

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Романчук Иван Сергеевич

Должность: Ректор

Дата подписания: 30.03.2023 12:01:17

Уникальный программный ключ:

6319edc2b582ffdacea443f01d5779368d0957ac34f5cd074d81181530452479

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

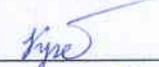
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

Физико-технического института

по учебной работе



« 23 » 06. 2021 г. С.А. Креков

МЕХАНИКА

**Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки**

03.03.02 Физика

Профиль: Фундаментальная физика

форма обучения: очная

Семихин В.И. Механика. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Семихин В.И., 2021.

1. Пояснительная записка

Механика — раздел физики, изучающий движение и взаимодействие материальных тел. Механика включает в себя три раздела:

- кинематика — раздел механики, изучающий движение тел вне связи с причинами, вызывающими это движение;
- статика — раздел механики, изучающий законы равновесия системы тел;
- динамика — раздел механики, изучающий законы движения тел и причины, которые вызывают или изменяют это движение.

Курс «Механика» состоит из лекционного блока, практических и лабораторных занятий.

Целью дисциплины является формирование у студентов представления о физической картине окружающего мира, понимание взаимосвязи различных физических явлений и процессов в окружающем мире, приобретение навыков правильного и осознанного проведения экспериментальных исследований, обращения с измерительными приборами и аппаратурой, корректной обработки экспериментальных данных, а также получение опыта в применении теоретических знаний в экспериментальной работе и в анализе любого получившегося в эксперименте результата.

Задачи дисциплины:

1. изучение основных законов классической механики;
2. изучение основ специальной теории относительности;
3. приобретение навыков решения задач механики;
4. получение навыков применения теоретического материала к анализу конкретных физических ситуаций, экспериментального наблюдения и изучения механических процессов, оценки точности и достоверности полученных результатов;
5. освоение современной измерительной аппаратуры, принципа её действия, с основными элементами техники безопасности при проведении экспериментальных исследований.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в блок Б1 Дисциплины (модули), обязательная часть.

Для успешного изучения дисциплины необходимы знания и умения, приобретаемые параллельно в результате освоения дисциплины «Математический анализ», а также знания, полученные в ходе обучения физике в школе.

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевые/функциональные)
ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	–	Знает фундаментальные разделы общей физики: кинематика, статика, динамика; современные концепции, достижения и ограничения естественных наук
		Умеет применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач; пользоваться прикладными методами расчета физико-математических моделей

ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	–	Знает методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах
		Умеет получать расчетные формулы для проведения научных исследований физических объектов; планировать и проводить эксперимент, обрабатывать его результаты, оценивать погрешность полученных результатов; работать с различными установками и измерительными инструментами

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			1 семестр
Общий объем	зач. ед.	8	8
	час	288	288
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		174	174
Лекции		32	32
Практические занятия		48	48
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		64	64
Консультации и иная контактная работа		30	30
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		114	114
Вид промежуточной аттестации			Экзамен

3. Система оценивания

3.1. При текущем контроле учитывается несколько видов деятельности обучающихся:

- активность на практических занятиях (0-5 баллов);
- самостоятельное решение задач дома и их разбор на практических занятиях (0-5 баллов);
- выполнение лабораторных работ: сдача обязательного допуска к выполнению практической части лабораторной работы (0-2 баллов), выполнение лабораторной работы и обработка полученных результатов (0-3 баллов), защита выполненной работы перед преподавателем в формате собеседования по контрольным вопросам (0-5 баллов).

Форма промежуточной аттестации в дисциплине — экзамен.

Экзамен возможно получить автоматически при освоении 65% материала: оценка «удовлетворительно» (количество баллов, полученных при освоении дисциплины на учебных встречах в семестре — 195).

Обязательным условием получение положительной оценки («удовлетворительно», «хорошо» или «отлично») за экзамен по дисциплине является защита 12 лабораторных работ; в ином случае студент автоматически получает оценку «неудовлетворительно».

Для получения отметки «хорошо» или «отлично» студент сдает экзамен в устно-письменной (устной) форме. От письменной части экзамена (решение трёх задач предложенного варианта) освобождаются студенты, успешно (более чем на 50%) решившие контрольные работы № 1, № 2 и № 3. При условии успешного решения только одной контрольной работы студент освобождается от одной задачи на экзамене по выбору

преподавателя, а также при успешном решении двух контрольных работ — от двух задач по выбору преподавателя.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
<i>Лекции и практические занятия</i>						
1.	Введение	4	2	0	0	0
2.	Кинематика материальной точки	12	4	4	0	0
3.	Пространство и время	6	2	0	0	0
4.	Динамика материальной точки	16	4	6	0	0
5.	Закон сохранения импульса	12	2	4	0	0
6.	Закон сохранения энергии	12	2	4	0	0
7.	Неинерциальные системы отсчета	6	2	2	0	0
8.	Основы специальной теории относительности	16	2	6	0	0
9.	Динамика твердого тела	18	2	6	0	0
10.	Основы механики деформируемых тел	6	2	0	0	0
11.	Колебательное движение	18	4	6	0	0
12.	Механика жидкостей и газов	12	2	6	0	0
13.	Волны в сплошной среде	8	2	4	0	0
Итого (часов, лекции и практические занятия)		146	32	48	0	0
<i>Лабораторные занятия</i>						
14.	Техника безопасности при работе в физической лабо-	8	0	0	8	0

	ратории. Определение плотности твердого тела					
15.	Изучение качения тела о наклонной плоскости как пример плоского движения	8	0	0	4	0
16.	Определение ускорения свободного падения с помощью обратного и математического маятника	8	0	0	4	0
17.	Определение скорости пули с помощью баллистического маятника	8	0	0	4	0
18.	Проверка основного закона динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека	8	0	0	4	0
19.	Изучение движения маятника Максвелла	8	0	0	4	0
20.	Определение момента инерции тела методом крутильных колебаний	8	0	0	4	0
21.	Изучение прецессии свободного гироскопа	8	0	0	4	0
22.	Определение модуля упругости твердого тела	8	0	0	4	0
23.	Определение модуля сдвига методом кручения	8	0	0	4	0
24.	Изучение затухающих колебаний	8	0	0	4	0
25.	Изучение вынужденных колебаний	8	0	0	4	0
26.	Проверка уравнения Бернулли	8	0	0	4	0
27.	Определение скорости звука в воздухе	8	0	0	8	0
Итого (часов, лабораторные занятия)		112	0	0	64	0
28.	Консультации	28	0	0	0	28

29.	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	288	32	48	64	30

4.2. Содержание дисциплины по темам

Лекции и практические занятия

1. «Введение»

- Предмет физики.
- Сочетание экспериментальных и теоретических методов в познании окружающей природы. Роль модельных представлений.
- Физические величины, их измерение и оценка точности и достоверности полученных результатов.

2. «Кинематика материальной точки»

- Способы описания движения.
- Закон движения.
- Линейная скорость и линейное ускорение.

На практических занятиях решаются задачи по темам:

- Кинематика поступательного движения.
- Криволинейное движение. Нормальное, тангенциальное и полное ускорения.
- Кинематика вращательного движения.

3. «Пространство и время»

- Свойства пространства и времени в классической механике.
- Принцип относительности и преобразования координат Галилея.
- Следствия из преобразования координат, закон сложения скоростей.
- Инварианты.

4. «Динамика материальной точки»

- Понятия массы, импульса и силы в механике Ньютона.
- Виды взаимодействия и свойства соответствующих им сил.
- Законы Ньютона.
- Система взаимодействующих материальных точек.
- Уравнение движения.

Темы задач для решения на практических занятиях:

- Законы Ньютона.
- Динамика вращательного движения материальной точки.

Контрольная работа № 1 по темам 2, 3, 4 практических занятий.

Примерные задачи контрольной работы № 1

1. Тело брошено под углом α к горизонту со скоростью v_0 . Каков максимальный радиус кривизны его траектории во время полета? Сопротивлением воздуха пренебречь.

2. Материальная точка движется по плоскости по закону $x = a \cos \omega t$, $y = b \sin \omega t$. Найти ускорение точки в момент первого пересечения ею оси Y .

5. «Закон сохранения импульса»

- Замкнутые системы материальных точек.
- Закон сохранения импульса замкнутой системы.
- Абсолютно упругое и неупругое взаимодействия.

На практических занятиях осуществляется решение задач на тему «Закон сохранения импульса».

6. «Закон сохранения энергии»

- Работа силы.
- Консервативные силы и потенциальные силовые поля.
- Критерий потенциальности.

Кинетическая и потенциальная энергия материальной точки и системы материальных точек.

- Движение тел с переменной массой.
- Уравнение Мещерского.
- Формула Циолковского.

Тема для решения задач на практических занятиях: «Работа сил. Закон сохранения энергии».

7. «Неинерциальные системы отсчета»

- Движение материальной точки в неинерциальной системе отсчета.
- Силы инерции, преобразование ускорений в классической механике.
- Вращающиеся системы отсчета.
- Переносное и Кориолисово ускорение.
- Центробежная и Кориолисова силы инерции.
- Законы сохранения.
- Принцип эквивалентности.

На практическом занятии необходимо решить задачи на тему: «Движение материальной точки в неинерциальных системах. Силы инерции».

8. «Основы специальной теории относительности»

- Принцип относительности постулаты Эйнштейна.
- Пространство и время в теории относительности.
- Преобразования координат Лоренца.
- Следствия из преобразования координат: относительность одновременности, сокращение длины движущихся отрезков и замедление хода движущихся часов.
- Закон сложения скоростей.
- Интервал, инвариантность интервала.
- Релятивистское уравнение движения.
- Релятивистская энергия, соотношение между массой и энергией.

На практических занятиях предлагаются для решения задачи на тему: «Кинематика теории относительности».

Контрольная работа № 2 по темам 5-8 практических занятий.

Примерные задачи контрольной работы № 2

1. Шайба пущена по поверхности льда с начальной скоростью $v_0 = 20$ м/с. Коэффициент трения равен 0,05. Через какое время шайба остановится и какое расстояние пройдет до остановки?

2. Вычислить работу A , совершаемую на пути $S = 12$ м равномерно возрастающей силой от $F_1 = 10$ Н в начале пути до $F_2 = 46$ Н в конце пути.

3. Шар массой $m_1 = 200$ г, движущийся со скоростью $v_1 = 10$ м/с, ударяет неподвижный шар массой $m_2 = 800$ г. Удар прямой, центральный, абсолютно упругий. Определить скорости шаров после столкновения.

9. «Динамика твердого тела»

- Момент силы относительно точки и оси.
- Момент импульса.
- Закон динамики вращательного движения.
- Момент инерции.
- Теорема Штейнера.
- Понятие о тензоре инерции, оси свободного вращения.

