найти работу по перемещению точечного электрического диполя с дипольным моментом p с поверхности равномерно заряженной сферы на бесконечность. Радиус сферы R, заряд q. Дипольный момент ориентирован радиально.



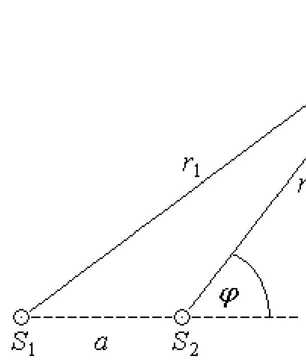
2. (160 б.) Кольцо ABCD состоит из двух металлических полуколец радиусом a, при этом диаметр сечения провода нижнего полукольца ADC в два раза больше, чем верхнего полукольца ABC. Ток в прямых участках равен i. В точках A и C все провода спаяны. Найти величину магнитной индукции в центре кольца (точка O на рисунке).

3. (190 б.) Имеется заряженный сферический слой с объемной плотностью заряда

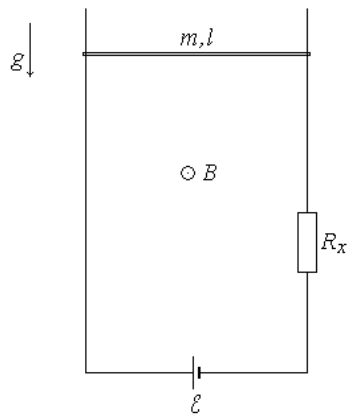
$$\rho(r) = \frac{\alpha}{r},$$

где α – константа. Внутренний и наружный радиусы слоя равны соответственно R_1 и R_2. Найти напряженность и потенциал электрического слоя во всем пространстве.

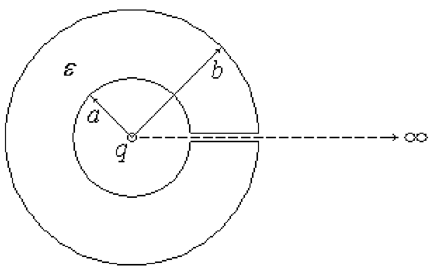
4. (190 б.) Два точечных источника S_1 и S_2 испускают излучение одинаковой амплитуды с длиной волны λ. Источники находятся на расстоянии $a = \lambda/4$ друг от друга. Найти суммарную интенсивность излучения I на расстояниях $r >> \lambda$, если волна от источника S_2 в самом начале сдвинута по фазе на $\pi/2$. Построить кривую $I(\varphi)$, рассматривая интенсивность I и угол φ как полярные координаты. Волны одинаково поляризованы.



5. (220 б.) Горизонтально расположенный проводящий стержень, масса которого m и длина l, может скользить без трения и без нарушения электрического контакта по двум вертикальным проводящим шинам в поле тяжести. Снизу концы шин соединены с источником э.д.с. величины ε. Перпендикулярно плоскости, в которой расположены шины, направлено магнитное поле с индукцией B. Найти отношение сопротивлений R_1 и R_2 для случаев движения стержня с одинаковыми по величине установившимися скоростями v в противоположных направлениях (вверх и вниз соответственно). Самоиндукцией, сопротивлением подводящих проводов, шин, подвижного стержня и источника э.д.с. пренебречь.



6. (220 б.) Точечный заряд q находится в центре сферического незаряженного слоя из диэлектрика с проницаемостью ε.

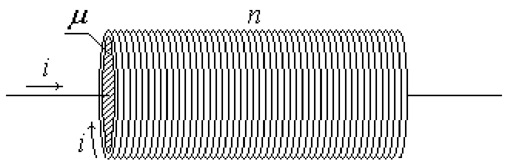


Внутренний и внешний радиусы слоя равны соответственно a и b. В слое имеется малое отверстие. Какую работу необходимо совершить, чтобы медленно перенести заряд через отверстие на бесконечность?

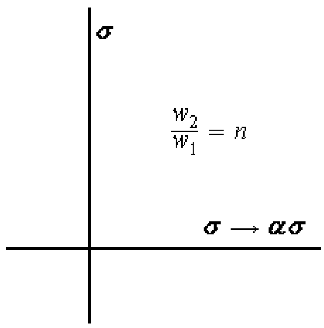
Экзамен 2

1. (120 б.) Две пересекающиеся под прямым углом бесконечные плоскости, заряженные равномерно с плотностями заряда σ и $-\sigma$, делят пространство на четыре области. Найти величину и направление вектора напряженности электрического поля в каждой из областей.

2. (160 б.) Прямой длинный тонкий провод, по которому течет ток силой i, окружен цилиндрическим однородным магнетиком с магнитной проницаемостью μ. На внешнюю поверхность цилиндра намотана обмотка, по которой течет ток также силой i. Количество витков, которое приходится на единицу длины цилиндра, равно n. Найти величину индукции магнитного поля во всем пространстве.



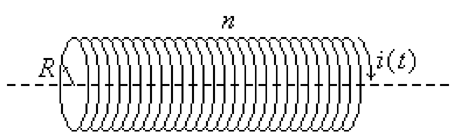
3. (180 б.) Две пересекающиеся под прямым углом бесконечные плоскости заряжены равномерно с поверхностной плотностью заряда σ. Во сколько раз нужно увеличить плотность заряда на одной из плоскостей, чтобы объемная плотность энергии в пространстве возросла в n раз?



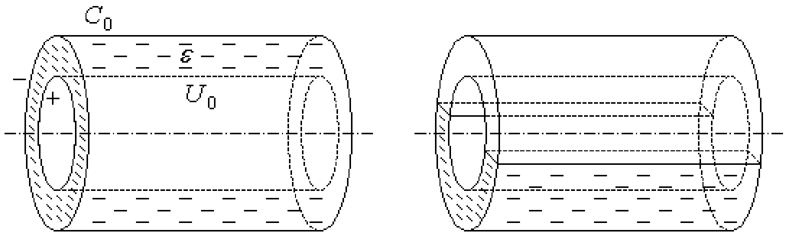
4. (200 б.) По обмотке длинного соленоида с радиусом сечения R и числом витков на единицу длины n течет переменный ток

$$i(t) = i_0 \sin \omega t.$$

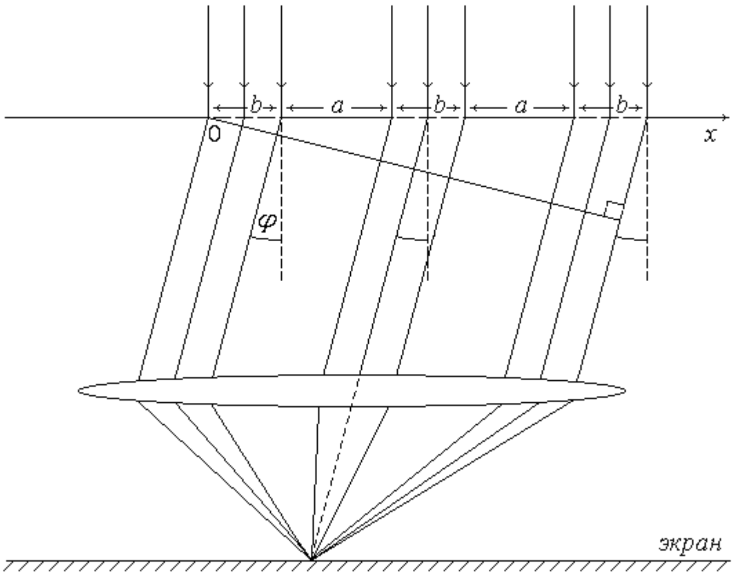
Найти напряженность электрического поля во всем пространстве как функцию времени и расстояния до оси соленоида r.



5. (210 б.) Цилиндрический конденсатор, наполненный жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε, зарядили до разности потенциалов U_0. После отключения конденсатора от источника э.д.с. половина жидкости из конденсатора вытекла. Как при этом изменится энергия конденсатора, если его первоначальная емкость была равна C_0? Конденсатор расположен горизонтально. Краевыми эффектами пренебречь.



6. (230 б.) Рассмотреть дифракцию плоской монохроматической волны



на трех параллельных щелях шириной b каждая с расстоянием между щелями $a = d - b$. Излучение падает на плоскость щелей по нормали. Длина волны λ. Найти угловое распределение интенсивности излучения. Найти положение дифракционных минимумов.

Экзамен 3

1. (25 б.) Шар радиусом R заряжен с плотностью заряда $\rho(r) = kr$, где k – константа, r – расстояние до центра шара. Найти напряженность электрического поля и потенциал во всем пространстве.

2. (25 б.) Может ли магнитная индукция в вакууме зависеть от координат следующим образом:

$$\text{а) } \vec{B}(x,y,z) = \alpha(x\vec{i} + 2y\vec{j} + 8z\vec{k}); \text{ б) } \vec{B}(x,y,z) = \alpha(x\vec{i} + 2y\vec{j} - 3z\vec{k})?$$

Здесь α – константа, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты декартовой системы координат. Если может, то рассчитать распределение плотности тока в пространстве.

3. (25 б.) Однородный проводящий стержень массой m и длиной l висит в поле тяжести, касаясь кольцевого электрода. В пространстве создали однородное магнитное поле с индукцией B, перпендикулярной плоскости вращения стержня. По стержню пропустили ток силой i. На какой угол φ стержень отклонится?

