

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
природоподобных, плазменных и
ядерных технологий им. И.В.**

Курчатова

Т.Е. Григорьев

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Квантовая механика
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и физического материаловедения
курс:	2
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

4 (весенний) - Дифференцированный зачет

5 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 120 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 150 час.

Всего часов: 270, всего зач. ед.: 6

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: М.В. Зверев, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и физического материаловедения 31.03.2025

Аннотация

Целью данной дисциплины является знакомство с базовыми экспериментальными фактами в области квантовой физики. Знакомство обучающегося с предметом начинается с изложения экспериментальных и теоретических результатов, положенных в основания квантовой механики. Далее студент последовательно знакомится с математическим формализмом дисциплины и основными результатами его применения при решении ряда практически важных задач таких, как энергетические спектры водородоподобных атомов, вращательные спектры жестких ротаторов, колебательные спектры гармонических осцилляторов, прохождение частиц через потенциальные барьеры и т.д. В заключительной части программы излагаются общепризнанные на сегодняшний день элементы теорий строения и взаимодействий андронной материи.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами основ квантовой механики.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области аналитической механики как дисциплины, интегрирующей общефизическую и математическую подготовку студентов;
- овладение основными методами, позволяющими решать уравнения аналитической механики;
- решение задач, охватывающих основные приложения аналитической механики;
- усвоение основных концепций квантовой физики;
- решение задач, охватывающих основные приложения квантовой физики.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
	ОПК-2.3 Знает основные требования информационной безопасности
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- основы лагранжевой механики;
- теоретические основы динамики консервативных и диссипативных систем вблизи равновесия;
- теоретические основы динамики твердого тела;
- принцип наименьшего действия и основы гамильтоновой механики;
- метод канонических преобразований и аппарат скобок Пуассона;
- метод Гамильтона-Якоби и технику разделения переменных;
- метод переменных действие-угол.

уметь:

- формулировать уравнения Лагранжа в обобщенных координатах, находить интегралы движения и с их помощью решать уравнения движения;
- вычислять период финитного движения;
- вычислять сечение рассеяния в данном центральном поле;
- находить собственные частоты и нормальные колебания систем со многими степенями свободы;
- вычислять моменты инерции твердого тела;
- переходить от лагранжиана к гамильтониану и наоборот с помощью преобразования Лежандра;
- осуществлять канонические преобразования с помощью данной производящей функции;
- вычислять скобки Пуассона;
- разделять переменные в уравнении Гамильтона-Якоби и решать с помощью метода Гамильтона-Якоби канонические уравнения движения;
- переходить к переменным действие-угол;
- вычислять адиабатические инварианты.

владеть:

- основными методами аналитической механики – методами Лагранжа I и II рода;
- методами интегрирования уравнений движения, принципом наименьшего действия;
- методом канонических уравнений Гамильтона, аппаратом скобок Пуассона, методом Гамильтона-Якоби решения канонических уравнений.

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

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Основы лагранжевой механики	15	15		35
2	Физические задачи лагранжевой механики	15	15		40
3	Атом в магнитном поле	5	5		10
4	Волны де Бройля. Соотношение неопределённостей	5	5		10
5	Законы радиоактивных распадов. Ядерные реакции	5	5		10
6	Опыты Штерна–Герлаха, Эйнштейна–де Газа. Спин электрона	5	5		15
7	Строение атома	5	5		15
8	Фотоэффект. Эффект Комптона. Тепловое излучение	5	5		15
Итого часов		60	60		150
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		270 час., 6 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 4 (Весенний)

1. Основы лагранжевой механики

Связи и их классификация. Возможные и виртуальные перемещения. Модель идеальных связей. Общее уравнение динамики. Уравнения Лагранжа I рода.

Обобщенные координаты. Обобщенные силы. Уравнения Лагранжа II рода. Лагранжиан. Кинетическая энергия в обобщенных координатах.

Потенциальная энергия. Сохранение полной энергии. Непотенциальные силы. Структура обобщенного потенциала. Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса как следствия однородности времени, пространства и изотропности пространства.