Темы для решения задач на практических занятиях:

- Основной закон динамики вращательного движения.
- Вычисление моментов инерции тел.
- Закон сохранения момента импульса.
- Плоское движение твердого тела. Закон сохранения энергии.

10. «Основы механики деформируемых тел»

- Виды деформаций и их количественные характеристики.
- Закон Гука.
- Упругие характеристики материалов: модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона.
- Энергия упругих деформаций.

На практических занятиях решаются задачи на тему «Закон Гука».

11. «Колебательное движение»

- Кинематика гармонических колебаний.
- Динамика гармонических колебаний, уравнение гармонического осциллятора.
- Принцип суперпозиции.
- Сложение гармонических колебаний одинакового направления.
- Сложение взаимно перпендикулярных колебаний, фигуры Лиссажу.
- Затухающие колебания.
- Логарифмический декремент затухания и добротность.

На практических занятиях студентам предоставляются задачи на темы:

- Кинематика и динамика гармонических колебаний.
- Сложение колебаний.
- Затухающие колебания.
- Вынужденные колебания. Резонанс.

12. «Механика жидкостей и газов»

- Основные свойства жидкостей и газов.
- Законы гидростатики.
- Стационарное течение жидкости, линии и трубки тока.
- Уравнение неразрывности.
- Уравнение Бернулли.
- Стационарное течение вязкой жидкости.
- Формула Пуазейля.
- Уравнение Эйлера.
- Движение тел в жидкостях и газах, силы трения.

Темы для решения задач на практических занятиях:

- Основные законы гидростатики.
- Законы гидродинамики. Уравнение Бернулли.

13. «Волны в сплошной среде»

- Волны в жидкостях и газах.
- Волновое уравнение. Уравнение плоской волны.
- Характеристики волнового движения: длина волны, скорость распространения, период, частота.

- Граничные условия. Стоячие волны на струне, в стержне, в столбе газа.
- Нормальные колебания.
- Акустические резонаторы.
- Поток энергии в бегущей волне. Вектор Умова.
- Ультразвук. Применение в науке и технике.

На практических занятиях рассматриваются задачи на темы:

- Бегущие волны. Эффект Доплера.
- Стоячие волны. Моды и нормальные частоты.

Контрольная работа № 3 по темам 9-13 практических занятий.

Примерные задачи контрольной работы № 3

1. За время $t = 3$ мин амплитуда затухающих колебаний уменьшилась в 3 раза. Определить коэффициент затухания β .

2. Тело массой 10 г совершает затухающие колебания с начальной амплитудой 7 см, начальной фазой, равной 0, и коэффициентом затухания $\beta = 1,6 \text{ сек}^{-1}$. Уравнение

вынужденных колебаний этого же тела имеет вид $X(t) = 5 \sin(10\pi t - 0,75\pi)$. Записать уравнение собственных колебаний, затухающих колебаний и уравнение для внешней периодической силы.

3. Найти период малых колебаний шарика радиусом R , висящего на нитке длиной $4R$.

Лабораторные занятия

14. «Техника безопасности при работе в физической лаборатории. Определение плотности твердого тела»

Лабораторная работа № 1. Студенты знакомятся с правилами техники безопасности при нахождении в физической лаборатории и при выполнении лабораторных работ; изучают основы математической обработки результатов измерения. Определяют плотность твердого тела.

15. «Изучение качения тела о наклонной плоскости как пример плоского движения»

Лабораторная работа № 2. Используя основные кинематические формулы и измеряя дальность полета тела, обучающиеся определяют скорость тела в конце наклонной плоскости и сравнивают со скоростью, полученной из уравнений динамики вращательного движения.

16. «Определение ускорения свободного падения с помощью обратного и математического маятника»

Лабораторная работа № 3. Изменяя период колебания математического и физического маятников, студенты определяют ускорение свободного падения.

17. «Определение скорости пули с помощью баллистического маятника»

Лабораторная работа № 4. Изменяя угол отклонения при выстреле и период колебаний маятника, а также используя законы сохранения, студенты вычисляют скорость пули.

18. «Проверка основного закона динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека»

Лабораторная работа № 5. Лабораторная работа состоит из трех упражнений. На основании результатов первых двух упражнений в третьем упражнении проверяется теорема Штейнера.

19. «Изучение движения маятника Максвелла»

Лабораторная работа № 6. Работа посвящена изучению вращательного движения твердого тела на примере плоского движения. Изменяя время падения колец с разной массой, определяется момент инерции каждого кольца. Сопоставляются полученные из эксперимента результаты с теоретическими.

20. «Определение момента инерции тела методом крутильных колебаний»

Лабораторная работа № 7. Изменяя периоды колебаний рамки с закрепленным твердым телом, студенты определяют моменты инерции твердого тела относительно различных осей вращения.

21. «Изучение прецессии свободного гироскопа»

Лабораторная работа № 8. Целью работы является исследование прецессионного движения гироскопа и проверка уравнения моментов для вращательного движения.

22. «Определение модуля упругости твердого тела»

Лабораторная работа № 9. На примере деформации изгиба деревянного стержня проверяется закон Гука и вычисляется модуль Юнга.

23. «Определение модуля сдвига методом кручения»

Лабораторная работа № 10. На примере деформации кручения стального стержня проверяется закон Гука и определяется модуль сдвига.

24. «Изучение затухающих колебаний»

Лабораторная работа № 11. В процессе проведения данной лабораторной работы определяются все основные характеристики затухающих колебаний.

25. «Изучение вынужденных колебаний»

Лабораторная работа № 12. Целью данной лабораторной работы является снятие резонансной кривой и определение добротности колебательной системы.

26. «Проверка уравнения Бернулли»

Лабораторная работа № 13. Целью данной лабораторной работы является экспериментальное изучение основных законов гидростатики и проверка уравнения Бернулли.

27. «Определение скорости звука в воздухе»

Лабораторная работа № 14. Целью данной лабораторной работы является изучение бегущих и стоячих звуковых волн и экспериментальная проверка отсутствия дисперсии звуковых волн.

Выделяется время для сдачи студентами задолженности по практикуму.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
<i>Лекции и практические занятия</i>		
1.	Введение	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций
2.	Кинематика материальной точки	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
3.	Пространство и время	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
4.	Динамика материальной точки	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
5.	Закон сохранения импульса	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
6.	Закон сохранения энергии	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
7.	Неинерциальные системы отсчета	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
8.	Основы специальной теории относительности	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
9.	Динамика твердого тела	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
10.	Основы механики деформируемых тел	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
11.	Колебательное движение	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
12.	Механика жидкостей и газов	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
13.	Волны в сплошной среде	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, решение задач
<i>Лабораторные занятия</i>		
14.	Техника безопасности при работе в физической лаборатории. Определение плотности твердого тела	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
15.	Изучение качения тела о наклонной плоскости как пример плоского движения	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе

16.	Определение ускорения свободного падения с помощью обратного и математического маятника	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
17.	Определение скорости пули с помощью баллистического маятника	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
18.	Проверка основного закона динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
19.	Изучение движения маятника Максвелла	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
20.	Определение момента инерции тела методом крутильных колебаний	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
21.	Изучение прецессии свободного гироскопа	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
22.	Определение модуля упругости твердого тела	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
23.	Определение модуля сдвига методом кручения	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
24.	Изучение затухающих колебаний	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
25.	Изучение вынужденных колебаний	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
26.	Проверка уравнения Бернулли	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе
27.	Определение скорости звука в воздухе	Чтение основной и дополнительной литературы, проработка лекций, подготовка отчета по лабораторной работе

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Форма промежуточной аттестации — экзамен.

Экзамен включает устную часть — ответ по экзаменационному билету, и письменную часть — решение задач. Устная часть экзамена оценивает полученные знания по дисциплине путем собеседования с преподавателем по вопросам билета.

Качество знаний студентов, полученных по ходу освоения дисциплины, оцениваются по следующим критериям:

- «отлично»: студент дал полный ответ на теоретические вопросы, правильно решил задачу, продемонстрировал взаимосвязь теоретических основ кинематики, статики, динамики и практики;
- «хорошо»: студент показал систематические знания по дисциплине, способность применять их для решения практических задач, но имеются недочеты в ответах и решениях;

- «удовлетворительно»: студент имеет представление о законах механики и применении их в практике, недостаточно владеет теоретическими основами механики, в ответах и решениях допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;
- «неудовлетворительно» – студент не имеет систематических знаний в области механики, слабо разбирается в практических вопросах и др., допускает принципиальные ошибки в ответах и решениях.

Задачи для подготовки к экзамену:

Вариант 1

1. На цилиндр, который может вращаться около горизонтальной оси, намотана нить. К концу нити привязали грузик и предоставили ему возможность опускаться. Двигаясь равноускоренно, грузик за время $t = 3,5$ с опустился на $H = 1,5$ м. Определить угловое ускорение цилиндра, если его радиус $R = 3,5$ см.
2. Камень брошен вверх под углом $\alpha = 60^\circ$ к горизонту. Кинетическая энергия камня в начальный момент времени равна 20 Дж. Определить кинетическую и потенциальную энергию камня в высшей точке его траектории. Соппротивлением воздуха пренебречь.
3. Найти добротность осциллятора, у которого собственная частота $\omega_0 = 100$ с⁻¹, а время релаксации $\tau = 0,1$ с.

Вариант 2

1. Тело брошено под углом α к горизонту со скоростью v_0 . Каков максимальный радиус кривизны его траектории во время полета? Соппротивлением воздуха пренебречь.
2. Вычислить работу, совершаемую при равноускоренном подъеме груза массой $m = 100$ кг на высоту $H = 4$ м за время $t = 2$ с.
3. Точка одновременно колеблется вдоль осей X и Y с одинаковой амплитудой и частотой. Получить уравнение траектории точки при разности фаз π и 2π . Изобразить вид траекторий движения.

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Поступательное движение. Перемещение, скорость, ускорение. Обратная задача.
2. Криволинейное движение, нормальное, тангенциальное и полное ускорение.
3. Вращательное движение. Угловое смещение, скорость, ускорение.
4. Принцип относительности Галилея, преобразование координат, следствия из преобразования координат Галилея.
5. Законы динамики Ньютона. Движение системы материальных точек.
6. Закон сохранения импульса. Нецентральный удар.
7. Работа в потенциальном силовом поле. Критерий потенциальности. Потенциальная энергия.
8. Кинетическая энергия. Закон сохранения энергии.
9. Принцип относительности Эйнштейна. Относительность одновременности.
10. Преобразование координат в теории относительности.
11. Сокращение длины при движении с большими скоростями.
12. Замедление хода движущихся часов. Собственное время.
13. Сложение скоростей в теории относительности.
14. «Поперечная» и «продольная» массы. Релятивистское уравнение движения.
15. Полная энергия релятивистской частицы и энергии покоя. Кинетическая энергия.
16. Вращательное движение. Момент сил относительно точки и относительно оси.
17. Основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела.
18. Момент инерции. Вычисление момента инерции диска и шара.
19. Кинетическая энергия вращающегося тела. Полная кинетическая энергия движущегося тела.
20. Физический маятник, математический маятник.