4. (25 б.) Две плоские поляризованные в одной плоскости монохроматические волны с длиной волны λ, угол между направлениями распространения которых $\varphi << 1$, падают почти нормально на экран. Показать, что на экране расстояние между соседними интерференционными максимумами $\Delta = \lambda/\varphi$.

2-й курс, IV семестр (Квантовая механика)

Задание 1.

Соотношение неопределенности. Волновая функция. Операторы, собственные функции, собственные значения

Вопросы к коллоквиуму

1. Волновая функция в квантовой механике, ее нормировка. Представление физических величин в квантовой механике. Операторы координаты, импульса, полной энергии (гамильтониан).
2. Вывод соотношения неопределенности.
3. Собственная функция и собственное значение оператора. Их физический смысл. Почему операторы физических величин эрмитовы?

Задачи

1. Найти длину волны де Бройля и кинетическую энергию электронов, падающих нормально на диафрагму с двумя щелями, если на экране, отстоящем от диафрагмы на $l = 75$ см, расстояние между соседними интерференционными максимумами $\Delta x = 7{,}5$ мкм. Расстояние между щелями $d = 25$ мкм.
2. Исходя из соотношения неопределенности, оценить минимально возможную энергию следующих систем:

   а) частицы массы m, движущейся в потенциальном поле $U(x) = \frac{1}{2}kx^2$;

   б) электронов в атоме гелия.

3. Волновая функция частицы в сферических координатах имеет вид

$$\psi(r,\theta,\varphi) = \begin{cases} C\dfrac{\sin kr}{r}, & r \le \pi/k, \\ 0, & r > \pi/k. \end{cases}$$

Найти нормировочную константу C.

4. Волновая функция $\psi(x)$ задана следующим образом:

$$\psi(x) = \begin{cases} 2\cos x, & -\pi/2 \le x \le 2, \\ 2\sin x, & \pi \le x \le 2\pi, \\ 0, & \text{при всех прочих значениях } x. \end{cases}$$

Нормировать функцию, построить ее график.

5. Эрмитовы операторы $\hat{A}$ и $\hat{B}$ не коммутируют друг с другом. Доказать, что оператор $\left[\hat{A},\hat{B}\right]$ — неэрмитов, а операторы $i\left[\hat{A},\hat{B}\right]$ и $\left[\hat{A},\hat{B}\right]+\left[\hat{B},\hat{A}\right]$ — эрмитовы.
6. Найти вид оператора $\hat{A}^2$, если оператор $\hat{A}$ равен:

$$а)\ 1+\frac{d}{dx},\quad б)\ x+\frac{d}{dx},\quad в)\ \frac{1}{x}\frac{d}{dx},\quad г)\ \frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}.$$

7. Найти собственные функции оператора $x+\dfrac{d}{dx}$.
8. Найти собственные функции и собственные значения операторов:

   а) $-i\dfrac{d}{dx}$, если $\psi(x)=\psi(x+a)$, где a – постоянная;

   б) $-\dfrac{d^2}{dx^2}$, если $\psi(x) = 0$ при $x<0$ и $x>l$.

9. Найти вид $\left[\hat{C}, \hat{A}^2\right]$, если $\left[\hat{C}, \hat{A}\right] = \lambda \hat{A}$.

Срок для выполнения задания – 3 недели.

Задание 2

Физический смысл собственных значений оператора. Решение стационарного уравнения Шредингера и его приложения

Вопросы к коллоквиуму

1. Ортогональность волновых функций, соответствующих разным собственным значениям физического оператора. Волновая функция системы невзаимодействующих частиц.
2. Уравнение Шредингера (без вывода). Стационарные состояния. Стационарное уравнение Шредингера. Разложение общего решения уравнения Шредингера по стационарным волновым функциям.
3. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Стационарные волновые функции, их ортогональность. Уровни энергии.
4. Частица в трехмерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Стационарные волновые функции. Уровни энергии. Вырождение.
5. Отражение и прохождение через потенциальные барьеры: ступеньку, прямоугольный барьер.
6. Гармонический осциллятор. Стационарные волновые функции.
7. Ортогональность волновых функций гармонического осциллятора. Уровни энергии гармонического осциллятора.

Задачи

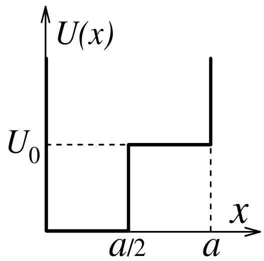
1. Найти среднюю кинетическую энергию частицы массой m в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками $(0 \le x \le l)$, если частица находится в состояниях, описываемыми волновыми функциями:

   а) $\psi(x) = A\sin^2(\pi x / l)$; б) $\psi(x) = Ax(l - x)$.
2. Вычислить $\left\langle (\Delta x)^2 \right\rangle$ и $\left\langle (\Delta p)^2 \right\rangle$, а также их произведение для частицы массы m в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками $(0 < x < l)$.
3. Линейный осциллятор массы m частоты ω в момент времени $t = 0$ находился в состоянии $\psi(x) = A(\xi\psi_1 + \psi_3)$, где ψ_1 и ψ_3 – стационарные состояния с $n = 1$ и n = 3, а $\xi = \sqrt{m\omega / \hbar}$. Найти зависимость от времени средней энергии и средней координаты осциллятора.
4. В одномерном потенциальном поле $U(x)$, таком, что $U(x) = 0$ при $x = \infty$, находится частица в стационарном состоянии, описываемом волновой функцией $\psi(x) = Axe^{-\alpha x}$ при $x \ge 0$ и $\psi = 0$ при $x < 0$. Найти вид функции $U(x)$, энергию частицы и константу A.
5. В двумерной потенциальной яме $U(x, y) = U(x) + U(y)$, где $U(x) = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2$, $U(y) = 0$ при $0 \le y \le a$, $U(y) = \infty$ при $y < 0$ и $y > a$, $a = \pi\sqrt{\hbar / m\omega}$, находится частица в состоянии, описываемом волновой функцией $\psi(x, y) = [2\psi_2(x) + \psi_6(x)][\varphi_1(y) + 2\varphi_3(y)]$, где $\psi_i(x)$ и $\varphi_j(y)$ – волновые функции стационарных состояний для одномерного движения вдоль осей x и y соответственно. Найти вероятности получения при измерении энергии значений $\hbar\omega$, $3\hbar\omega$, $7\hbar\omega$.
6. Состояние частицы описывается волновой функцией

$$\psi(x)=\exp\left(-\frac{x^2}{a^2}+ikx\right).$$

а) Нормировать волновую функцию;
б) Найти среднее значение координаты;
в) Найти среднее значение импульса;
г) Имеют ли координата и импульс определенные значения в этом состоянии;
д) Найти неопределенность координаты и импульса в этом состоянии;
е) Проверить соотношение неопределенности.

7. В показанной на рисунке потенциальной яме с бесконечно высокими стенками $U_0=\dfrac{4\pi^2\hbar^2}{ma}$ находится частица массой m. Ее состояние описывается волновой функцией



$$\psi(x)=\begin{cases}A\sin(3\pi x/a), & \text{при } 0\le x\le a/2,\\ -A\sin(\pi x/a), & \text{при } a/2<x\le a.\end{cases}$$

Нормировать волновую функцию и нарисовать ее график. Найти значение энергии частицы. Какова вероятность найти частицу при $0\le x\le a/3$?

Срок для выполнения задания – 2 недели.

Задание 3

Теория возмущений

Вопросы к коллоквиуму.

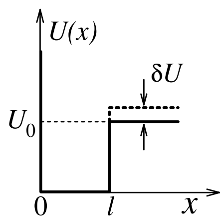
1. Получить выражения для поправок первого порядка к волновым функциям невырожденных состояний при стационарном возмущении.
2. Поправки первого и второго порядков к энергии невырожденного состояния при стационарном возмущении.
3. Условие применимости стационарной теории возмущений.
4. Вероятности переходов под действием возмущения конечной длительности.
5. «Правильные» волновые функции и соответствующие им значения энергии в стационарной теории возмущений при наличии вырождения.

Задачи

1. Во втором порядке теории возмущений найти энергию основного состояния частицы массой m в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками $(0<x<l)$ при наличии возмущения $\hat{V}=\alpha\cos(3\pi x/l)$. При каком значении α применима теория возмущений?

2. В «полубесконечной» прямоугольной потенциальной яме

$$U(x)=\begin{cases}\infty, & x<0,\\ 0, & 0\le x\le l,\\ U_0, & x>l,\end{cases}$$



где $l=\dfrac{3\pi\hbar}{4\sqrt{mU_0}}$, существует стационарное состояние частицы массой m с энергией $E=U_0/2$. Определить явный вид нормированной волновой функции этого состояния. В первом порядке теории возмущений определить изменение энергии при увеличении высоты правой стенки ямы на δU.

3. Система двух одинаковых связанных осцилляторов, массы m каждый, описывается гамильтонианом

$$\hat{H}(x,y)=\frac{\hat{p}_x^2}{2m}+\frac{\hat{p}_y^2}{2m}+\frac{m\omega^2(x^2+y^2)}{2}+\alpha x y.$$

Рассматривая последнее слагаемое как возмущение, найти во втором порядке теории возмущений энергию основного состояния системы. Эта задача допускает и точное решение. Найти его и сравнить с приближенным.