Одномерное движение и интегрирование уравнений движения с помощью интегралов движения. Задача двух тел. Движение в центральном поле.

2. Физические задачи лагранжевой механики

Рассеяние частиц. Сечение рассеяния. Формула Резерфорда. Рассеяние на малые углы.

Равновесие. Устойчивость и неустойчивость. Линеаризация и малые колебания. Динамика консервативных и диссипативных систем вблизи равновесия. Вынужденные колебания и резонанс. Собственные частоты для систем со многими степенями свободы.

Движение твердого тела. Угловая скорость вращения, тензор инерции, Момент импульса твердого тела. Уравнения движения твердого тела.

Свободное вращение симметричного волчка. Углы Эйлера. Симметричный волчок с закрепленной нижней точкой в поле тяжести. Спящий волчок.

Семестр: 5 (Осенний)

3. Атом в магнитном поле

Эффект Зеемана (слабое и сильное магнитное поле) на примере $3P-3S$ -переходов. Ядерный и электронный магнитный резонанс.

4. Волны де Бройля. Соотношение неопределённостей

Гипотеза де Бройля о волновых свойствах частиц, волновая функция свободной частицы (волна де Бройля). Опыты Девиссона-Джермера и Томсона по дифракции электронов. Связь волновых свойств частиц с ее механическими характеристиками. Длина волны де Бройля нерелятивистской частицы. Критерий квантовости системы. Вероятностная интерпретация волновой функции.

5. Законы радиоактивных распадов. Ядерные реакции

Радиоактивность. Закон радиоактивного распада, константа распада, период полураспада, среднее время жизни, вековое уравнение. Альфа-распад, закон Гейгера–Нэттола и его вывод (формула Гамова). Гамма-излучение, изомерия ядер. Бета-распад, энергетический спектр бета-распада, гипотеза нейтрино. Ядерные реакции: экзотермические и эндотермические реакции, порог реакции, сечение реакции (полное и парциальные сечения). Потенциальное рассеяние, амплитуда и длина рассеяния. Составное ядро. Нерезонансная теория – классическое сечение, поправки на волновой характер частиц, коэффициент проникновения частицы в прямоугольную яму, закон Бете. Резонансные реакции – формула Брейта–Вигнера. Эффект Мессбауэра. Реакции под действием нейтронов. Классификация нейтронов. Замедление быстрых нейтронов в среде, длина замедления. Когерентные явления (дифракция нейтронов). Деление ядер под действием нейтронов, мгновенные и запаздывающие нейтроны, цепная реакция деления. Роль запаздывающих нейтронов в работе ядерного реактора. Схема реактора на тепловых нейтронах. Йодная яма. Возможные схемы реакторов термоядерного синтеза.

6. Опыты Штерна–Герлаха, Эйнштейна–де Газа. Спин электрона

Магнитный орбитальный момент электронов, гиромантическое отношение, g-фактор, магнетон Бора. Опыты Штерна–Герлаха – демонстрация дискретности магнитного момента, обнаружение магнитных дублетов. Гипотеза Уленбека и Гаудсмита о спине электрона, спиновый g-фактор. Опыты Эйнштейна и де Газа (спиновая природа магнетизма твердых тел). Векторная модель сложения спинового и орбитального моментов электрона, фактор Ланде.

7. Строение атома

Закономерности оптических спектров атомов, формула Бальмера. Открытие атомного ядра и планетарная модель атома Резерфорда. Постулаты Бора, боровский радиус, формула для энергии электронов атома водорода. Характеристическое рентгеновское излучение (закон Мозли). Классификация водородоподобных атомов: главное, радиальное и орбитальное квантовые числа. Вырождение уровней в кулоновском поле (кратность вырождения). Правило Хунда. Качественное объяснение закономерностей таблицы Менделеева (до аргона), спектроскопическая запись состояния атома, электронная конфигурация элементов, последовательность заполнения состояний. Скачкообразное изменение химических свойств при заполнении p-оболочки, магические числа (инертные газы). Спин-орбитальное взаимодействие, тонкая и сверхтонкая структура атомных уровней.