21. Момент импульса, закон сохранения момента импульса.
22. Понятие о тензоре инерции. Свободные оси.
23. Гироскопы. Прецессия гироскопа. Гироскопический маятник.
24. Закон всемирного тяготения. Энергия гравитационного взаимодействия.
25. Законы Кеплера.
26. Первая, вторая и третья космические скорости.
27. Силы инерции в поступательно движущейся неинерциальной системе отсчета.
28. Силы инерции во вращающихся системах отсчета. Центробежная сила инерции.
29. Сила инерции Кориолиса. Кориолисово ускорение.
30. Кинематика гармонических колебаний.
31. Динамика гармонических колебаний. Уравнение гармонического осциллятора.
32. Энергия гармонических колебаний.
33. Сложение гармонических колебаний одинакового направления. Векторные диаграммы.
34. Сложение гармонических колебаний с близкими частотами. Биения.
35. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу.
36. Затухающие колебания.
37. Вынужденные колебания. Резонанс.
38. Амплитудная и фазовая резонансные кривые.
39. Параметрические колебания, параметрический резонанс.
40. Движение тел переменной массы, уравнение Мещерского.
41. Формула Циолковского.
42. Общие свойства жидкостей и газов.
43. Уравнение динамики для жидкостей и газов.
44. Законы гидростатики.
45. Ламинарное и турбулентное течение жидкости. Уравнение Бернулли.
46. Течение вязкой жидкости. Закон Пуазейля.
47. Волны в сплошной среде. Волновое уравнение.
48. Плоские волны. Поперечные и продольные волны.
49. Интерференция волн. Стоячие волны.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.): <i>Знает:</i> основные понятия, законы и формулы механики. <i>Умеет:</i> применять фундаментальные законы механики к решению задач теоретического, экспериментального и прикладного характера.</p> <p>Базовый уровень (хор.): <i>Знает:</i> основные понятия, законы и формулы механики, условия их применимости. <i>Умеет:</i> применять фундаментальные законы механики к решению задач теоретического, экспериментального и прикладного характера, выполнять физические измерения и оценивать получаемые результаты.</p> <p>Повышенный уровень (отл.): <i>Знает:</i> основные понятия, законы и формулы механики, условия их применимости, их теоретическое и экспериментальное обоснование. <i>Умеет:</i> применять фундаментальные законы механики к решению задач теоретического, экспериментального и прикладного характера, выполнять физические измерения и оценивать получаемые результаты, обосновывать методику физических измерений и оценивать их погрешность.</p>	Отчеты по лабораторным работам, контрольные вопросы к лабораторным работам	<p>Качество подготовки допуски к лабораторной работе. Полнота и правильность устных ответов на дополнительные вопросы преподавателя о работе лабораторной установки. Правильность снятия измерений с соблюдением необходимых условий. Приведение уравнений, необходимых для расчетов. Правильность расчетов погрешности. Формулировка вывода к работе. Полнота и правильность ответов на контрольные вопросы к лабораторным работам.</p>
2.	ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и	<p>Пороговый уровень (удовл.): <i>Знает:</i> основы эксплуатации физической и аналитической аппаратуры для проведения исследований.</p>	Контрольные работы, отчеты по лабораторным работам, контрольные во-	<p>Активность на практических занятиях. Правильность решений задач на прак-</p>

	представлять экспериментальные данные	<p>Умеет: пользоваться и выполнять простые операции на физическом и аналитическом оборудовании.</p> <p>Базовый уровень (хор.): Знает: основы эксплуатации физической, аналитической и технологической аппаратуры для проведения исследований; некоторые методы исследований технологических процессов, явлений.</p> <p>Умеет: проводить учебные исследования процессов, явлений с помощью физической, аналитической и технологической аппаратуры.</p> <p>Повышенный уровень (отл.): Знает: основы профессиональной эксплуатации физической, аналитической и технологической аппаратуры для проведения исследований; эффективные методы исследований технологических процессов, явлений.</p> <p>Умеет: проводить учебно-научные исследования процессов, явлений с помощью физической, аналитической и технологической аппаратуры.</p>	просы к лабораторным работам	<p>тических задачах и в контрольных работах. Указание всех необходимых формул при решении контрольных работ. Демонстрация причинно-следственных связей при ответах на вопросы преподавателя.</p> <p>Правильность интерпретации физических законов.</p>
--	---------------------------------------	---	------------------------------	--

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

1. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: учебное пособие для вузов: в 5 томах. Том 1: Механика / Сивухин Д.В. — 6-е изд., стер. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. — 560 с. Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/470189> (дата обращения: 13.05.2021).

2. Зоммерфельд, А. Механика / А. Зоммерфельд; перевод Т.Е. Тамм; под редакцией Д.В. Сивухина. — 2-е изд. — Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. — 368 с. Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/92052.html> (дата обращения: 13.05.2021).

7.2. Дополнительная литература:

1. Основы механики: учебное пособие / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, В.Я. Мищенко, Е.Н. Политов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 248 с. Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/1003404> (дата обращения 13.05.2021).

2. Гринберг, Я.С. Механика / Я.С. Гринберг, Э.А. Кошелев. — Новосибирск: НГТУ, 2013. — 140 с. Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/546363> (дата обращения 13.05.2021).

3. Дубровский, В.Г. Механика, термодинамика и молекулярная физика: сборник задач и примеры их решения / В.Г. Дубровский, Г.В. Харламов. — Новосибирск: НГТУ, 2010. — 176 с. Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/546145> (дата обращения 13.05.2021).

4. Григорьев, Б.В. Основы математической обработки результатов физико-технических измерений: учебно-методическое пособие для студентов естественно-научных направлений / Б.В. Григорьев, С.Г. Никулин, Е.В. Зайцев; Тюм. гос. ун-т, Физ.-тех. ин-т, Каф. расходомерии нефти и газа. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2018. — 32 с. Режим доступа: https://library.utmn.ru/dl/PPS/Grigoryev_Nikulin_Zaytsev_649_UMP_2017.pdf (дата обращения: 13.05.2021).

5. Врублевская, Г.В. Физика. Практикум: учебное пособие / Г.В. Врублевская, И.А. Гончаренко, А.В. Ильющонок [и др.]. — Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. — 286 с. Режим доступа: <https://znanium.com/catalog/product/252334> (13.05.2021).

7.3. Интернет-ресурсы:

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

eLIBRARY — научная библиотека (г. Москва). — <http://elibrary.ru>

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:
платформа для электронного обучения Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекционных и практических занятий требуется аудитория, оснащенная учебной мебелью и аудиторной магнитно-маркерной доской.

Для проведения лабораторных занятий требуется Лаборатория механики и молекулярной физики, оснащенная учебной мебелью, аудиторной доской, необходимым оборудованием, материалами и учебно-методической литературой. Во время проведения занятий в лаборатории необходим инженер.

Специализированное оборудование:

- инструментарий для выполнения лабораторной работы №1 «Определение плотности твёрдого тела»: штангенциркуль, микрометр; весы; набор образцов твердых тел;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №2 «Изучение качения тела по наклонной плоскости как пример плоского движения»: массивная платформа с наклонной плоскостью и металлической рамкой; три металлических предмета (шарик, цилиндр и цилиндр с отверстием), измерительная линейка;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №3 «Определение ускорения свободного падения с помощью оборотного и математического маятника»: универсальный маятник FPM-04, электронный миллисекундомер;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №4 «Определение скорости пули с помощью баллистического маятника»: горизонтальная платформа с вертикальными стойками, электронный миллисекундомер, баллистический маятник, средний кронштейн, пружинный пистолет, прозрачный экран со шкалой и фотоэлектрический датчик, стальная проволока;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №5 «Проверка основного закона динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека»: электронный миллисекундомер, маятник Обербека, шкиф с намотанной нитью, к концу которой привязана платформа, грузики, штангенциркуль;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №6 «Изучение движения маятника Максвелла»: электронный миллисекундомер, вертикальная стойка с линейной шкалой: верхний кронштейн с электромагнитом и крепёжные детали для нитей, два фотодатчика (верхний и нижний), маятник Максвелла, стальные кольца с прорезью для нитей разных масс (3 шт.);
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №7 «Определение момента инерции тела методом крутильных колебаний»: электронный миллисекундомер, вертикальная стойка с верхним и нижним кронштейном, стальная проволока с рамкой, средний кронштейн со шкалой, электромагнитом, фотоэлектрическим датчиком, блок питания, набор разных тел;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №8 «Изучение прецессии свободного гироскопа»: электронный миллисекундомер, блок управления, стойка, гироскоп, рычаг с грузиком, диск с угловой шкалой;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №9 «Определение модуля упругости твёрдого тела»: А-образные стойки, индикатор часового типа, стержень, стремя с призмой, набор грузов, измерительная линейка;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №10 «Определение модуля сдвига методом кручения»: стержень, неподвижная муфта, вал, угломерное устройство, микрометр, нить с платформой, набор грузов;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №11 «Изучения затухающих колебаний»: универсальный маятник FPM-04 с измененной конструкцией физического маятника, электронный миллисекундомер;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №12 «Изучение резонанса вынужденных колебаний»: установка FRM-13, электронный миллисекундомер;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №13 «Проверка уравнения Бернулли»: микрокомпрессор, трубка переменного сечения из оргстекла, платформа, зонд, два съёмных наконечника, микроанометр, термометр, барометр;
- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №14 «Определение скорости звука в воздухе»: труба, подвижный приёмник, звуковой генератор ГЗ-33, электронный осциллограф С1-83.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


_____ С.А. Креков
23.06.2021

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки
03.03.02 Физика
Профиль: Фундаментальная физика
форма обучения: очная

Шастунова Ульяна Юрьевна. Молекулярная физика. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Шастунова Ульяна Юрьевна, 2021.

1. Пояснительная записка

Курс «Молекулярная физика», читаемый во 2 семестре после раздела «Механика», представляет собой один из разделов курса общей физики. Он излагается на младших курсах и его главной задачей является создание фундаментальной базы знаний, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение всех разделов физики в рамках цикла курсов по теоретической физике и специализированных курсов.

Основной формой изложения материала курса являются лекции. Как правило, на лекции выносятся 85% - 95% материала изложенного в программе курса. Остальные 5% - 15% материала выносятся для самостоятельного изучения студентами с непременным сообщением им литературных источников и методических разработок. Важнейшей составной частью лекций по молекулярной физике является использование реальных и компьютерных физических экспериментов, учебных фильмов, модельных компьютерных программ.