4. Гармонический осциллятор массы m находился в основном состоянии, когда потенциал, в котором он находился, мгновенно изменил свой вид: был $U(x)=\frac{m\omega^2x^2}{2}$, стал $U(x)=\frac{m\omega^2(x-d)^2}{2}$. Найти вероятность обнаружения осциллятора в возбужденном состоянии после такого изменения потенциала.

5. На гармонический осциллятор массы m, находящийся при $t=-\infty$ в стационарном состоянии с энергией $5\hbar\omega/2$, действует возмущение $\hat{V}(x,t)=ax\exp(-|t|/\tau)$, где a и τ – постоянные. В первом порядке теории возмущений найти вероятности обнаружения осциллятора при $t=+\infty$ в различных стационарных состояниях.

Срок для выполнения задания – 3 недели.

Задание 4

Матричная механика и теория представлений

Вопросы к коллоквиуму

1. Вектор состояния и волновая функция.
2. Матрица оператора физической величины. Смысл собственных векторов и собственных значения этой матрицы.
3. Преобразование волновых функций и операторов при переходе от одного представления к другому.
4. Дискретный и непрерывный базисы. Сходства и различия.

Задачи

1. В некотором представлении оператор физической величины f и гамильтониан имеют вид:

$$\hat{f}=\begin{pmatrix}3 & 0 & \sqrt{8}\\ 0 & 1 & 0\\ \sqrt{8} & 0 & 1\end{pmatrix},\quad \hat{H}=\begin{pmatrix}0 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 0\end{pmatrix}.$$

Система находится в состоянии, в котором вероятность обнаружить определенные значения физической величины $f_1>f_2>f_3$ равны 2/3, 0 и 1/3 соответственно. Чему равно среднее значение энергии? Однозначен ли ответ на этот вопрос? Могут ли величина f и энергия одновременно иметь определенные значения?

2. В базисе $|1\rangle, |2\rangle$ операторы невозмущенного гамильтониана $\hat{H}_0$ и стационарного возмущения $\hat{V}$ имеют вид

$$\hat{H}=\begin{pmatrix}3 & 0\\ 0 & 2\end{pmatrix},\quad \hat{V}=\begin{pmatrix}-0{,}4 & 0{,}2\\ 0{,}2 & 0{,}3\end{pmatrix}.$$

Найти значения энергии во втором порядке теории возмущений. Сравнить с точными значениями.

3. В x- и p-представлениях записать коммутатор операторов кинетической и потенциальной энергии частицы массы m с зарядом q, находящейся в однородном электрическом поле напряженности E.

4. Гармонический осциллятор массы m частоты ω находится в состоянии, описываемом волновой функцией $\psi(x)=C\left(x^2-\frac{\hbar}{m\omega}\right)\psi_3(x)$, где $\psi_3(x)$ – собственная функция осциллятора с $n = 3$. Выразить волновую функцию в E-представлении. Нормировать ее.

5.Собственные функции и собственные значения невозмущенного гамильтониана равны ψ_1, ψ_2, ψ_3 и $2E_0, E_0, E_0$ соответственно. Оператор возмущения в E-представлении имеет вид:

$$\hat{V}=\begin{pmatrix} b & 0 & ia \\ 0 & 0 & ia \\ -ia & -ia & 0 \end{pmatrix},$$

где a и b – действительные константы. В первом порядке теории возмущений найти «правильные» волновые функции и соответствующие им значения энергии.

6. На двухуровневую систему, гамильтониан которой в энергетическом представлении имеет вид

$$\hat{H}=\begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix},$$

действует возмущение $\hat{V}(t)=e^{-(t/\tau)^2}\begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{pmatrix}$,

где τ— постоянная, t – время. Найти вероятность перехода с первого уровня на второй при $t=+\infty$, если возмущение начало действовать в момент времени $t=-\infty$.

Срок для выполнения задания – 2 недели.

Задание 5

Квантовый момент импульса. Атом водорода

Вопросы к коллоквиуму

1. Операторы проекций момента импульса и квадрата момента. Коммутационные соотношения. Трактовка закона сохранения момента импульса в квантовой механике.
2. Повышающий и понижающий операторы, коммутационные соотношения для них.
3. Матричные элементы операторов $\hat{L}^2, \hat{L}_z, \hat{L}_x, \hat{L}_+, \hat{L}_-$ для момента $L = 2$.

Задачи

1. Найти собственное значение оператора квадрата момента, соответствующее его собственной функции $\psi(\theta,\varphi)=\cos\theta+\cos(\theta+\varphi)-\cos(\theta-\varphi)$.

2. Атом водорода находится в возмущающем потенциале $\hat{V}=kr$, где k - константа, r- расстояние до ядра. В первом порядке теории возмущений вычислить смещение уровней с $n = 2$. Указать, по какому квантовому числу снимается вырождение.

3. В первом порядке теории возмущений вычислить смещение уровней энергии атома водорода с $n = 2$, $l = 1$ для возмущения, оператор которого имеет вид $\hat{V}=\alpha(\hat{L}_x+\hat{L}_y)$.

4. Электрон в атоме водорода находится в состоянии, описываемом волновой функцией $\psi(r,\theta,\varphi)=A\exp(-r/2a_Б)$, где A – постоянная, $a_Б$ - радиус Бора. Найти вероятность того, что при измерении энергии в этом состоянии будет получено значение, равное энергии первого возбужденного состояния атома водорода.

Срок для выполнения задания – 1 неделя.

Задание 6

Спин. Сложение моментов

Вопросы к коллоквиуму

1. Исходя из коммутационных соотношений между операторами проекции спина, найти матрицу оператора $\hat{S}_z$ для спина 1/2.
2. Триплетное и синглетное состояния системы из двух спинов по 1/2.
3. Правила сложения двух моментов.
4. Использование повышающего и понижающего операторов для решения задачи о сложении моментов.

Задачи

1. Спин 1/2 в магнитном поле с индукцией $\vec{B}=(0, 0, B_0)$ имеет проекцию на ось z, равную 1/2. Магнитное поле мгновенно поворачивают в плоскости x-z на угол 30º. Найти среднюю энергию спина после поворота, а также вероятность того, что измерение проекции спина на новое направление магнитного поля даст значение 1/2. Гамильтониан спина в магнитном поле $\hat{H}=-\gamma\hbar\left(\vec{B}\hat{\vec{S}}\right)$, где γ – постоянная.
2. Имеется система из трех спинов $S_1=S_2=S_3=1.$ Найти значения суммарного спина. Указать, сколько состояний имеют проекцию суммарного спина на ось z, равную 2.
3. Система из двух спинов $S_1=S_2=1/2$ находится в состоянии, описываемом как следующая комбинация синглетного и триплетного состояний $A(2\left|T_0\right\rangle+\left|S\right\rangle)$, где $\left|S\right\rangle$ – синглетное состояние, $\left|T_0\right\rangle$ – триплетное состояние с проекцией момента на ось z, равной нулю. Найти коэффициент A. Найти вероятности возможных значений S_{1z} и S_{2z} в этом состоянии, а также средние значения этих проекций.
4. Два невзаимодействующих спина $S_1=3/2$ и $S_2=5/2$ находятся в таком состоянии, что их проекции на ось z равны $S_{1z}=1/2$ и $S_{2z}=3/2$. Найти разложение этого состояния по состояниям с определенными значениями полного момента и его проекции на ось z. Найти среднее значение квадрата полного момента спиновой системы.

Срок для выполнения задания – 2 недели.

Образцы вопросов для подготовки к экзамену

Волновая функция в квантовой механике, ее нормировка. Представление физических величин в квантовой механике. Операторы координаты, импульса, полной энергии (гамильтониан).

1. Строгий вывод соотношения неопределенности.
2. Собственная функция и собственное значение оператора. Их физический смысл. Почему операторы физических величин эрмитовы?
3. Ортогональность волновых функций, соответствующих разным собственным значениям физического оператора. Волновая функция системы невзаимодействующих частиц.
4. Уравнение Шредингера (без вывода). Стационарные состояния. Стационарное уравнение Шредингера. Разложение общего решения уравнения Шредингера по стационарным волновым функциям.

5. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Стационарные волновые функции, их ортогональность. Уровни энергии.

7. Частица в трехмерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Стационарные волновые функции. Уровни энергии. Вырождение.

8. Отражение и прохождение через потенциальные барьеры: ступеньку, прямоугольный барьер.

9. Гармонический осциллятор. Стационарные волновые функции.

10. Ортогональность волновых функций гармонического осциллятора. Уровни энергии гармонического осциллятора.

11. Получить выражения для поправок первого порядка к волновым функциям невырожденных состояний при стационарном возмущении.

12. Поправки первого и второго порядков к энергии невырожденного состояния при стационарном возмущении.

13. Условие применимости стационарной теории возмущений.

14. Вероятности переходов под действием возмущения конечной длительности.

15. «Правильные» волновые функции и соответствующие им значения энергии в стационарной теории возмущений при наличии вырождения.

16. Вектор состояния и волновая функция.

17. Матрица оператора физической величины. Смысл собственных векторов и собственных значения этой матрицы.

18. Преобразование волновых функций и операторов при переходе от одного представления к другому.