8. Фотоэффект. Эффект Комптона. Тепловое излучение

Основные экспериментальные результаты по внешнему фотоэффекту. Уравнение Эйнштейна, гипотеза квантов света. Эксперимент Комптона по рассеянию рентгеновских лучей на легких ядрах, вывод изменения длины волны квантов при рассеянии на свободных электронах, комптоновская длина волны. Уравнения, описывающие взаимодействие фотона с произвольной системой как обмен энергией и импульсом путем рождения и уничтожения квантов. Интерпретация плотности энергии электромагнитной волны как вероятность обнаружения фотона в заданном элементе пространства.

Плотность состояний, фазовый объем, приходящийся на одно квантовое состояние. Вывод формулы Планка для равновесного излучения абсолютно черного тела. Закон смещения Вина. Анализ формулы Планка в предельных случаях больших частот (квантовый предел) и малых частот (формула Рэлея–Джинса). Классическая интерпретация формулы Рэлея–Джинса. Интегральные характеристики равновесного теплового излучения – плотность энергии равновесного излучения, интенсивность излучения, светимость. Законы Кирхгофа, Ламберта, Стефана–Больцмана. Цветовая, яркостная и радиационная температуры тела. Двухуровневая квантовая система в поле равновесного излучения, принцип детального равновесия, спонтанные и индуцированные переходы. Прохождение излучения через среду, условие усиления (инверсная заселенность уровней). Принципы создания инверсной заселенности в трехуровневой и четырехуровневой системах.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лекции по аналитической механике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ф. Р. Гантмахер ; под ред. Е. С. Пятницкого .— Изд. 3-е, стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005 .— 264 с.
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 1 : Механика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 6-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2013 .— 224 с.

Дополнительная литература

1. Классическая механика [Текст] : учеб. пособие для вузов / М. А. Айзерман .— 3-е изд. — М : Физматлит, 2005 .— 380 с.
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 2 : Теория поля : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 8-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2003, 2006, 2012, 2014 .— 536 с.

Фонд литературы кафедры

3. Г.Л.Коткин, В.Г.Сербо, Сборник задач по классической механике. - М.: Наука, 1969

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. Материалы по аналитической механике:
http://window.edu.ru/library/resources?p_rubr=2.2.75.14.10
2. Энциклопедия по физике: http://www.scholarpedia.org/article/Encyclopedia_of_physics
3. Электронная библиотека Физтеха: <http://lib.mipt.ru>
4. Большая научная библиотека: <http://www.Sci-lib.com>
5. Библиотека Корнельского Университета, электронный ресурс arXiv: <http://arXiv.org>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Программные средства MATLAB, Mathcad, WolframMathematica.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Для успешного освоения курса, помимо посещения лекций и семинаров, от студентов требуется самостоятельная работа. В основном, это время отводится на самостоятельное решение задач, входящих в два задания. Самостоятельные занятия включают в себя также повторение материала лекций, семинарских занятий и подготовку к промежуточным тестированиям, которые проводятся для текущего контроля за усвоением материала. Всего предполагается провести за семестр две контрольные работы и защитить каждое из двух самостоятельно выполненных заданий. Студенты, успешно прошедшие все формы промежуточного контроля, допускаются к сдаче дифференцированного зачета по дисциплине.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и физического материаловедения
курс:	<u>2</u>
квалификация:	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
4 (весенний) - Дифференцированный зачет	
5 (осенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	М.В. Зверев, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
	ОПК-2.3 Знает основные требования информационной безопасности
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая механика» обучающийся должен:

знать:

- основы лагранжевой механики;
- теоретические основы динамики консервативных и диссипативных систем вблизи равновесия;
- теоретические основы динамики твердого тела;
- принцип наименьшего действия и основы гамильтоновой механики;
- метод канонических преобразований и аппарат скобок Пуассона;
- метод Гамильтона-Якоби и технику разделения переменных;
- метод переменных действие-угол.