Наиболее важные разделы программы курса выносятся на практические занятия. Как правило, на семинарах рассматривают фрагменты теории, требующие сложных математических выкладок, различные методы решения задач и наиболее типичные задачи. Для закрепления материала, рассматриваемого на семинарах, студенты получают домашние задания в виде ряда задач из соответствующих задачников.

Цель дисциплины – ознакомить студентов с теоретическими и экспериментальными методами изучения молекулярных систем, их свойств, моделей и происходящих в них явлениях, подготовить студентов к изучению последующих разделов общей и теоретической физики.

Задачи дисциплины:

- сформировать у студентов представления о методах изучения и особенностях молекулярных систем;
- обеспечить усвоение материала данного курса и овладение студентами методами решения задач;
- создать базу для изучения последующих разделов общей и теоретической физики, в частности термодинамики и статистической физики;
- формирование у студентов научного мышления, умения видеть естественно – научное содержание проблем, возникающих в практической деятельности специалиста.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Молекулярная физика» – это дисциплина обязательной части блока Б1 Дисциплины (модули).

При изучении курса используются знания, полученные студентами при изучении математики и физики в средней школе, а также дисциплины «Механика» и курса математического анализа первого и второго семестра 1 курса.

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевые/функциональные)
ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	–	Знает – фундаментальные разделы общей и теоретической физики; – современные концепции, достижения и ограничения молекулярной физики.
		Умеет – выделять/ставить задачи, решаемые в рамках доступных приближений и ресурсов; – пользоваться прикладными методами расчёта физико-математических моделей; – получать расчётные формулы для различных установок и систем.
ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	–	Знает – основные понятия, законы и формулы молекулярной физики, их теоретическое и экспериментальное обоснование; – методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах.
		Умеет – применять физические законы и расчётные формулы при решении конкретных задач; – получать расчётные формулы для различных установок и систем; – работать с различными установками и измерительными инструментами.

2. Структура и объём дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			2 семестр
Общий объём	зач. ед.	8	8
	час	288	288
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		184	184
Лекции		34	34
Практические занятия		52	52
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		30	30
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		104	104
Вид промежуточной аттестации			экзамен

3. Система оценивания

3.1. При текущем контроле учитывается несколько видов деятельности обучающихся:

- работа в аудитории на практических занятиях (0-5 баллов за занятие);
- работа на лекции (0-1 балл за занятие);
- решение контрольных работ (0-30 баллов за одну контрольную работу);
- выполнение лабораторных работ (0-3 баллов за одну лабораторную работу).

Преподаватель имеет право использовать систему штрафов, уменьшая набранные баллы за пропуски занятий без уважительных причин, за нарушение сроков выполнения учебных заданий, за систематический отказ отвечать на занятиях и т.д. Возможно также начисление премиальных баллов за работы, выполненные студентом на высоком уровне.

Форма промежуточной аттестации по дисциплине «Молекулярная физика» — экзамен. Экзамен возможно получить автоматически, при усвоении:

65% материала — оценка "удовлетворительно" (количество баллов, полученных при усвоении дисциплины на учебных встречах в семестре — 65);

80% материала — оценка "хорошо" (количество баллов, полученных при усвоении дисциплины на учебных встречах в семестре — 80).

Если студент претендует на отметку "отлично", то он сдает экзамен.

Обязательным условием сдачи экзамена на "отлично" — это защита всех лабораторных работ и написание всех контрольных работ по дисциплине.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов.	34	4	8	10	0
2.	Термодинамический метод в молекулярной физике	34	4	8	10	0
3.	Статистический метод в молекулярной физике	30	4	6	8	0
4.	Процессы переноса в идеальных газах. Уравнения диффузии и теплопроводности. Явления переноса в разреженных газах.	30	4	6	8	0
5.	Реальные газы	30	4	6	8	0

6.	Фазовые переходы I и II рода	30	4	6	8	0
7.	Конденсированные состояния вещества	30	4	6	8	0
8.	Капиллярные явления	30	4	6	8	0
9.	Растворы и их свойства	10	2	0	0	0
	Консультации по дисциплине	28	0	0	0	28
	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	288	34	52	68	30

4.2. Содержание дисциплины по темам

Лекции

Тема 1. Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов

Предмет молекулярной физики. Методы описания молекулярных систем. Модель идеального газа. Уравнение Клапейрона-Менделеева. Абсолютная шкала температур. Эмпирические шкалы температур. Смеси газов. Закон Авогадро и Дальтона. Движение броуновской частицы как подтверждение непрерывности и хаотичности движения молекул.

Тема 2. Термодинамический метод в молекулярной физике

Термодинамические параметры. Понятие термодинамического равновесия и нулевое начало термодинамики.

Первое начало термодинамики. Работа. Теплота. Внутренняя энергия. Функции состояния и полные дифференциалы. Процессы в идеальных газах. Изменения термодинамических параметров в процессах идеальных газов. Теплоемкость. Классическая теория теплоемкости.

Циклические процессы и тепловые машины. Работа цикла. КПД цикла. Цикл Карно. Тепловые и холодильные машины. Теоремы Карно.

Второе начало термодинамики. Формулировки Кельвина, Клаузиуса и Карно. Их эквивалентность. Неравенство Клаузиуса.

Энтропия и ее изменение в различных процессах. Формулировка второго начала с помощью понятия энтропии.

III начало термодинамики. Следствия из III начала термодинамики. Доказательство недостижимости абсолютного нуля.

Термодинамические функции. Устойчивость систем.

Тема 3. Статистический метод в молекулярной физике

Основные понятия теории вероятности. Сложение и умножение вероятностей. Средние значения дискретной и непрерывно меняющейся величины. Понятие о флуктуациях. Относительная величина флуктуаций.

Распределение Больцмана. Понятие об отрицательной абсолютной температуре.

Распределение Максвелла по компонентам скоростей и по скоростям. Наиболее вероятная и средне арифметическая скорость молекул. Поток молекул в данном направлении.

Статистический характер энтропии и второго начала термодинамики.

Тема 4. Процессы переноса в идеальных газах

Обобщенное уравнение переноса. Поток энергии, импульса, массы. Связь между коэффициентами переноса для идеальных газов.

Уравнения диффузии и теплопроводности. Стационарные и нестационарные задачи теплопроводности. Краевые и начальные условия. Решение задач теплопроводности в системах с цилиндрической и сферической симметрией.

Явления переноса в разреженных газах. Определение вакуума. Диффузия через пористую перегородку.

Тема 5. Реальные газы

Силы межмолекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Фазовый переход газ-жидкость и область двухфазных состояний. Критическая температура. Свойства вещества при критической температуре. Приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса. Термодинамические параметры и термодинамические процессы в реальных газах.

Тема 6. Фазовые переходы I и II рода

Условия равновесия фаз. Изменение потенциала Гиббса и его производных при фазовых переходах I и II рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса для фазовых переходов I рода. Фазовые диаграммы. Примеры фазовых переходов I и II рода.

Тема 7. Конденсированные состояния вещества

Тепловое движение молекул в газах, жидкостях и твердых телах. Понятие о структуре жидких и твердых тел. Радиальные функции распределения молекул в газах, жидкостях и твердых телах. «Газоподобность» и «твердоподобность» жидкостей.

Сопоставление явлений переноса в газах, жидкостях и твердых телах. Ньютоновские и неньютоновские жидкости.

Тема 8. Капиллярные явления

Поверхностное натяжение жидкостей и твердых тел. Термодинамика поверхностного натяжения жидкостей. Лапласовское давление. Явления смачивания и растекания. Уравнение Юнга.

Испарение и кипение жидкостей. Давление пара над плоской и искривленной поверхностью жидкости. Перегретая жидкость и переохлажденный пар.

Тема 9. Растворы и их свойства

Растворимость. Закон Рауля. Закон Генри. Диаграммы состояния растворов. Кипение растворов с нелетучим и летучим компонентом. Диаграммы состояния бинарных смесей. Осмотическое давление. Поверхностное натяжение растворов.

Практические занятия

1. Решение задач на процессы в идеальных газах и их смесях с использованием уравнения Клапейрона-Менделеева.

2. Решение задач по расчету работы, теплоты, изменений внутренней энергии газа и теплоемкости в различных процессах.

3. Решение задач по расчету КПД циклических процессов и тепловых машин.

4. Решение задач по расчету изменений энтропии в различных процессах.

Контрольная работа № 1 по темам 1-4.

5. Решение задач на функцию распределения Больцмана.

6. Решение задач на функции распределения Максвелла по компонентам скоростей и по скоростям.

7. Решение задач на расчет длины свободного пробега, число столкновений молекул в идеальных газах, коэффициентов переноса в идеальных газах.

8. Решение задач на уравнение теплопроводности и расчету распределения температуры внутри и вокруг нагретых тел различной симметрии.

Контрольная работа № 2 по темам 5-8.

9. Решение задач по процессам в реальных газах с использованием уравнения Ван-дер-Ваальса.

10. Решение задач по расчетам изменений внутренней энергии, теплоты и работы в процессах реальных газов.

11. Решение задач по расчетам изменений параметров систем с фазовыми переходами.

12. Решение задач на свойства конденсированного состояния вещества, поверхностного натяжения жидкостей и Лапласовское давление.

Контрольная работа № 3 по темам 9-12.

Проверка освоения дисциплины по тестам на знание формул и задач.

Лабораторные работы

Основными формами контроля знаний являются допуск к выполнению работы, предварительный и окончательный отчеты преподавателю при выполнении и сдача каждой лабораторной работы (беседа с преподавателем).

Перед выполнением лабораторной работы студенты должны ознакомиться с методическими рекомендациями по данной работе, которые содержат необходимые теоретические сведения, описание установки и последовательность выполнения заданий и обработки полученных результатов, а также список рекомендуемой литературы и перечень контрольных вопросов для самостоятельной подготовки.

Студент в течение семестра, изучая дисциплину, должен выполнить установленные лабораторные работы (минимум 12). Для этого на вводном занятии преподаватель устанавливает индивидуальный порядок выполнения лабораторных работ для каждого студента (с целью пересечения студентов на одной лабораторной работе).

Тема 1. Знакомство с измерительной аппаратурой

Знакомство с измерительной аппаратурой практикума по молекулярной физике и техникой безопасности при его выполнении.

Тема 2. Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов

Предмет молекулярной физики. Методы описания молекулярных систем. Модель идеального газа. Уравнение Клапейрона-Менделеева. Абсолютная шкала температур. Эмпирические шкалы температур. Смеси газов. Закон Авогадро и Дальтона. Движение броуновской частицы как подтверждение непрерывности и хаотичности движения молекул.

Лабораторные работы по теме 2:

Лабораторная работа № 1. Определение плотности и молярной массы воздуха

Лабораторная работа № 2. Методы определения и поддержания температуры

Тема 3. Термодинамический метод в молекулярной физике

Термодинамические параметры. Понятие термодинамического равновесия и нулевое начало термодинамики.