19. Дискретный и непрерывный базисы. Сходства и различия.

20. Операторы проекций момента импульса и квадрата момента. Коммутационные соотношения. Трактовка закона сохранения момента импульса в квантовой механике.

21. Повышающий и понижающий операторы, коммутационные соотношения для них.

22. Матричные элементы операторов $\hat{L}^2, \hat{L}_z, \hat{L}_x, \hat{L}_+, \hat{L}_-$ для момента $L = 2$.

23. Исходя из коммутационных соотношений между операторами проекции спина, найти матрицу оператора $\hat{S}_z$ для спина 1/2.

24. Триплетное и синглетное состояния системы из двух спинов по 1/2.

25. Правила сложения двух моментов.

26. Использование повышающего и понижающего операторов для решения задачи о сложении моментов.

Примеры задач на контрольных работах и экзаменах

Первая контрольная работа

1. (100 б.) Частица находится в состоянии, описываемом волновой функцией

$$\psi(x) = \begin{cases} Ce^{x/a}, & x \le 0, \\ Ce^{-x/b}, & x > 0, \end{cases}$$

где $b > 0$ и $a > 0$ – известные константы. Найдите среднюю координату частицы $\langle x \rangle$.

2. (120 б.) Докажите, что среднее значение $\langle xp_x + p_x x \rangle$ в любом состоянии является вещественной величиной.

3. (140 б.) На находящийся в основном состоянии линейный осциллятор массой m частотой ω с зарядом q на промежутке времени $\pi/2\omega \le t \le \pi/2\omega$ действует однородное электрическое поле

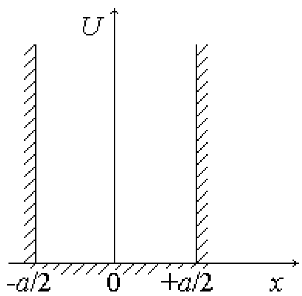
$$E = E_0 \cos \omega t,$$

направленное вдоль оси осциллятора. В какие состояния возможны переходы? Каковы вероятности этих переходов после выключении поля?

4. (160 б.) Частица массой m находится в одномерном потенциальном поле

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < -a/2, \\ -V_0 \cos\dfrac{2\pi x}{a}, & -a/2 \le x \le a/2, \\ \infty, & x > a/2, \end{cases}$$

где $V_0 > 0$ и $a > 0$ – известные константы.



Найдите с точностью до первого порядка теории возмущений волновую функцию основного состояния частицы и с точностью до второго порядка теории возмущений энергию этого состояния.

5. (180 б.) Частица массой m находится в прямоугольном ящике с бесконечно жесткими, непроницаемыми стенками. Найдите объем этого ящика, если известно, что семь первых уровней энергии равноотстоят друг от друга на величину ΔE. При этом первые три уровня являются невырожденными.

Вторая контрольная работа

1. (100 б.) Состояние частицы со спином 1/2 описывается в S^2, S_z –представлении волновой функцией

$$\psi = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Найдите средние значения $\langle S_x \rangle, \langle S_y \rangle, \langle S_z \rangle, \langle S^2 \rangle$.

2. (120 б.) В базисе $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$ гамильтониан системы имеет вид

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В момент времени $t = 0$ система находилась в состоянии $|1\rangle$. Найдите волновую функцию системы в произвольный момент времени $\psi(t)$ в этом представлении.

3. (140 б.) В L^2, L_z – -представлении волновая функция системы с моментом $l = 1$ имеет вид

$$\psi = \begin{pmatrix} e^{i\alpha} \\ 0 \\ e^{-i\alpha} \end{pmatrix},$$

где α – действительная постоянная. Как выглядит нормированная волновая функция в L^2, L_x – представлении? Чему равны $\langle L_z \rangle$ и $\langle L_x \rangle$?

4. (160 б.) В первом порядке теории возмущений найдите поправки к энергии для состояний атома водорода с главным квантовым числом $n = 2$. Оператор возмущения

$$\hat{V} = A\hat{L}_x,$$

где A – действительная константа. Выпишите «правильные» волновые функции.

5. (180 б.) Система с орбитальным моментом $l = 1$ и спином $s = 1/2$ находится в состоянии

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{5}}|1,0\rangle|1/2,1/2\rangle + \frac{2}{\sqrt{5}}|1,1\rangle|1/2,-1/2\rangle.$$

Какие значения суммарного момента системы и с какой вероятностью можно обнаружить в этом состоянии?

Экзамен

1. (120 б.) Частица находится в состоянии, описываемом волновой функцией

$$\psi(x) = C\begin{cases} \cos\dfrac{\pi x}{a}, & -a/2 \le x \le 0, \\ \cos\dfrac{\pi x}{b}, & 0 \le x \le b/2, \\ 0, & x < -a/2,\ x > b/2, \end{cases}$$

причем $a < b$. Какова вероятность обнаружить частицу в промежутке $-a/2 \le x \le a/2$?

2. (150 б.) В одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, расположенными в точках $x = 0$ и $x = a$, находится частица массой m. Состояние частицы описывается волновой функцией

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{3}}\psi_1 + \sqrt{\frac{2}{3}}\psi_2,$$

где ψ_1, ψ_2 – волновые функции стационарных состояний с квантовыми числами $n = 1$ и $n = 2$ соответственно. Найдите период и амплитуду колебаний среднего импульса частицы.

3. (170 б.) Имеется двумерный осциллятор массой m. Частоты колебаний осциллятора вдоль любых двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в плоскости колебаний, равны ω. На осциллятор действует возмущение $V(r) = \alpha/r$, α – известная константа, r – расстояние до точки минимума потенциальной энергии невозмущенного осциллятора. Найдите с точностью до первого порядка теории возмущений энергию основного состояния осциллятора.

4. (200 б.) Атом водорода находится в основном состоянии. В течение времени τ на него действует возмущение $V(r) = -\beta/r$, где β – известная положительная постоянная, r – расстояние до ядра атома. Найдите вероятность перехода в первое возбужденное состояние.

5. (220 б.) Две частицы со спинами $s_1 = s_2 = 1/2$ находятся в однородном магнитном поле с индукцией B. В момент времени $t = 0$ система находилась в синглетном состоянии. Гамильтониан взаимодействия первой частицы с полем

$$\hat{H}_1 = -\gamma_1 \hbar \vec{B} \cdot \hat{s}_1,$$

гамильтониан второй равен

$$\hat{H}_2 = -\gamma_2 \hbar \vec{B} \cdot \hat{s}_2,$$

где $\gamma_1 < \gamma_2$ – положительные постоянные. Спустя какое время система окажется в триплетном состоянии?

6. (240 б.) В некотором базисе гамильтониан невозмущенной системы и оператор возмущения имеют вид

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} E & \sqrt{3}E & 0 \\ \sqrt{3}E & 3E & 0 \\ 0 & 0 & -E \end{pmatrix}, \qquad \hat{V} = \begin{pmatrix} 0 & -V & 0 \\ -V & 0 & V \\ 0 & V & 0 \end{pmatrix}.$$

Найдите энергетические уровни системы во втором порядке теории возмущений.

Второй экзамен

1. (120 б.) Найдите среднюю координату частицы, состояние которой описывается волновой функцией

$$\psi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ xe^{-x/a}, & 0 \le x < \infty. \end{cases}$$

2. (150 б.) Два первых уровня энергии двумерного осциллятора массой m равны второму и третьему уровням энергии частицы массой m в одномерной прямоугольной яме шириной a с бесконечно высокими стенками. Выпишите гамильтониан осциллятора.

3. (170 б.) На осциллятор массой m с частотой ω действует возмущение

$$V(x) = \beta\delta(x - a),$$

где β – известная постоянная. При каких значениях a поправка первого порядка к энергии первого возбужденного состояния осциллятора будет максимальна? Чему она при этом равна?

4. (200 б.) Найдите среднее значение энергии кулоновского взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода, находящемся в состоянии с $n = 3$, $l = 2$.

5. (220 б.) Система, состоящая из трех слабо взаимодействующих частиц со спином 1/2, находится в состоянии с определенными значениями суммарного спина $s = 3/2$ и его проекции $s_z = 1/2$. С какой вероятностью подсистему, состоящую из двух первых частиц, можно обнаружить в триплетном состоянии $|T_0\rangle$?

6. (240 б.) В базисе состояний $|1\rangle, |2\rangle, |3\rangle$ гамильтониан системы имеет вид

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \sqrt{2} \\ 0 & 2 & 0 \\ \sqrt{2} & 0 & 2 \end{pmatrix}.$$

Найдите вид гамильтониана в энергетическом представлении. Какие значения энергии и с какими вероятностями можно обнаружить, если система находится в состоянии $|2\rangle$? Найдите среднее значение энергии в этом состоянии.

Третий экзамен

1. (100 б.) Волновая функция в полярных координатах задана следующим образом:

$$\psi(r, \varphi) = \begin{cases} C\exp(i\cos^3\varphi), & \text{если} \quad r < R_0 \quad \text{и} \quad 0 \le \varphi < \pi \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Найти средние значения $\bar{r}$ и $\bar{\varphi}$.

2. (100 б.) Найти собственные функции и собственные значения оператора

$$i\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\varphi},\ \text{если}\ \psi(\varphi)=\psi(\varphi+2\pi).$$

3. (100 б.) Осциллятор с частотой ω и массой m находится в состоянии

$$\psi(x)=C(\psi_1(x)+x\sqrt{m\omega/\hbar}\,\psi_3(x)).$$

Найти среднее значение энергии.