уметь:

- формулировать уравнения Лагранжа в обобщенных координатах, находить интегралы движения и с их помощью решать уравнения движения;
- вычислять период финитного движения;
- вычислять сечение рассеяния в данном центральном поле;
- находить собственные частоты и нормальные колебания систем со многими степенями свободы;
- вычислять моменты инерции твердого тела;
- переходить от лагранжиана к гамильтониану и наоборот с помощью преобразования Лежандра;
- осуществлять канонические преобразования с помощью данной производящей функции;
- вычислять скобки Пуассона;
- разделять переменные в уравнении Гамильтона-Якоби и решать с помощью метода Гамильтона-Якоби канонические уравнения движения;
- переходить к переменным действие-угол;
- вычислять адиабатические инварианты.

владеть:

- основными методами аналитической механики – методами Лагранжа I и II рода;
- методами интегрирования уравнений движения, принципом наименьшего действия;
- методом канонических уравнений Гамильтона, аппаратом скобок Пуассона, методом Гамильтона-Якоби решения канонических уравнений.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В целях текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущих занятий по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Промежуточная аттестация по дисциплине «Квантовая механика» осуществляется в форме дифференцированного зачета. Дифференцированный зачет проводится в устной форме.

Задание № 1.

- 1.1. Две точки с одинаковой массой m соединены стержнем неизменной длины l с пренебрежимо малой массой. Система может двигаться только в вертикальной плоскости и только так, что скорость середины стержня направлена вдоль стержня. Найти траектории точек из уравнений Лагранжа первого рода.
- 1.2. Определить, по какому закону $T(\varepsilon)$ обращается в бесконечность период движения частицы массы m в потенциальной яме $U(x)$, при приближении энергии E к U_{\max} ($\varepsilon = 1 - E/U_{\max} \rightarrow +0$). Считать, что в окрестности точки $x = a$: $U(x) = U_{\max} - \alpha(x - a)^n$, где n — четное, $n \geq 2$.
- 1.3. Найти дифференциальное эффективное сечение рассеяния быстрых частиц ($E \gg V$) в потенциале $U(r) = V(1 - r^2/a)$, $r < a$; $0, r > a$.
- 1.4. Определить энергию E , приобретённую осциллятором под действием силы $F(t) = F_0 \exp(-t^2/\tau^2)$ за всё время её действия, если при $t = -\infty$ осциллятор покоился.

Задание № 2.

- 1.1. Вычислить скобки Пуассона

а) $\{M_i, r_j\}$, $\{M_i, p_j\}$, $\{M_i, M_j\}$; б) $\{a\mathbf{p}, b\mathbf{r}\}$, $\{a\mathbf{M}, b\mathbf{r}\}$, $\{a\mathbf{M}, b\mathbf{M}\}$; в) $\{\mathbf{M}, \mathbf{r}\mathbf{p}\}$, $\{\mathbf{p}, \mathbf{r}^n\}$, $\{\mathbf{p}, (\mathbf{a}\mathbf{r})^2\}$

- 1.2. Функция Гамильтона гармонического осциллятора имеет вид: $H = p^2/2m + m\omega^2 q^2/2$. Написать функцию Гамильтона и уравнения Гамильтона в новых канонически сопряженных переменных P и Q , взяв в качестве производящей функции следующие

выражения: а) $F_1(Q, q) = \int_0^q p \, dq$; б) $F_2(P, q) = -m\omega q^2/2 P$; в) $F_4(P, q) = p^2/2 m \omega \cos P$.
 $F_1(Q, q) = \int_0^q p \, dq$

- 1.3. Рассматриваются малые колебания ангармонического осциллятора, функция Гамильтона которого $H = p^2/2m + m\omega^2 q^2/2 + \alpha q^3 + \beta q p^2$ и $\alpha q \ll m\omega^2$, $\beta q \ll 1/m$. В каноническом преобразовании, задаваемом производящей функцией $\Phi = qP + aq^2P + bP^3$, подобрать параметры a и b так, чтобы новая функция Гамильтона с точностью до членов первого порядка по $\alpha Q/(m\omega^2)$ и βmQ включительно не содержала ангармонических членов, и найти $q(t)$.