Первое начало термодинамики. Работа. Теплота. Внутренняя энергия. Функции состояния и полные дифференциалы. Процессы в идеальных газах. Изменения термодинамических параметров в процессах идеальных газов. Теплоемкость. Классическая теория теплоемкости.

Циклические процессы и тепловые машины. Работа цикла. КПД цикла. Цикл Карно. Тепловые и холодильные машины. Теоремы Карно.

Второе начало термодинамики. Формулировки Кельвина, Клаузиуса и Карно. Их эквивалентность. Неравенство Клаузиуса.

Энтропия и ее изменение в различных процессах. Формулировка второго начала с помощью понятия энтропии.

III-начало термодинамики. Следствия из III-начала термодинамики. Доказательство недостижимости абсолютного нуля.

Термодинамические функции. Устойчивость систем.

Лабораторные работы по теме 3:

Лабораторная работа № 3. Определение отношения теплоемкостей C_p/C_v методом Клемана и Дезорма

Лабораторная работа № 4. Измерение скорости звука в газах и определение числа степеней свободы молекул

Тема 4. Статистический метод в молекулярной физике

Основные понятия теории вероятности. Сложение и умножение вероятностей. Средние значения дискретной и непрерывно меняющейся величины. Понятие о флуктуациях. Относительная величина флуктуаций.

Распределение Больцмана. Понятие об отрицательной абсолютной температуре.

Распределение Максвелла по компонентам скоростей и по скоростям. Наиболее вероятная и среднеарифметическая скорость молекул. Поток молекул в данном направлении.

Статистический характер энтропии и второго начала термодинамики.

Лабораторные работы по теме 4:

Лабораторная работа № 5. Изучение распределения Максвелла-Больцмана для термоэлектронов

Тема 5. Процессы переноса в идеальных газах

Обобщенное уравнение переноса. Поток энергии, импульса, массы. Связь между коэффициентами переноса для идеальных газов.

Уравнения диффузии и теплопроводности. Стационарные и нестационарные задачи теплопроводности. Краевые и начальные условия. Решение задач теплопроводности в системах с цилиндрической и сферической симметрией.

Явления переноса в разреженных газах. Определение вакуума. Диффузия через пористую перегородку.

Лабораторные работы по теме 5:

Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента внутреннего трения, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха

Лабораторная работа № 7. Определение коэффициента теплопроводности воздуха

Лабораторная работа № 8. Определение коэффициента диффузии молекул воды в воздухе

Тема 6. Реальные газы

Силы межмолекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Фазовый переход газ-жидкость и область двухфазных состояний. Критическая температура. Свойства вещества при критической температуре. Приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса. Термодинамические параметры и термодинамические процессы в реальных газах.

Лабораторные работы по теме 6:

Лабораторная работа № 9. Определение критической температуры

Тема 7. Фазовые переходы I и II рода

Условия равновесия фаз. Изменение потенциала Гиббса и его производных при фазовых переходах I и II рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса для фазовых переходов I рода. Фазовые диаграммы. Примеры фазовых переходов I и II рода.

Лабораторные работы по теме 7:

Лабораторная работа № 10. Изучение температурной зависимости давления насыщенных паров и определение открытой теплоты испарения

Лабораторная работа № 11. Определение влажности воздуха

Лабораторная работа № 12. Определение удельной теплоты плавления и теплоемкости парафина

Тема 8. Капиллярные явления

Поверхностное натяжение жидкостей и твердых тел. Термодинамика поверхностного натяжения жидкостей. Лапласовское давление. Явления смачивания и растекания. Уравнение Юнга.

Испарение и кипение жидкостей. Давление пара над плоской и искривленной поверхностью жидкости. Перегретая жидкость и переохлажденный пар.

Лабораторные работы по теме 8:

Лабораторная работа № 13. Определение поверхностного натяжения жидкости капельным методом

Лабораторная работа № 14. Определение краевых углов смачивания

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1.	Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
2.	Термодинамический метод в молекулярной физике	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
3.	Статистический метод в молекулярной физике	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
4.	Процессы переноса в идеальных газах. Уравнения диффузии и теплопроводности. Явления переноса в разреженных газах	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
5.	Реальные газы	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
6.	Фазовые переходы I и II рода	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
7.	Конденсированные состояния вещества	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
8.	Капиллярные явления	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы. Решение задач. Составление отчетов по лабораторным работам.
9.	Растворы и их свойства	Проработка лекций. Чтение основной дополнительной литературы.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устной форме по следующему алгоритму:

1. Сдача теста на знание формул.
2. Решение задачи.
3. Ответ на билет, содержащий 2 теоретических вопроса. Беседа с преподавателем.

Критерии оценивания обучающегося:

"отлично" — студент дал полный ответ на теоретические вопросы, правильно решил задачу, продемонстрировал взаимосвязь теоретических основ молекулярной физики, термодинамики и практики;

"хорошо" — студент показал систематические знания по дисциплине, способность применять их для решения практических задач, но имеются недочеты в ответах и решениях;

"удовлетворительно" — студент имеет представления о молекулярно-кинетической теории и применении их в практике, недостаточно владеет теоретическими основами молекулярной физики и термодинамики, в ответах и решениях допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;

"неудовлетворительно" — студент не имеет систематических знаний в области молекулярной физики, слабо разбирается в практических вопросах термодинамики и др., допускает принципиальные ошибки в ответах и решениях.

Вопросы к тесту на знание формул

1. Уравнение Клапейрона-Менделеева.
2. Плотность идеального газа.
3. Выражение для молярной массы смеси газов, если известны массы ее компонент.
4. Выражение для молярной массы смеси газов, если известны массовые концентрации ее компонент.
5. Выражение для молярной массы смеси газов, если известны мольные концентрации ее компонент
6. Первое начало термодинамики.
7. Второе начало термодинамики.
8. Работа газа при изотермическом процессе.
9. Работа газа при изобарном и изохорном процессе.
10. Изменение внутренней энергии при изобарном и изохорном процессах идеального газа.
11. Теплота при изобарном и изохорном процессе идеального газа.
12. Внутренняя энергия реального газа.
13. Работа реального газа.
14. Уравнение Пуассона.
15. Соотношение Майера.
16. Теплоемкость C_p и C_v одноатомного газа.
17. Теплоемкость C_p и C_v двухатомного газа.
18. Теплоемкость C_p и C_v одноатомного газа.
19. Число степеней свободы для газа гелия и водорода.
20. Теплоемкость C_p и C_v гелия и водорода .
21. Теплоемкость C_p и C_v аргона и азота.
22. Молярная масса и теплоемкость C_p и C_v воздуха.
23. Уравнение политропического процесса.
24. Уравнение изотермического процесса.
25. Уравнение адиабатического процесса.
26. Изменение энтропии при изотермическом и адиабатическом процессах идеального газа.
27. Изменение энтропии при изобарном и изохорном процессах идеального газа.
28. Изменение энтропии при фазовых переходах I рода.
29. Изменение энтропии при фазовых переходах II рода.
30. Изменение энтропии при теплообмене.
31. При фазовых переходах I рода происходит скачок.....
32. При фазовых переходах II рода происходит скачок.....
33. Выражения для потенциала Гиббса и его полного дифференциала.
34. Термодинамические функции.
35. КПД тепловых машин.
36. КПД цикла Карно.
37. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
38. Связь энтропии с вероятностью.
39. Распределение Больцмана.
40. Связь между потенциальной энергией и силой, действующей на молекулу.
41. Барометрическая формула.
42. Распределение Максвелла по компонентам скоростей.
43. Распределение Максвелла по скоростям.

44. Наиболее вероятная скорость молекул.
45. Средне-арифметическая скорость молекул.
46. Среднеквадратичная скорость молекул.
47. Длина свободного пробега.
48. Среднее число столкновений молекул идеального газа.
49. Поток молекул газа в данном направлении.
50. Коэффициент вязкости идеального газа.
51. Коэффициент диффузии идеального газа.
52. Коэффициент теплопроводности идеального газа.
53. Поток импульса, массы и энергии.
54. Условие достижения вакуума.
55. Условие равновесия в двух сосудах, между которыми имеется: а) большое отверстие, б) малое отверстие (меньше длины свободного пробега).
56. Уравнение теплопроводности в декартовой системе координат.
57. Уравнение теплопроводности в сферической системе координат.
58. Уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат.
59. Уравнение Ван-дер-Ваальса.
60. Приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса.
61. Температурная зависимость давления насыщенных паров жидкости.
62. Жидкость кипит, когда ...
63. Критическая температура — это температура ...
64. Критические параметры.
65. Два физических смысла поверхностного натяжения жидкостей.
66. Условие отрыва капли от капилляра.
67. Лапласовское давление внутри мыльного пузырька и пузырька газа.
68. Лапласовское давление внутри жидкости в цилиндрическом капилляре.
69. Лапласовское давление в жидкости между плоско параллельными пластинами.
70. Высота поднятия жидкости по капилляру.

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Модель идеального газа. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Уравнение Клапейрона-Менделеева. Температура. Абсолютная шкала температур. Смеси газов. Закон Дальтона.
2. Броуновское движение.
3. Нулевое и первое начало термодинамики. Процессы. Расчет работы, теплоты и изменений внутренней энергии в различных процессах.
4. Адиабатический процесс. Уравнение Пуассона.
5. Теплоемкость. Соотношение Майера. Классическая теория теплоемкости. Число степеней свободы.
6. Политропический процесс. Частные случаи политропического процесса.
7. Различные формулировки II-начала термодинамики. Теоремы Карно.
8. Энтропия и ее физический смысл.
9. Обратимые циклические процессы. Тепловые машины. КПД тепловых машин. Цикл Карно. Холодильная машина.
10. Обратимые и необратимые процессы. Неравенство Клаузиуса.
11. Связь энтропии с вероятностью. Вероятностный характер II-начала термодинамики.
12. Термодинамические функции. Соотношения Максвелла. Устойчивое состояние систем.
13. Расчет изменений энтропии в процессах идеального газа, при фазовых переходах и теплообмене.
14. III начало термодинамики (Теорема Нернста).