4. (100 б.) Имеется система из трех спинов $S_1 = S_2 = 1/2$ и $S_3 = 1$. Найти значения суммарного спина S. Сколько состояний имеют проекцию суммарного спина $S_z = 1$? Какие это состояния?

3-й курс, V семестр (Статистическая физика и термодинамика)

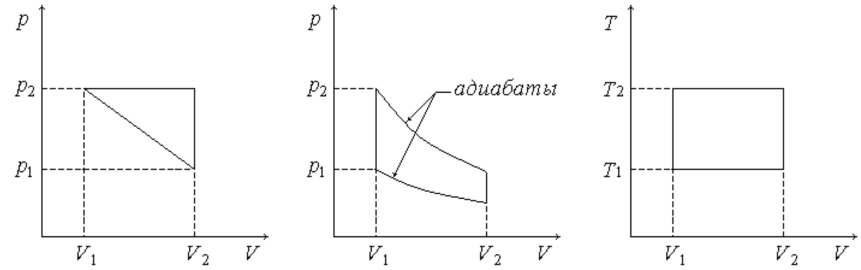
Задание 1.

Термодинамика

Вопросы к коллоквиуму.

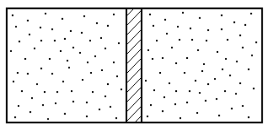
1. Первое начало термодинамики. Теплоемкость, ее зависимость от пути. C_P и C_V, их связь.
2. Уравнение равновесного адиабатического процесса для идеального газа. Свойства адиабаты и изотермы на PV-диаграмме.
3. Цикл Карно. Теорема Карно. Термодинамическое определение энтропии.
4. Основное термодинамическое равенство. Основное термодинамическое неравенство.
5. Связь между термическим и калорическим уравнениями состояния.
6. Общие условия термодинамического равновесия. Установление равновесия в изолированной системе. Установление равновесия при $T = const.$, $V = const.$, $N_i = const.$; при $T = const.$, $P = const.$, $N_i = const.$

1.1. Определить КПД циклов, изображенных на диаграммах, если рабочим телом является одноатомный идеальный газ.



1.2. Нагревается или охлаждается газ, если он расширяется по закону $pV^2 = const$? Найти теплоемкость процесса.

1.3. Найти частоту малых колебаний поршня в цилиндре с идеальным газом, считая процесс изотермическим. Указать качественно критерий изотермичности и квазиравновесности. В положении равновесия давления в правых и левых половинах и их объемы одинаковы и равны p и V.



1.4. Цилиндрический, горизонтально расположенный сосуд посередине перегорожен теплонепроницаемым подвижным поршнем. Слева и справа от поршня в сосуде находится по одному молю одного и того же идеального одноатомного газа. Начальная температура газа слева и справа равна T_0. Газ, находящийся слева, квазиравновесно нагрели. Найти установившиеся температуры в левой и правой частях сосуда и количество подведенного тепла, если объем газа в правой чати сосуда уменьшился в два раза.

1.5. Моль одноатомного идеального газа находится в цилиндрическом сосуде с подвижным поршнем. Начальные объем и давление газа равны V_0 и p_0. Газ адиабатически расширяется до объема V_1. Какое количество теплоты нужно сообщить газу, чтобы он нагрелся до начальной температуры, если последний процесс проводить при постоянном давлении. Найти конечный объем, занимаемый газом, и работу, которую он совершил.

1.6. Моль газа Ван-дер-Ваальса расширили в изотермических условиях от V_1 до V_2. Температура газа равна T. Найти: а) количество подведенного к газу тепла, б) изменение внутренней энергии, в) изменение энтальпии.

1.7. Учитывая соотношение $\left(\frac{\partial E}{\partial V}\right)_T = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V - p$, получить выражение для изменения энтропии 1 моля неидеального газа, подчиняющегося уравнению состояния $p(V\text{-}B) = RT$. Начальные объем и температура V_1 и T_1, конечные – V_2 и T_2. $C_V = a + bT$.

1.8. Сосуд объемом V_0, заполненный аргоном при температуре T_0 и давлении p_0, привели в тепловой контакт с медной пластиной, имеющей температуру T_1. Теплоемкость пластины равна C. Найти установившуюся температуру и изменение энтропии, если газ поддерживается при постоянном давлении. Система (сосуд + пластина) теплоизолирована, теплоемкостью сосуда и термическим расширением меди пренебречь.

Задание 2.

Распределение Максвелла

Вопросы к коллоквиуму.

1. Вывод распределения Максвелла.
2. Средние значения скорости V_x и $|V|$ в равновесном газе.
3. Средние значения квадрата скорости и кинетической энергии в равновесном газе.
4. Поток частиц. Давление и температура идеального газа.

2.1. Частицы массы m вылетают из точечного источника. Вероятность обнаружить частицу летящей со скоростью v под углом θ к оси z задается выражением:

$\mathrm{d}W(v,\theta)=A\exp(-mv^2/2kT)v^3\cos\theta\sin\theta\,\mathrm{d}v\,\mathrm{d}\theta$, где $0\le v\le\infty, 0\le\theta\le\pi/4$.

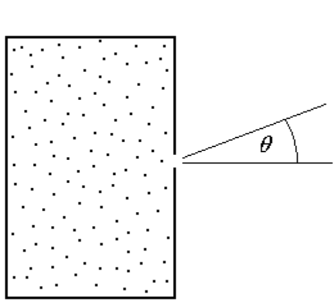
Найти: 1) нормировочный коэффициент A,

2) среднее значение $p^2=p_x^2+p_y^2$.

2.2. Пленки некоторых нерастворимых органических кислот и спиртов на воде можно моделировать идеальным двумерным газом. Написать распределение по скоростям в таком газе в декартовых и полярных координатах. Определить среднюю энергию одной молекулы.

2.3. Найти число молекул, соударяющихся со стенкой сосуда единичной площади за единицу времени в интервале углов $\theta \div \theta + \mathrm{d}\theta$.

2.4. При какой температуре число молекул азота, имеющих скорость в интервале 1000 м/с - 1010 м/с, максимально?



2.5. Сосуд объема V, в котором находится одноатомный газ при температуре T, помещен в вакуум. В стенке сосуда имеется маленькое отверстие площадью s. Определить:

1) среднюю кинетическую энергию вылетающих молекул,

2) закон изменения давления в сосуде, если газ поддерживается при постоянной температуре,

3) когда отверстие можно считать "маленьким"?

4) требуется ли подвод или отвод тепла для того, чтобы поддерживать газ при постоянной температуре?

2.6. В боковой стенке сосуда с идеальным газом (масса – m, концентрация – n, температура – T) имеется отверстие площади s, закрытое заслонкой. В момент времени t = 0 заслонку открывают на короткое время τ. Найти функцию распределения вылетевших частиц по x в момент времени $t >> \tau$. Как меняется со временем их средняя координата? x направлено от сосуда.

Задание 3.

Микроканонический ансамбль

Вопросы к коллоквиуму.

1. Теорема Лиувилля. Функция распределения микроканонического ансамбля.
2. Число микросостояний системы. Энтропия системы спинов с s = 1/2.
3. Энтропия и химический потенциал идеального газа.
4. Тепловое равновесие. Равенство температур частей системы, как следствие микроканонического распределения.
5. Основное термодинамическое равенство.

3.1. Определить и начертить фазовую траекторию для затухающего гармонического осциллятора.

3.2. Даны N спинов $S = 1$. Найти распределение спинов по их суммарной проекции на ось квантования. Рассмотреть случаи N = 1, 2, 3, 4. Найти энтропию системы.

3.3. Даны 2 осциллятора с частотами ω и суммарной энергией $4\hbar\omega$. Найти вероятность того, что вся энергия колебательного возбуждения сосредоточена на одном осцилляторе. Найти энтропию системы.

3.4. Частицы движутся в одномерном потенциальном ящике. Насколько изменится энтропия, если ширину ямы увеличить вдвое?

3.5. Найти плотность состояний одного, двух и трех одномерных гармонических осцилляторов о одинаковыми частотами в случае, если осцилляторы обмениваются энергией.

3.6. Найти плотность состояний с данной энергией для частиц газа, для которых энергия связана с импульсом соотношением $E = cp$. c - константа.

Задание 4.

Распределение Гиббса. Распределение Больцмана.

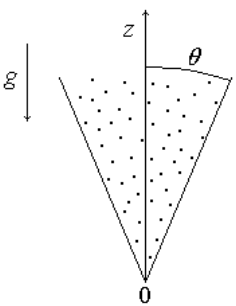
Вопросы к коллоквиуму.

1. Распределение Гиббса (вывод).
2. Распределения Максвелла и Больцмана как частные случаи распределения Гиббса. Барометрическая формула.
3. Частицы со спином 1/2 в магнитном поле. Закон Кюри.
4. Дипольный момент во внешнем электрическом поле. Закон Кюри.

4.1. Даны молекулы с 12 колебательными степенями свободы с одинаковыми частотами $\omega = 10^{14}$ рад/сек. Сравнить число невозбужденных молекул и молекул с энергией возбуждения $\hbar\omega$ при комнатной температуре.