- 1.4. Найти производящую функцию канонического преобразования, состоящего в переходе от $q(t)$, $p(t)$ к $Q(t) = q(t + \tau)$, $P(t) = p(t + \tau)$, где $\tau = \text{const}$, для а) свободного движения, б) движения в однородном поле, в) осциллятора.

1.5. Постоянные однородные электрическое E и магнитное H поля взаимно ортогональны. Выбирая электромагнитные потенциалы \mathbf{A} и φ данных скрещенных полей в виде $A_x = A_z = 0$, $A_y = Hx$ и $\varphi = -Ex$ найти полный интеграл уравнения Гамильтона – Якоби для частицы с массой m и зарядом e .

1.6. Диполь с моментом d создает в пространстве электрическое поле с потенциалом $\varphi = \mathbf{dr}/r^3$. В электрическом поле рассеивается протон с массой m и зарядом e . До рассеяния протон двигался с прицельным расстоянием ρ и имел скорость \mathbf{v} , антипараллельную вектору \mathbf{d} . Выразить траекторию протона через квадратуры. В случае далёких пролетов протона с большой энергией E определить траекторию в аналитическом виде путем разложения в ряд по малому параметру ed/Ep^2 .

1.7. Найти траекторию движения (выразить через квадратуры) в поле двух кулоновских центров $U(r) = \alpha(1/r_1 - 1/r_2)$, находящихся друг от друга на расстоянии $2c$, если скорость частицы на бесконечности параллельна оси, проходящей через кулоновские центры.

1.8. Найти переменные действия – угол для частицы в поле $U(x) = \infty$, $x < 0$; Fx , $x > 0$.

Примерный перечень контрольных вопросов в билетах.

1. Связи и их классификация. Возможные и виртуальные перемещения. Идеальные связи. Голономные и неголономные системы. Общее уравнение динамики. Уравнения Лагранжа первого рода.
2. Независимые координаты. Обобщённые силы. Кинетическая энергия в обобщенных координатах. Уравнения Лагранжа второго рода. Лагранжиан.
3. Обобщенный потенциал. Структура обобщенного потенциала.
4. Потенциальная энергия. Сохранение полной энергии.
5. Законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения как следствие однородности времени, пространства и изотропности пространства.
6. Одномерное движение и интегрирование уравнений движения. Движение в центральном поле. Механическое подобие.
7. Рассеяние частиц. Сечение рассеяния.
8. Равновесие. Устойчивость и неустойчивость. Линеаризация и малые колебания. Динамика консервативных и диссипативных систем вблизи равновесия.
9. Собственные частоты для систем со многими степенями свободы.
10. Вынужденные колебания и резонанс.
 11. Движение твёрдого тела: угловая скорость вращения, тензор инерции, момент импульса твёрдого тела.
 12. Углы Эйлера. Свободное вращение симметричного волчка.
 13. Симметричный волчок с закрепленной нижней точкой в поле тяжести. "Спящий" волчок.
 14. Принцип наименьшего действия Гамильтона. Уравнения Лагранжа второго рода как следствие вариационного принципа.
 15. Преобразование Лежандра. Канонические уравнения Гамильтона. Циклические переменные.
 16. Теорема Лиувилля.
 17. Вариационный принцип в расширенном фазовом пространстве.
 18. Лемма Стокса.
 19. Интегральные кривые уравнения Гамильтона как линии ротора 1-формы. Интегральные инварианты Пуанкаре и Пуанкаре-Картана.
 20. Определение канонического отображения. Канонические преобразования. Производящие функции канонического преобразования.