15. Основные понятия теории вероятностей. Сложение и умножение вероятностей. Условие нормировки. Статистически среднее значение.
16. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.
17. Распределение Максвелла по компонентам скоростей и по скоростям.
18. Наиболее вероятная, средне-арифметическая и среднеквадратичная скорость молекул.
19. Длина свободного пробега и среднее число столкновений молекул идеального газа. Поток молекул газа в данном направлении.
20. Обобщенное уравнение переноса. Коэффициенты вязкости, диффузии и теплопроводности идеального газа. Поток импульса, массы и энергии.
21. Явления переноса в вакууме. Относительность понятия вакуума.
22. Уравнение теплопроводности и диффузии, зависящие от времени. Граничные и начальные условия. Расчет распределения тепла между пластинами, вокруг нагретой сферы и цилиндра.
23. Межмолекулярные силы. Потенциал межмолекулярного взаимодействия. Модель упругих шаров в теории Ван-дер-Ваальса.
24. Реальные газы. Уравнение Ван-дер-Ваальса.
25. Критическое состояние вещества. Вывод критических параметров. Особые свойства вещества при критической температуре. Приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса.
26. Фазовый переход жидкость-газ. Температурная зависимость давления насыщенных паров жидкости. Кипение жидкости.
27. Жидкое состояние вещества. Поверхностное натяжение жидкостей. Теория Гиббса поверхностного натяжения жидкостей.
28. Капиллярные явления. Лапласовское давление. Поднятие жидкости по капилляру и между плоскопараллельными пластинами. Мыльные пленки.
29. Явления смачивания и растекания. Краевой угол смачивания. Уравнение Юнга. Работа адгезии.
30. Жидкие растворы. Растворимость. Критические температуры растворимости. Осмотическое давление. Кипение растворов с нелетучим и летучим компонентом.
31. Условие равновесия двух фаз. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовая диаграмма. Тройная точка.
32. Фазовые переходы I и II рода. Примеры.
33. Тепловое движение и явления переноса в газах, жидкостях и твердых телах. «Газоподобное» и «Твердоподобное» состояние жидкостей.
34. Давление насыщенных паров жидкости над плоской и искривленной поверхностью. Конденсация жидкостей в капиллярах.
35. Метастабильные состояния вещества. Критический размер зародыша новой фазы.
36. Внутренняя энергия и работа реального газа.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.): <i>Знает:</i> основные понятия, законы и формулы молекулярной физики. <i>Умеет:</i> применять фундаментальные законы молекулярной физики к решению задач теоретического, экспериментального и прикладного характера.</p> <p>Базовый уровень (хор.): <i>Знает:</i> основные понятия, законы и формулы молекулярной физики, условия их применимости. <i>Умеет:</i> применять фундаментальные законы молекулярной физики к решению задач теоретического, экспериментального и прикладного характера, выполнять физические измерения и оценивать получаемые результаты.</p> <p>Повышенный уровень (отл.): <i>Знает:</i> основные понятия, законы и формулы молекулярной физики, условия их применимости, их теоретическое и экспериментальное обоснование. <i>Умеет:</i> применять фундаментальные законы молекулярной физики к решению задач теоретического, экспериментального и прикладного характера, выполнять физические измерения и оценивать получаемые результаты, обосновывать методику физических измерений и оценивать их погрешность.</p>	Отчеты по лабораторным работам, контрольные вопросы к лабораторным работам	<p>Качество подготовки допуска к лабораторной работе. Полнота и правильность устных ответов на дополнительные вопросы преподавателя о работе лабораторной установки. Правильность снятия измерений с соблюдением необходимых условий. Приведение уравнений, необходимых для расчетов. Правильность расчетов погрешности. Формулировка вывода к работе. Полнота и правильность ответов на контрольные вопросы к лабораторным работам.</p>
2.	ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов,	<p>Пороговый уровень (удовл.): <i>Знает:</i> основы эксплуатации физической и аналитической аппаратуры для проведения исследований.</p>	Контрольные работы, отчеты по лабораторным	<p>Активность на практических занятиях. Правильность решений задач</p>

	<p>обрабатывать и представлять экспериментальные данные</p>	<p>Умеет: пользоваться и выполнять простые операции на физическом и аналитическом оборудовании.</p> <p>Базовый уровень (хор.): Знает: основы эксплуатации физической, аналитической и технологической аппаратуры для проведения исследований; некоторые методы исследований технологических процессов, явлений.</p> <p>Умеет: проводить учебные исследования процессов, явлений с помощью физической, аналитической и технологической аппаратуры.</p> <p>Повышенный уровень (отл.): Знает: основы профессиональной эксплуатации физической, аналитической и технологической аппаратуры для проведения исследований; эффективные методы исследований технологических процессов, явлений.</p> <p>Умеет: проводить учебно-научные исследования процессов, явлений с помощью физической, аналитической и технологической аппаратуры.</p>	<p>работам, контрольные вопросы к лабораторным работам</p>	<p>на практических задачах и в контрольных работах. Указание всех необходимых формул при решении контрольных работ. Демонстрация причинно-следственных связей при ответах на вопросы преподавателя. Правильность интерпретации физических законов.</p>
--	---	---	--	--

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

Казанцева, А.Б. Молекулярная физика. Задачи и решения: учеб. пособие / А.Б. Казанцева. — Москва: МПГУ, 2014. — 240 с. — ISBN 978-5-4263-0146-7. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/757796> (дата обращения: 13.05.2021). — Режим доступа: по подписке.

7.2. Дополнительная литература:

1. Кузнецов, С.И. Молекулярная физика. Термодинамика: учеб. пособие / С.И. Кузнецов; Томский политехнический университет. — 2-е изд., перераб. и доп. — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 126 с. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/417636> (дата обращения: 13.05.2021). — Режим доступа: по подписке.

2. Замураев, В.П. Молекулярная физика в задачах: учебник / В.П. Замураев, А.П. Калинина. — Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2019. — 473 с. — ISBN 978-5-4437-0831-7. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/93815.html> (дата обращения: 13.05.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7.3. Интернет-ресурсы:

Использование данной дисциплиной не предусмотрено.

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

eLIBRARY – научная библиотека (г. Москва). – <http://elibrary.ru> (дата обращения: 13.05.2021).

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:
платформа для электронного обучения Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций требуется лекционная аудитория с мультимедийным оборудованием.

Для проведения практических занятий требуется аудитория для аудитория, оснащенная учебной мебелью и аудиторной доской.

Для проведения лабораторного практикума требуется учебная лаборатория, подключенная к водопроводу и канализации и оснащённая необходимым лабораторным оборудованием:

– лабораторная работа № 1 *“Определение молярной массы воздуха”* — барометр, термометр, весы, установка для откачивания воздуха из сосуда, сосуд с трубкой и зажимом;

– лабораторная работа № 2 *“Методы определения и поддержания температуры”* — воздушный термостат, нагревательный элемент, вентилятор, термистор, термопары, контрольный термометр, электротермометр ЭТП-2МТ, вольтметр В7-20, милливольтметр М198\37;

– лабораторная работа № 3 *“Определение отношения теплоемкостей C_p/C_v методом Клемана и Дезорма”* — сосуд с газом, ручной насос, водяной манометр, кран, клапан;

– лабораторная работа № 4 *“Измерение скорости звука в газах и определение числа степеней свободы молекул”* — труба, подвижный приёмник, звуковой генератор ГЗ-33, электронный осциллограф С1-83; сосуд с исследуемой жидкостью;

– лабораторная работа № 5 *“Изучение распределения Максвелла-Больцмана для термоэлектронов”* — магазин сопротивлений Р32; микроаперметр М1792; понижающий трансформатор ТР1, реостат;

– лабораторная работа № 6 *“Определение коэффициента диффузии молекул воды в воздухе”* — установка ФПТ1-4, электронный блок;

– лабораторная работа № 7 *“Определение коэффициента внутреннего трения, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха”* — установка ФПТ1-1, электронный блок;

– лабораторная работа № 8 *“Определение коэффициента теплопроводности воздуха”* — установка ФПТ1-3, электронный блок;

– лабораторная работа № 9 *“Определение критической температуры”* — осветитель, термостат, микропресс, спай термопар;

– лабораторная работа № 10 *“Изучение температурной зависимости давления насыщенных паров и определение скрытой теплоты испарения”* — закрывающийся сосуд, манометр, термометр, вакуумный насос, нагреватель, трансформатор ЛАТР\1;

– лабораторная работа № 11 *“Определение удельной теплоты плавления и теплоемкости парафина”* — осветитель, калориметр с теплоизолирующими стенками из пенопласта, пробирка с парафином, электрометр ЭТ-2МИ;

- лабораторная работа № 12 **“Определение влажности воздуха”** — конденсационный гигрометр;
- лабораторная работа № 13 **“Определение поверхностного натяжения жидкости капельным методом”** — микрометрический шприц, подставка, стеклянный стакан, исследуемая жидкость;
- лабораторная работа № 14 **“Определение краевых углов смачивания”** — предметный столик, набор пластин, шприц, микроскоп, дистиллированная вода.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


« 23 » 06. 2021 г. С.А. Креков

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки
03.03.02 Физика
профиль «Фундаментальная физика»
форма обучения очная

Монтанари С.Г. Жигарева Л.В. Электричество и магнетизм. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлениям подготовки 03.03.02 «Физика», профиль подготовки «Фундаментальная физика», форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Монтанари С.Г., Жигарева Л.В., 2021.

Рабочая программа дисциплины включает следующие разделы:

1. Пояснительная записка

Дисциплина «Электричество и магнетизм» является неотъемлемой частью курса «Общая физика» и служит основой для дальнейшего более углубленного и детализированного изучения естественно-научных дисциплин, включая курсы общей и теоретической физики, а также специализированные дисциплины.

В рамках курса «Электричество и магнетизм» последовательно рассматриваются разделы "Электростатика", "Постоянный электрический ток", "Электропроводность", "Стационарное магнитное поле", "Электромагнитная индукция", "Переменный квазистационарный электрический ток", "Уравнения Максвелла и основные свойства электромагнитных волн".

Цель дисциплины: создание фундаментальной базы знаний, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение всех разделов физики в рамках цикла курсов по общей и теоретической физики, а также специализированных курсов.

Задачи дисциплины:

- сформировать у студентов единую, стройную, логически непротиворечивую физическую картину окружающего нас мира природы;
- на основе обобщения экспериментальных данных научить строить модели наблюдаемых явлений, с обоснованием приближений и рамок, в которых эти модели действуют;
- в рамках единого подхода классической (доквантовой) физики рассмотреть основные электромагнитные явления и процессы, происходящие в природе, установить связь между ними, вывести основные законы и получить их выражение в виде математических уравнений..

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в базовую часть блока Б1 Дисциплины (модули), обязательная часть. Для ее успешного освоения необходимо предварительное изучение дисциплин «Механика», «Молекулярная физика», «Введение в математический анализ», «Математический анализ».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины:

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Компонент (знаниевый/функциональный)
ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> – основные понятия, законы и формулы электричества и магнетизма; – методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах.
	<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – применять базовые знания в области электричества и магнетизма при решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера в сфере своей профессиональной деятельности; – численно описывать модели физических явлений; – выполнять физические измерения и оценивать получаемые результаты при решении типовых задач в области электричества и магнетизма.
	Знает

<p>ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные</p>	<ul style="list-style-type: none"> – основы теоретических и экспериментальных исследований физических объектов в области электричества и магнетизма; – основные приемы обработки и представления экспериментальных данных.
	<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – применять основы и методы теоретических и экспериментальных исследований физических объектов в области электричества и магнетизма; – пользоваться основными приемами обработки и представления экспериментальных данных.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 1

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			3
Общий объем	зач. ед.	7	7
	час	252	252
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		184	184
Лекции		34	34
Практические занятия		52	52
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		30	30
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		68	68
Вид промежуточной аттестации (зачет, диф. зачет, экзамен)			Экзамен

3. Система оценивания

Оценивание знаний, умений и навыков студентов, полученных ими в ходе изучения дисциплины, производится в соответствии с «Положением о текущем контроле успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет» (утверждено Решением Ученого совета от 31.08.2020, протокол №10).