4.2. Система состоит из невзаимодействующих частиц. Каждая частица может находится в трех невырожденных состояниях, энергии которых равны 0, E, $2E$. Определить температуру системы, если во втором состоянии находится 2/7 всего количества частиц.

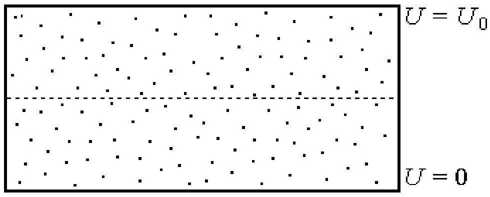
4.3. Система состоит из двух спинов 1/2. Энергия взаимодействия спинов $E = (a/2)\cdot[S(S+1) - 3/2]$, где S – значение суммарного спина. Найти заселенность состояний системы с $S = 0$ и $S = 1$



при температуре T.

4.4. Газ находится в коническом сосуде бесконечной высоты в однородном поле тяжести при температуре T. Определить среднюю энергию одной молекулы и теплоемкость газа.

4.5. Газ находится в сосуде, изображенном на рисунке. Посередине сосуда происходит скачек потенциала: в одной половине потенциальная энергия равна U_0, а в другой нулю. Определить среднюю энергию и теплоемкость газа (задача является классическим аналогом двухуровневой системы).



4.6. Газ находится в цилиндрическом сосуде высотой H и радиуса R в однородном поле тяжести при температуре T. Масса одной молекулы газа равна m. В верхней половине боковой стенки цилиндра имеется очень узкая щель высоты $H/2$ и ширины l. Найти число частиц, вылетающих через щель из сосуда за одну секунду, если количество молекул в сосуде поддерживается постоянным и равным N. Газ во время процесса истечения остается в равновесии.

4.7. Рассчитать центр тяжести столба газа высотой H в поле тяжести Земли. Ускорение земного тяготения и температуру считать постоянными.

Задание 5.

Статистическая сумма. Термодинамические функции. Теплоемкость.

Вопросы к коллоквиуму.

1. Статистическая сумма идеального одноатомного газа. Внутренняя энергия, свободная энергия Гельмгольца и энтропия идеального газа.
2. Гармонический осциллятор и его статистическая сумма в классическом и квантовом рассмотрении. Вымораживание колебательных степеней свободы и их вклад в теплоёмкость C_V.
3. Классический и квантовый ротатор в термостате. Температура вымораживания.
4. Энергия и теплоемкость на одну степень свободы. Теорема о равнораспределении.

5.1. Двумерный гармонический квантовый осциллятор обладает уровнями энергии $E=\hbar\omega(n+1)$ с кратностью вырождения $g = n + 1$. Определить статистическую сумму для системы N таких невзаимодействующих осцилляторов.

5.2. Энергетические уровни некоторой системы расположены так: невырожденное основное состояние и зона со сплошным спектром, отстоящая от основного состояния на δ. Плотность уровней в зоне постоянна и равна ε. Найти вероятность системе находится в зоне и среднюю энергию системы при температуре T.

5.3. По поверхности диска свободно движутся молекулы, находящиеся в поле притяжения некоторого центра, расположенного в середине диска. Потенциальная энергия молекул равна αr^2, где r – расстояние до центра. Радиус диска R настолько велик, что $\alpha R^2 >> kT$. Температура – T. Число молекул – N. Найти свободную энергию молекул, энергию и теплоемкость.

5.4. В закрытом сосуде находится 1 моль идеального газа трехатомных нелинейных молекул АВС. Под действием света происходит полная диссоциация молекул АВС: АВС $\rightarrow$ А + ВС. Найти суммарную теплоемкость газа в сосуде до и после воздействия света.

Температура газа намного превышает характеристические колебательные температуры молекул ABC и BC.

5.5. Основное электронное состояние атомарного фтора ^2P расщеплено спин-орбитальным взаимодействием на два состояния: $^2P_{3/2}$ (g = 4) и $^2P_{1/2}$ (g = 2). Расщепление равно 404 см$^{-1}$. Определить населенность верхнего состояния и теплоемкость атомарного фтора при 300 К.

5.6. Определить теплоемкость газообразного молекулярного брома при T = 600 К, считая его идеальным газом. Необходимые данные взять из справочника. Каковы вклады поступательного, вращательного и колебательного движения в теплоемкость?

5.7. Найти энергию, которую необходимо затратить на полную диссоциацию на атомы 1 моля молекулярного кислорода при постоянных температуре и давлении. Энергия разрыва связи равна ε. Колебания O_2 не возбуждены. Температура равна T. Число Авогадро – N_A.

5.8. Статистическая сумма неидеального газа из N молекул, находящегося в объеме V при температуре T, имеет вид: $Z = A(VT^{3/2}/N)^N \cdot (1 + N^2(C/T - B)/V)$, где A, B, C – константы. Найти давление газа.

Задание 6.

Явления переноса.

Вопросы к коллоквиуму.

1. Распределение по длинам и временам свободного пробега молекул в максвелловском газе.

2. Коэффициенты:

а) вязкости,

б) диффузии,

в) теплопроводности

в квазиравновесном почти идеальном газе.

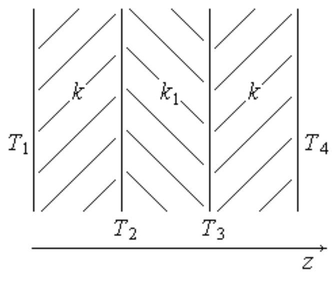
3. Биномиальное распределение. Соотношение Эйнштейна $x^2 \sim Dt$.

6.1. Оценить число столкновений в секунду одной молекулы азота при p = 1 атм, T = 300 К, а также длину свободного пробега и коэффициент диффузии.

6.2. Идет перенос тепла между двумя плоскими стенками, находящимися при температурах T_1 и T_2. Расстояние между стенками - d. Длина свободного пробега – λ. $\lambda \gg d$. Плотность газа n. Оценить максимальный поток тепла.

6.3. Диск подвешен горизонтально в газе на упругой нити. Под ним на расстоянии d находится такой же диск, который приводят во вращение с угловой частотой ω. Определить, на какой угол φ повернется верхний диск. Модуль кручения нити f ($M = f\varphi$, где M – момент сил). Радиус дисков R. Плотность газа n. Масса молекулы m, средняя скорость $\bar{V}$. $d \ll \lambda$, где λ – длина свободного пробега.

6.4. Три широких пластины, толщиной d каждая, сложены, как показано на рисунке.



Коэффициенты теплопроводности равны k, k_1, k. Свободные поверхности пластин поддерживаются при температурах T_1 и T_4. Найти температуры T_2 и T_3 в местах контакта разнородных пластин. Нарисовать график зависимости температуры от координаты z, если $T_4 > T_1$ и $k_1 > k$.

6.5. По очень длинной нити с радиусом a, с электрическим сопротивлением на единицу длины ρ течет ток I. Коаксиально нити расположена длинная тонкая труба с радиусом R, стенка которой поддерживается при температуре T_0 . Между стенкой и нитью находится газ. Найти установившуюся температуру у поверхности нити.

6.6. Найти распределение температуры в пространстве между двумя концентрическими сферами с радиусами R_1 и R_2, заполненном проводящим тепло однородным веществом, если температуры обеих сфер постоянны и равны T_1 и T_2. Теплопроводность вещества от температуры не зависит.

Учебно-методическое обеспечение дисциплины

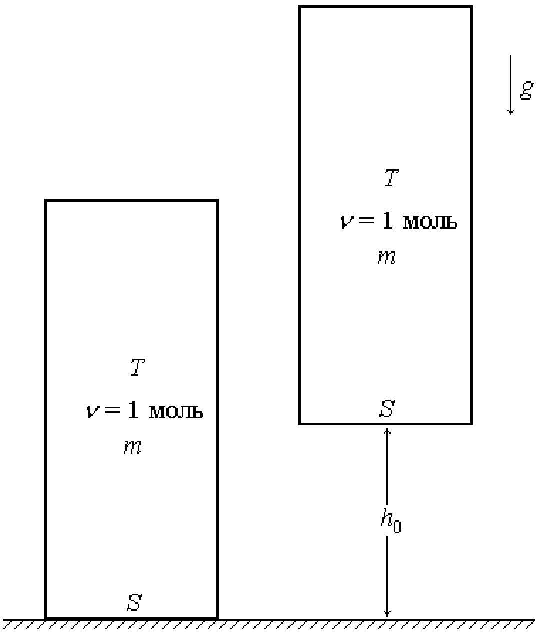
Образцы вопросов для подготовки к экзамену