21. Критерии каноничности преобразования. Скобки Пуассона.
22. Действие как функция координат и времени. Метод Гамильтона-Якоби.
23. Функции Лагранжа и Гамильтона для частиц в магнитном поле.
24. Разделение переменных, движение частицы в поле двух притягивающих центров.
25. Принцип Мопертюи - Лагранжа.
26. Оптико-механическая аналогия.
27. Переменные действие-угол в одномерном случае.
28. Адиабатический инвариант.

Примерный перечень задач в контрольных заданиях.

Задание № 1.

1. Найти период движения частицы с массой m и энергией E в поле с потенциальной энергией $U(x) = -U_0/\cosh^2 ax$ ($-U_0 < E < 0$).
2. Найти сечение рассеяния частиц, движущихся с энергией E в потенциальном поле $U(r) = \alpha/r^2$ ($\alpha > 0$).
3. Найти малые колебания двойного плоского маятника (шарики с массами $m_1 = m_2 = m$ на невесомых стержнях с длинами $l_1 = l_2 = l$).
4. Однородный прямоугольный параллелепипед, имеющий массу m и стороны $2a$, $2a$, $4a$, вращается вокруг своей диагонали с постоянной угловой скоростью ω . Найти величину момента импульса параллелепипеда относительно его центра и угол между направлением момента и осью вращения.
5. Найти частоту малых колебаний полубревна (полуцилиндра с радиусом R , лежащего на шероховатой горизонтальной поверхности).

Задание № 2

1. Найти функцию Гамильтона плоского маятника с массой m и длиной нити l , точка подвеса которого (с массой m в ней) может совершать движение по горизонтальной прямой. Маятник находится в однородном поле тяжести. В качестве обобщенных координат принять координату x точки подвеса и угол φ между нитью маятника и вертикалью.
2. Вычислить скобки Пуассона $\{H, I\}$, где
$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{\alpha}{r}, \quad I = \frac{[p \times M]}{m} + \frac{\alpha r}{r}.$$
3. Функция Гамильтона гармонического осциллятора имеет вид: $H = p^2/2m + m\omega^2 q^2/2$. Написать функцию Гамильтона и уравнения Гамильтона в новых канонически сопряженных переменных P и Q , взяв в качестве производящей функции выражение $F_1(Q, q) = -\sqrt{2m\omega} Qq$. Решить уравнения Гамильтона в переменных P и Q и определить $p(t)$ и $q(t)$. Найти явный вид $P(p, q)$, $Q(p, q)$ и вычислением скобки Пуассона $\{P, Q\}_{p, q}$ убедиться, что преобразование каноническое.
4. Найти производящую функцию $F_1(X, Y, x, y)$ канонического преобразования, состоящего в переходе от переменных $x = x(t)$, $y = y(t)$, $p_x = p_x(t)$, $p_y = p_y(t)$ к переменным $X = x(t+\tau)$, $Y = y(t+\tau)$, $P_x = p_x(t+\tau)$, $P_y = p_y(t+\tau)$, где $\tau = \text{const}$, для материальной точки массы m в поле тяжести $U(x, y) = mgy$.

5. Составить уравнение Гамильтона-Якоби, определить его полный интеграл и найти закон движения $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ системы с функцией Гамильтона

$$H = \frac{1}{2}(p_1^2 + p_2^2 + p_3^2) + \frac{1}{4}q_1^2 - \frac{1}{2}q_2^2 + \frac{1}{q_3^2}$$

и начальными условиями

$$q_1(0) = q_2(0) = q_3(0) = 1, \dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 1, \dot{q}_3(0) = 0.$$

4. Критерии оценивания

Оценка	Баллы	Критерии
отлично	10	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	9	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	8	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.
хорошо	7	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.
	6	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.
	5	Выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.
удовлетворительно	4	Выставляется студенту, показавшему

		фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.
	3	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.
неудовлетворительно	2	Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.
	1	Выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности.

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется не менее 40 минут на подготовку. Опрос по билету и ответы на дополнительные вопросы не должен превышать двух астрономических часов. По завершении отведенного на опрос времени, экзаменатор должен выставить обучающемуся оценку в соответствии с вышеприведенными критериями.