При текущем контроле учитывается несколько видов деятельности обучающихся:

1. Лабораторные занятия:

- допуски к выполнению лабораторных работ (0 – 0,5 балла);
- выполнение лабораторной работы (0-1 балл);
- подготовка и сдача отчета по лабораторной работе (0-1 балл);
- защита лабораторной работы (0-1,5 балла);

Студенту рекомендуется следующая схема подготовки к лабораторному занятию:

- проработка конспекта лекций дисциплины «Электричество и магнетизм» по тематике лабораторной работы;
- чтение рекомендованной основной и дополнительной литературы по тематике лабораторной работы;
- заполнение лабораторного журнала и подготовка к допуску для выполнения работы;
- выполнение всех расчетов необходимых величин и погрешностей к ним в лабораторном журнале.
- подготовка отчета по лабораторной работе.

Обязательным условием освоения дисциплины является выполнение и защита 12 лабораторных работ из 15 предложенных преподавателем.

2. Практические занятия:

- активность на практических занятиях по решению задач;
- решение домашних задач;
- контрольные работы;

Активность на практическом занятии включает в себя решение задач у доски, участие в решении задачи «с места», решение задач опережающими темпами и т.д. При активной работе обучающийся получает 0,5 балла за занятие.

Решение домашних задач подразумевает проверку в начале занятия наличия выполненных задач. Каждая вовремя решённая домашняя задача оценивается в 2/3 балла (допускается сдвиг на одно занятие). За семестр обучающийся должен решить 48 домашних задач. Максимальное количество за них – 34 балла.

С учётом контрольных работ (3 работы, каждая по 5 баллов), максимальное количество баллов по всем практическим занятиям равно 58.

Критерии оценивания задач контрольных работ:

0 баллов:

- Решение не приведено.
- Есть попытка решить задачу, но основные формулы или условия задачи приведены ошибочно.

0,7 балла:

- Правильно приведены основные формулы, но рассуждения содержат грубые ошибки.
- Задача решена в общем виде, но отсутствуют количественные расчеты.
- Отсутствуют необходимые рисунки или построения.

1,2 балла:

- Ход решения верный, но в выводах формул или расчетах есть незначительные ошибки.
- Неверно определены размерности используемых/полученных величин.

1,66 балла:

- Задача решена правильно, есть все необходимые комментарии, рисунки и расчеты.

3. Письменные ответы на вопросы 2-х коллоквиумов, которые оцениваются по 5 баллов за каждый коллоквиум.

По итогам набранных в семестре баллов обучающийся может/не может получить экзаменационную оценку (см. п. 6).

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультаци и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
Лекции						
1.	Электростатика.	52	10	16	12	4
2.	Постоянный электрический ток.	27	2	6	8	3
3.	Электропроводность.	34	6	8	8	4
4.	Стационарное магнитное поле.	29	2	8	8	3

5.	Магнетики.	32	4	4	10	4
6.	Электромагнитная индукция.	28	4	4	8	3
7.	Переменный квазистационарный электрический ток.	26	2	4	8	3
8.	Уравнения Максвелла и основные свойства электромагнитных волн.	22	4	6	0	4
9.	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	252	34	52	68	30

4.2. Содержание дисциплины по темам

Темы лекционных занятий:

Тема 1. Электростатика. Электрический заряд. Модель точечного заряда. Инвариантность заряда. Закон сохранения заряда. Закон Кулона. Полевая трактовка закона. Напряженность электрического поля. Электрический диполь. Дипольный момент. Поле диполя.

Теорема Гаусса для электростатики (в интегральной и дифференциальной форме). Потенциальный характер электростатического поля. Интегральная и дифференциальная формулировки критерия потенциальности. Скалярный потенциал, разность потенциалов. Градиент потенциала. Уравнения Пуассона и Лапласа.

Постоянное электрическое поле при наличии проводников. Электрическая ёмкость уединённого проводника. Конденсаторы. Силы в электростатическом поле, действующие на заряд, на диполь. Энергия электростатического поля. Энергия заряженного конденсатора. Энергия диполя во внешнем поле.

Постоянное электрическое поле при наличии диэлектрика. Поляризованность диэлектрика. Диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость. Объемные и поверхностные поляризационные заряды в диэлектрике. Вектор электрического смещения. Теорема Гаусса при наличии диэлектрика.

Граничные условия для вектора напряженности и смещения. Молекулярная картина поляризации диэлектриков. Электронная, ионная и дипольная поляризация. Формула Клаузиуса-Моссотти. Формула Дебая-Ланжевена. Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.

Силы в электростатическом поле. Сила, действующая на точечный заряд, на диполь. Явление электрострикции.

Тема 2. Постоянный электрический ток. Условия существования постоянного электрического тока. Сторонняя ЭДС. Законы Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах. Правила Кирхгофа. Расчет линейных цепей с использованием правил Кирхгофа.

Тема 3. Электропроводность. Классическая теория проводимости металлов Друде. Теория Зоммерфельда. Основы зонной теории твердых тел. Энергетические зоны металлов и полупроводников. Энергия Ферми. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковые диоды и транзисторы. Явление сверхпроводимости.

Механизм проводимости растворов электролитов. Законы Фарадея для электролиза. Число Фарадея. Электрическая проводимость газов. Типы газовых разрядов и их характеристика. Плазма и её основные свойства.

Внутренняя и внешняя контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления (явления Зеебека, Пельтье и Томсона). Термоэлектродвижущая сила. Термоэлектронная эмиссия. Формула Ричардсона-Дешмана. Закон Богуславского-Ленгмюра (закон трех вторых).

Тема 4. Стационарное магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Магнитный момент. Закон Био-Савара-Лапласа. Магнитный поток. Теорема о потоке вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность. Векторный потенциал. Закон взаимодействия токов, его полевая трактовка. Сила Лоренца и её проявления. Эффект Холла. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции по замкнутому контуру (закон полного тока). Вихревой характер магнитного поля.

Тема 5. Магнетики. Намагниченность. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость. Типы магнетиков. Объемные и поверхностные молекулярные токи в веществе. Напряженность магнитного поля. Граничные условия для векторов напряженности и индукции магнитного поля. Гиромагнитные явления. Гиромагнитные отношения для орбитальных и спиновых моментов. Ларморова прецессия атома. Ларморова частота. Природа диамагнетизма. Парамагнетики. Зависимость парамагнитной восприимчивости от температуры. Закон Кюри. Ферромагнетики. Зависимость намагниченности и магнитной индукции напряженности поля. Закон Кюри. Доменная структура. Антиферромагнетизм. Ферромагнетики.

Тема 6. Электромагнитная индукция. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца. Максвелловская трактовка закона электромагнитной индукции. Вихревой характер электрического поля. Выражение напряженности вихревого поля через векторной потенциал. Явления самоиндукции и взаимной индукции. Индуктивность контура. Трансформатор. Энергия и плотность энергии магнитного поля.

Тема 7. Переменный квазистационарный электрический ток. Вынужденные электрические колебания в цепи с активным сопротивлением, индуктивностью и ёмкостью. Квазистационарный синусоидальный переменный ток. Критерий квазистационарности тока. Закон Ома. Импеданс. Мощность переменного тока. Действующие (эффективные) значения силы тока и напряжения. Коэффициент мощности, его физический смысл. Резонанс напряжений в цепи переменного тока с индуктивностью и ёмкостью. Резонанс токов в цепи с индуктивностью и ёмкостью.

Тема 8. Уравнения Максвелла и основные свойства электромагнитных волн. Система уравнений Максвелла (в интегральной и дифференциальной форме) и их физический смысл. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Фазовая скорость волны. Уравнение плоской электромагнитной волны. Поперечный характер волны. Энергия электромагнитной волны. Поток энергии. Вектор Пойнтинга. Инварианты электромагнитного поля.

Темы практических занятий:

Тема 1.

Решение задач по темам: закон Кулона. напряженность электрического поля, электрический диполь, дипольный момент.

Решение задач по темам: теорема Гаусса для электростатики (в интегральной и дифференциальной форме), потенциальный характер электростатического поля, интегральная и дифференциальная формулировки критерия потенциальности.

Решение задач по темам: скалярный потенциал, разность потенциалов, градиент потенциала, уравнения Пуассона и Лапласа.

Решение задач по темам: электрическая ёмкость уединённого проводника, энергия электростатического поля, энергия заряженного конденсатора, энергия диполя во внешнем поле.

Решение задач по темам: постоянное электрическое поле при наличии диэлектрика, поляризованность диэлектрика, диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость.

Решение задач по темам: объёмные и поверхностные поляризационные заряды в диэлектрике, теорема Гаусса при наличии диэлектрика.

Решение задач по темам: граничные условия для вектора напряженности и смещения, силы в электростатическом поле.

Контрольная работа № 1 по дисциплине по теме 1 практических занятий.

Тема 2.

Решение задач по темам: законы Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах, правила Кирхгофа, расчет линейных цепей с использованием правил Кирхгофа.

Решение задач по темам: расчет линейных цепей с использованием правил Кирхгофа.

Тема 3.

Решение задач по темам: классическая теория проводимости металлов Друде.

Решение задач по темам: собственная и примесная проводимость полупроводников, полупроводниковые диоды и транзисторы.

Решение задач по темам: электрическая проводимость газов.

Решение задач по темам: термоэлектронная эмиссия, формула Ричардсона-Дешмана, закон Богуславского-Ленгмюра.

Контрольная работа № 2 по дисциплине по темам 2, 3 практических занятий.

Тема 4.

Решение задач по темам: вектор магнитной индукции, магнитный момент, закон Био-Савара-Лапласа, теорема о потоке вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность.

Решение задач по темам: закон взаимодействия токов, его полевая трактовка, сила Лоренца и её проявления, теорема о циркуляции вектора магнитной индукции по замкнутому контуру.

Тема 5.

Решение задач по темам: напряженность магнитного поля, граничные условия для векторов напряженности и индукции магнитного поля.

Решение задач по темам: зависимость намагниченности и магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

Тема 6.

Решение задач по темам: закон электромагнитной индукции Фарадея, явление самоиндукции.

Контрольная работа № 3 по дисциплине по темам 4, 5, 6 практических занятий.

Тема 7.