1. Первое начало термодинамики. Теплоемкость, ее зависимость от пути. C_p и C_V, их связь.
2. Уравнение равновесного адиабатического процесса для идеального газа. Свойства адиабаты и изотермы на PV-диаграмме.
3. Цикл Карно. Теорема Карно. Термодинамическое определение энтропии.
4. Основное термодинамическое равенство. Основное термодинамическое неравенство.
5. Связь между термическим и калорическим уравнениями состояния.
6. Общие условия термодинамического равновесия. Установление равновесия в изолированной системе. Установление равновесия при $T = const, V = const, N_i = const;$ при $T = const, p = const, N_i = const.$
7. Вывод распределения Максвелла.
8. Средние значения скорости V_x и $|V|$ в равновесном газе.
9. Средние значения квадрата скорости и кинетической энергии в равновесном газе.
10. Поток частиц. Давление и температура идеального газа.
11. Теорема Лиувилля. Функция распределения микроканонического ансамбля.
12. Число микросостояний системы. Энтропия системы спинов с s = 1/2.
13. Энтропия и химический потенциал идеального газа.
14. Тепловое равновесие. Равенство температур частей системы, как следствие микроканонического распределения.
15. Основное термодинамическое равенство.
16. Распределение Гиббса (вывод).
17. Распределения Максвелла и Больцмана как частные случаи распределения Гиббса. Барометрическая формула.
18. Частицы со спином 1/2 в магнитном поле. Закон Кюри.
19. Дипольный момент во внешнем электрическом поле. Закон Кюри.
20. Статистическая сумма идеального одноатомного газа. Внутренняя энергия, свободная энергия Гельмгольца и энтропия идеального газа.
21. Гармонический осциллятор и его статистическая сумма в классическом и квантовом рассмотрении. Вымораживание колебательных степеней свободы и их вклад в теплоёмкость C_V.
22. Классический и квантовый ротатор в термостате. Температура вымораживания.
23. Энергия и теплоемкость на одну степень свободы. Теорема о равнораспределении.
24. Распределение по длинам и временам свободного пробега молекул в максвелловском газе.
25. Коэффициенты: а) вязкости, б) диффузии, в) теплопроводности в квазиравновесном почти идеальном газе.
26. Биномиальное распределение. Соотношение Эйнштейна $x^2 \sim Dt$.

Примеры задач на контрольных работах и на экзаменах

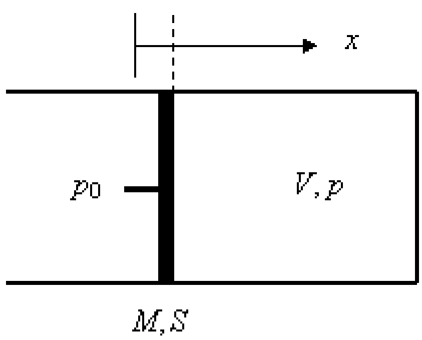
Первая контрольная работа

1. (100 б.) Два одинаковых очень высоких сосуда установлены вертикально так, что основание одного находится выше основания другого на величину h_0. В каждом сосуде находится один моль идеального газа с массой молекул m. Сколько газа нужно добавить в один из сосудов, чтобы потенциальные энергии газов сравнялись? Температура газов поддерживается одинаковой и постоянной. Ускорение свободного падения g не зависит от высоты.

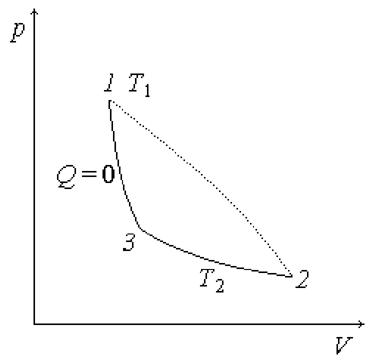


2. (120 б.) С одним молем идеального газа происходит равновесный процесс, при котором произведение плотности числа частиц n на среднюю абсолютную скорость молекулярного движения $\langle v \rangle$ остается постоянным. Известна молярная теплоемкость при постоянном объеме c_V. Найти молярную теплоемкость газа в этом процессе.

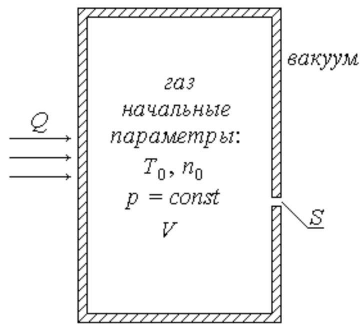
3. (140 б.) В горизонтальном, закрытом с одного конца цилиндре площади S находится подвижный поршень массы M. Закрытая часть цилиндра заполнена идеальным газом с показателем адиабаты γ. Вне цилиндра поддерживается постоянное давление p_0. В положении равновесия объем газа в цилиндре равен V_0. Считая процесс в газе адиабатическим, найти период малых колебаний поршня.



4. (160 б.) Идеальный одноатомный газ в количестве ν молей, имеющий температуру T_1, расширяется без подвода теплоты в необратимом процессе *1-2*. В результате его температура становится равной T_2. Затем газ квазистатически сжимается: сначала изотермически (*2-3*), а затем адиабатически (*3-1*), возвращаясь в исходное состояние. В процессе сжатия затрачивается работа A. Найти изменение энтропии при расширении.



5. (180 б.) В сосуде объемом V, содержащем газ, проделано небольшое отверстие площадью S. Снаружи сосуда поддерживается вакуум. Начальная температура газа T_0, его плотность n_0. Сосуд подогревают таким образом, что в нем все время поддерживается постоянное давление газа. За какое время газ покинет сосуд?



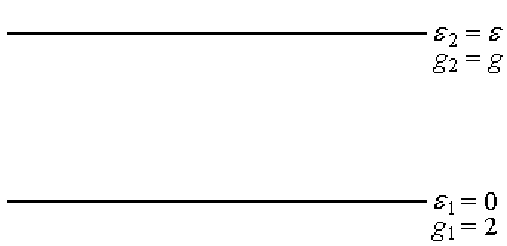
Вторая контрольная работа

1. (100 б.) На какой высоте содержание водорода в воздухе удваивается по сравнению с содержанием углекислого газа? Среднюю по высоте температуру считать равной 20 °C.

2. (120 б.) Квантовая система из N неподвижных двухуровневых частиц с разностью энергий между уровнями ε имеет при $\varepsilon >> kT$ следующее значение средней энергии

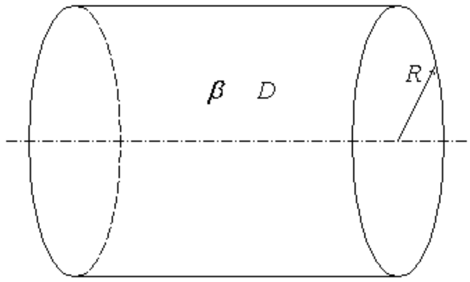
$$\langle \varepsilon \rangle = 3N\varepsilon \exp(-\varepsilon / kT).$$

Чему равно вырождение верхнего уровня, если нижний уровень двукратно вырожден?

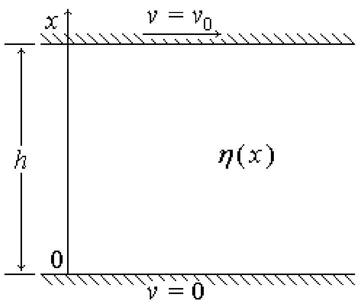


3. (150 б.) В закрытом сосуде находится один моль двухатомного газа. При повышении температуры доля диссоциировавших на атомы молекул равна $\alpha(T)$. Энергия диссоциации молекулы равна ε_0. Определить теплоемкость газа при температуре T. Температура значительно превышает характеристическую температуру колебаний.

4. (160 б.) Длинное цилиндрическое тело радиуса R находится в вакууме. Внутри тела равномерно по его объему выделяется газ. Количество газа, выделяемого за единицу времени в единице объема, постоянно и равно β. Коэффициент диффузии газа в материале тела равен D. Найти стационарное распределение газа в теле. Чему равна концентрация газа на оси цилиндрического тела?



5. (170 б.) Одна пластина покоится, другая движется параллельно ей со скоростью v_0. Между пластинами находится вязкая неоднородная жидкость с коэффициентом вязкости $\eta(x)$, обратно пропорциональным x, где x – расстояние от первой пластины. Найти, как скорость жидкости зависит от x в стационарном случае. Расстояние между пластинами h.

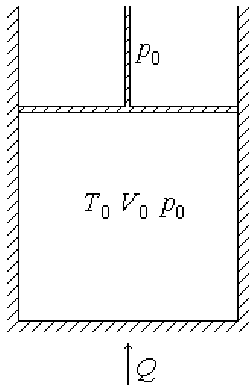


$$u = v_0\left(\frac{x}{h}\right)^2.$$

Экзамен

1. (130 б.) Одноатомный идеальный газ адиабатически расширился от объема V_1 до объема V_2. Как изменится средняя скорость молекул газа?

2. (150 б.) Идеальный газ с постоянным показателем адиабаты γ, находившийся при температуре T_0 и давлении p_0 в объеме V_0, изобарически нагрели, сообщив ему количество теплоты Q. Как изменится объем газа и его энтропия?



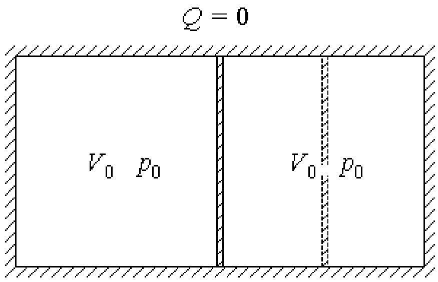
3. (180 б.) В одном из параллельных миров кинетическая энергия частицы связана с импульсом по закону

$$E = \alpha p^6,$$

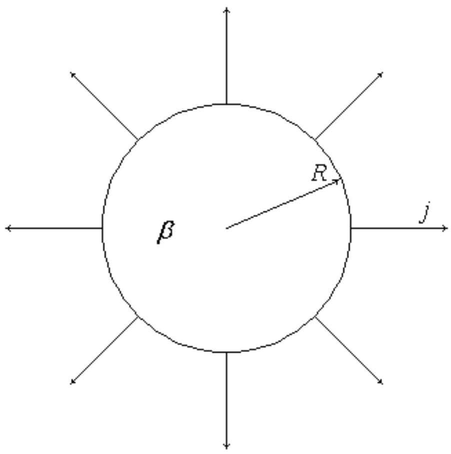
где α – положительная постоянная. Найти термическое и калорическое уравнения состояния одноатомного идеального газа в этом мире. Мир является трехмерным.

4. (180 б.) Сосуд заполнен смесью двухатомного и трехатомного газов. Трехатомный газ состоит из нелинейных молекул. После размораживания всех степеней свободы теплоемкость смеси увеличилась в 1,5 раза. Найти отношение количеств молекул газов в сосуде.

5. (220 б.) В цилиндрическом сосуде находится поршень, который может перемещаться без трения. Первоначально поршень делит сосуд на части объемом V_0 каждая. Обе половины сосуда заполнены одинаковым количеством одного и того же идеального газа до давления p_0. Найти работу, которую нужно совершить, чтобы, медленно двигая поршень, сжать газ в одной из частей сосуда вдвое. Сосуд теплоизолирован. Поршень проводит тепло. Показатель адиабаты газа γ.



6. (120 б.) Шар радиуса R, состоящий из вещества с коэффициентом теплопроводности χ, не зависящим от температуры, находится в вакууме. Внутри шара равномерно по объему выделяется теплота с плотностью тепловыделения β (эрг/(см^{3}с)). Шар представляет собой абсолютно черное тело. Найти температуру в центре шара.



Ценные указания:

(1) Поверхность абсолютно черного тела излучает тепловую энергию по закону Стефана – Больцмана, то есть плотность потока излучаемой тепловой энергии равна

$$j = \sigma T^4 \text{ (эрг/(см}^3\text{с))},$$

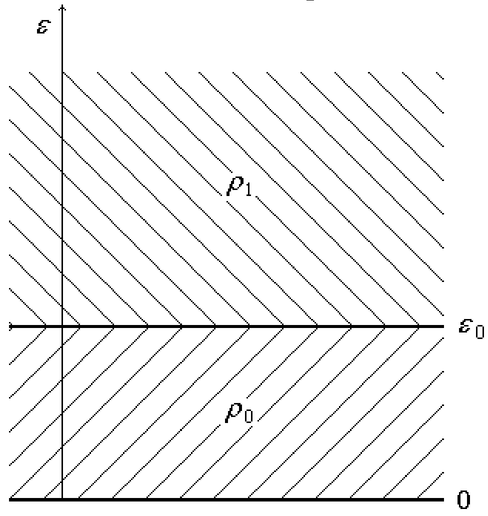
где σ – постоянная Стефана – Больцмана, T – абсолютная температура. Плотность потока излучаемой тепловой энергии j представляет собой энергию, излучаемую единицей площади поверхности в единицу времени.

(2) Плотность тепловыделения β представляет собой количество теплоты, выделяющееся в единице объема вещества в единицу времени.

Второй экзамен

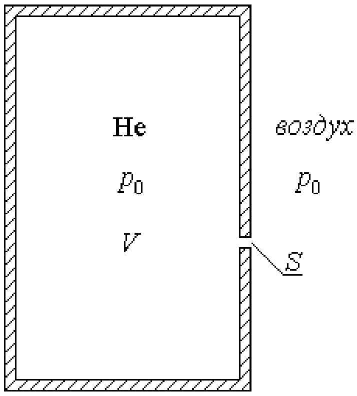
1. (120 б.) В каком случае КПД машины Карно увеличится больше: 1) если поднять на ΔT температуру T_1 нагревателя при неизменной температуре холодильника T_0 или 2) если при неизменной температуре нагревателя T_1 понизить температуру холодильника T_0 на ту же величину ΔT ($T_0 >> \Delta T$)?

2. (120 б.) Энергетический спектр системы состоит из двух зон. Плотность уровней в первой зоне ($0 \le \varepsilon \le \varepsilon_0$) равна ρ_0, а во второй ($\varepsilon_0 \le \varepsilon \le \infty$) – равна ρ_1. При какой температуре вероятности обнаружения системы в обеих зонах равны?

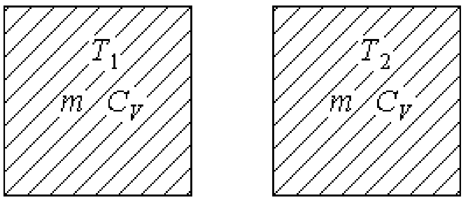


3.(150 б.) Система состоит из четырех осцилляторов с частотой ω. В начальный момент времени суммарная энергия первой пары осцилляторов равна $\hbar\omega$, а второй пары – $2\hbar\omega$. В начальный момент энергией могут обмениваться только осцилляторы внутри первой пары, и только – внутри второй пары. В какой-то момент времени начинается обмен энергией между всеми осцилляторами. На какую величину изменится энтропия системы после установления равновесия? Осцилляторы различимы.

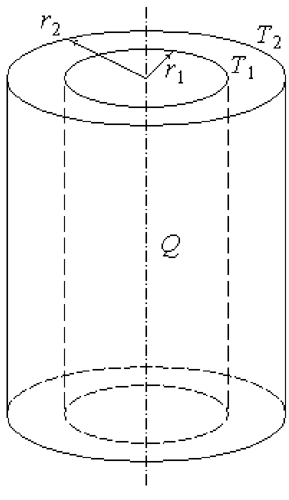
4. **.**(200 б.) В тонкостенном сосуде с гелием объема V пробивают малое отверстие площадью S. Как будет изменяться давление внутри сосуда, если вначале оно равно давлению P_0 окружающего воздуха? Построить график $P(t)$.



5. (240 б.) Два кубика одинаковой массы m из сплава с очень малым изобарическим коэффициентом температурного расширения нагреваются: один – до температуры T_1, другой – до T_2; затем они оба помещаются в адиабатически изолированный сосуд и приводятся в контакт. Рассчитать изменение термодинамических функций S, U и F в результате установления равновесия, если удельная теплоемкость C_V = const.

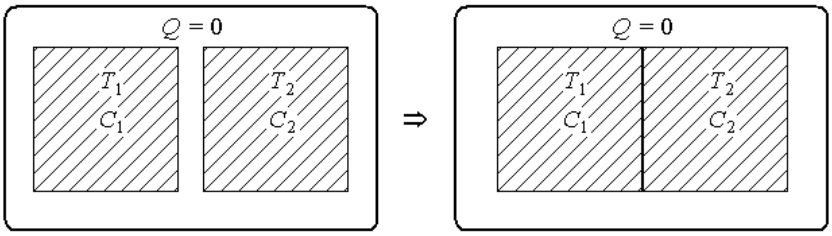


6. (270 б.) Для измерения теплопроводности газа им заполняется пространство между двумя длинными коаксиальными цилиндрами радиуса r_1 и r_2. Заполнение производится при невысоком давлении (~ 10 мм рт. ст.), чтобы исключить конвекцию. Внутренний цилиндр нагревается источником тепла с удельной мощностью Q, установившиеся температуры цилиндров t_1 и t_2 измеряются. Найти распределение температуры газа между цилиндрами. Как по заданным параметрам вычислить коэффициент теплопроводности исследуемого газа и рассчитать газокинетический диаметр молекулы для азота?



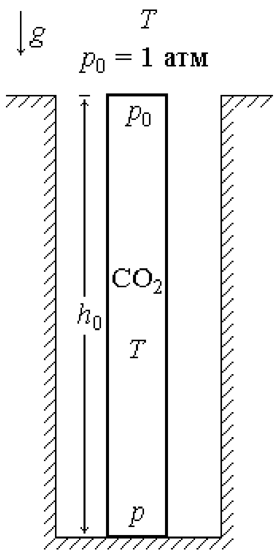
Третий экзамен

1. (100 б.) Изолированная система состоит из двух тел. Теплоемкость первого тела равна C_1, теплоемкость второго – C_2. Их температуры равны T_1 и T_2 соответственно. Причем $T_1 > T_2$. Тела привели в тепловой контакт. Вычислить изменение энтропии системы в процессе достижения теплового равновесия.



2. (100 б.) В сосуде находится идеальный газ при температуре T и концентрации n. Найти число молекул, ударяющихся о единицу площади стенки в единицу времени и имеющих нормальную компоненту скорости большую, чем некоторая заданная величина v_0.

3. (100 б.) В шахту глубиной 7 км поставлена труба, в которую закачан углекислый газ CO_2. Давление CO_2 в верхней части трубы равно 1 атм. Каков вес CO_2? Температуру считать постоянной и равной температуре наружного воздуха.



4. (100 б.) N частиц одноатомного идеального газа находятся в сосуде объемом V при температуре T. Энергия внутреннего состояния каждой частицы принимает два значения: 0 и E. Найти среднюю энергию и теплоемкость газа.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации (Приложение 2), предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям ФГОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Лист актуализации рабочей программы дисциплины
«Физика»

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Ученого совета Факультета естественных наук	Подпись ответственного