Решение задач по темам: закон Ома для цепей переменного тока, мощность переменного тока.

Решение задач по темам: резонанс напряжений и токов в цепи переменного тока с индуктивностью и ёмкостью.

Тема 8.

Решение задач по темам: уравнения Максвелла.

Решение задач по темам: электромагнитные волны, волновое уравнение.

Решение задач по темам: энергия электромагнитной волны, поток энергии.

Темы лабораторных занятий:

Лабораторная работа №1. Электроизмерительные приборы. Изучение осциллографа.

Лабораторная работа состоит из 3 упражнений: Калибровка электронного осциллографа, где проводится калибровка усилителя вертикального отклонения, калибровка генератора развертки; Измерение постоянных и переменных напряжений, где измеряют амплитуду и длительность импульсов на экране осциллографа; Измерение частоты (периода) переменного сигнала, где определяют длительность и постоянную времени переднего фронта прямоугольного импульса.

Лабораторная работа №2. Исследование электрических полей с помощью электролитической ванны.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Исследование плоских полей, где определяют потенциалы между пластинами плоского конденсатора, а затем строят на миллиметровой бумаге эквипотенциальные линии; Исследование поля цилиндрического

конденсатора, где сравнивают экспериментальное распределение потенциалов с теоретическим с помощью графиков.

Лабораторная работа №3. Изучение вынужденных колебаний и явления резонанса в последовательном колебательном контуре.

Исследуется зависимость амплитуды переменного напряжения на конденсаторе от частоты при различных значениях активного сопротивления.

Лабораторная работа №4. Проверка закона Ома для цепей переменного тока.

Лабораторная работа состоит из 3 упражнений: Измерение коэффициента самоиндукции, где измеряют активное и полное сопротивление катушки, а затем по формуле вычисляют коэффициент самоиндукции; Измерение ёмкости конденсаторов, где определяют по приборам эффективные значения тока и напряжения, а затем по формуле вычисляют ёмкость конденсаторов; Проверка закона Ома для участка цепи переменного тока, где, изменяя сопротивление реостата, отсчитывают эффективные значения тока и напряжения, а затем подставляют в формулу и вычисляют полное сопротивление цепи, сравнивая его с полученным результатом из предыдущих упражнений.

Лабораторная работа №5. Исследование выпрямительных схем на полупроводниковых диодах.

В лабораторной работе измеряют эффективное значение входного напряжения, среднее значение напряжения на сопротивлении нагрузки и по формуле вычисляют к.п.д. выпрямителя.

Лабораторная работа №6. Измерение сопротивлений.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Определение удельного сопротивления нихромовой проволоки проводится методом вольтметра и амперметра, где измеряют сопротивление заданного участка проволоки, его длины и площади сечения, а затем по формуле вычисляют удельное сопротивление; Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона, где, пользуясь известным сопротивлением, из условия равновесия моста, определяют неизвестное сопротивление.

Лабораторная работа №7. Измерение ёмкости конденсаторов.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Определение ёмкости конденсаторов с помощью мостика Сотти; Определение ёмкости конденсатора методом куметра.

Лабораторная работа №8. Измерение мощности переменного тока и сдвига фаз между током и напряжением.

В лабораторной работе измеряют мощность, эффективные значения тока и напряжения для различных сопротивлений нагрузки. Изучают зависимость изменения $\cos \varphi$ от глубины насадки железного сердечника, определяют для каждого случая величину индуктивного сопротивления.

Лабораторная работа №9. Измерение напряженности магнитного поля соленоида на его оси.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Измерение магнитного поля на оси длинного соленоида, где с помощью измерительной катушки, пользуясь формулой, определяют амплитуду напряженности магнитного поля; Измерение магнитного поля на оси короткого соленоида.

Лабораторная работа №10. Исследование затухающих колебаний в колебательном контуре.

Лабораторная работа состоит из 3 упражнений: Определение периода свободных колебаний, где по осциллограмме определяют частоту и период свободных колебаний; Исследование зависимости логарифмического декремента затухания от активного сопротивления, где рассчитывают логарифмического декремента затухания и собственное сопротивление потерь в контуре, определяют критическое сопротивление, при котором наступает апериодический процесс; Исследование зависимости периода свободных колебаний от параметров контура и проверка формулы Томсона, где измеряют период свободных колебаний эталонных катушек и их соединения, рассчитывают периоды свободных колебаний контуров по формуле и сравнивают результат с экспериментальными значениями.

Лабораторная работа №11. Снятие кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью осциллографа

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Снятие кривой намагничивания, где, регулируя уровень выходного сигнала генератора, получают на экране осциллографа петлю гистерезиса с участком насыщения, строят график кривой начального намагничивания, рассчитывают значения В и Н по формулам; Определение потерь на перемагничивание с использованием петли гистерезиса.

Лабораторная работа №12. Передача мощности в цепи постоянного тока.

В лабораторной работе измеряют ЭДС источников постоянного тока, ток и напряжение в цепи. Вычисляют для каждого значения тока и напряжения полную мощность, полезную мощность, КПД. По полученным данным вычисляют мощность короткого замыкания и внутреннее сопротивление для каждого источника.

Лабораторная работа №13. Изучение эффекта Холла.

В лабораторной работе измеряют с помощью осциллографа амплитуду холловской ЭДС при различных значениях тока в цепи электромагнита. По формулам вычисляют постоянную Холла и концентрацию электронов в германиевом полупроводнике.

Лабораторная работа №14. Определение удельного заряда электрона.

В лабораторной работе снимают зависимость анодного тока от напряжения на аноде, строят график и из него, применяя формулу, получают удельный заряд электрона. Также, определяя тангенс наклона графика, проверяют закон «степени трёх вторых».

Лабораторная работа №15. Исследование магнитного поля Земли.

В лабораторной работе, правильно сорентировав катушку индуктивности, выполненную в виде кольца, можно измерить вертикальную и горизонтальную составляющие вектора магнитной индукции земного поля.

Все лабораторные работы по дисциплине проводятся в «Лаборатории электричества и магнетизма» ФТИ.

На вводном лабораторном занятии проводится инструктаж по технике безопасности.

Преподавателем объясняется формат проведения лабораторных занятий, требования к допуску к выполнению лабораторной работы, содержание отчета по лабораторной работе, формат защиты лабораторной работы.

К каждой лабораторной работе имеются подробные методические рекомендации с необходимыми теоретическими сведениями, описанием установки, описанием последовательности выполнения заданий и обработки полученных результатов, а также список литературы.

В течение семестра каждому студенту необходимо обязательно выполнить и защитить 12 лабораторных работ. Лабораторные работы выполняются в малых группах (2 студента). Очередность выполнения лабораторных работ определяется преподавателем.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовкам занятиям
Лекции		
1.	Электростатика.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
2.	Постоянный электрический ток.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.

3.	Электропроводность.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
4.	Стационарное магнитное поле.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
5.	Магнетики.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
6.	Электромагнитная индукция.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
7.	Переменный квазистационарный электрический ток.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
8.	Уравнения Максвелла и основные свойства электромагнитных волн.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

Студент, набравший определенное количество баллов, может получить экзаменационную оценку «автоматом» в соответствии со шкалой:

71 балл и выше – «удовлетворительно»;

88 баллов и выше – «хорошо»;

106 и выше – «отлично».

Необходимым условием получения положительной оценки по дисциплине является выполнение всех видов учебной деятельности (лекционной, семинарской и лабораторной).

Критерием выполнения лабораторной деятельности служит выполнение и защита 12-и лабораторных работ (форма контроля: лабораторный отчет, контрольные вопросы).

Критерием выполнения семинарской деятельности служит решение 9 блоков задач и защита перед преподавателем минимум одного блока из каждого модуля задач.

Если студент не освоил какой-либо вид деятельности, то он не может получить положительной оценки по дисциплине в целом. Он может участвовать в экзамене, показать, как освоил теоретическую часть дисциплины, но не более того. Кроме того, несвоевременное выполнение семинарской и лабораторной частей может привести к снижению оценки на экзамене при повторной аттестации.

Экзаменационный билет будет содержать два вопроса из тематики лекционных занятий.

6.1 Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Примерные вопросы к экзамену

1. Электрический заряд. Модель точечного заряда. Инвариантность заряда. Закон сохранения заряда.
2. Закон Кулона. Полевая трактовка закона. Напряженность электрического поля.
3. Электрический диполь. Дипольный момент. Поле диполя.
4. Теорема Гаусса для электростатики (в интегральной и дифференциальной форме).
5. Потенциальный характер электростатического поля. Интегральная и дифференциальная формулировки критерия потенциальности. Скалярный потенциал, разность потенциалов. Градиент потенциала. Уравнения Пуассона и Лапласа.
6. Постоянное электрическое поле при наличии проводников. Электрическая емкость уединенного проводника.
7. Силы в электростатическом поле, действующие на заряд, на диполь.
8. Энергия электростатического поля. Энергия заряженного конденсатора. Энергия диполя во внешнем поле.

9. Постоянное электрическое поле при наличии диэлектрика. Поляризованность диэлектрика. Диэлектрическая восприимчивость и диэлектрическая проницаемость.
10. Объемные и поверхностные поляризационные заряды в диэлектрике. Вектор электрического смещения. Теорема Гаусса при наличии диэлектрика. Граничные условия для вектора напряженности и смещения.
11. Молекулярная картина поляризации диэлектриков. Электронная, ионная и дипольная поляризация. Формула Клазиуса-Мосотти. Формула Дебая-Ланжевена.
12. Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.
13. Условия существования постоянного электрического тока. Сторонняя ЭДС.
14. Законы Ома и Джоуля-Ленца в дифференциальной и интегральной формах.
15. Правила Кирхгофа. Расчет линейных цепей с использованием правил Кирхгофа.
16. Классическая теория проводимости металлов Друде. Теория Зоммерфельда.
17. Основы зонной теории твердых тел. Энергетические зоны металлов и полупроводников. Энергия Ферми.
18. Собственная и примесная проводимость полупроводников. Полупроводниковые диоды и триоды (транзисторы).
19. Явление сверхпроводимости.
20. Механизм проводимости растворов электролитов. Законы Фарадея для электролиза. Число Фарадея.
21. Электрическая проводимость газов. Типы газовых разрядов и их характеристика. Плазма и ее основные свойства.
22. Внутренняя и внешняя контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления (явления Зеебека, Пельте и Томсона).
23. Термоэлектронная эмиссия. Формула Ричардсона-Дешмана. Закон Богуславского-Ленгмюра (закон трех вторых).
24. Стационарное магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Магнитный момент. Закон Био-Савара-Лапласа.
25. Магнитный поток. Теорема о потоке вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность. Векторный потенциал.
26. Закон взаимодействия токов (закон Ампера), его полевая трактовка.
27. Сила Лоренца и ее проявления. Эффект Холла.
28. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции по замкнутому контуру (закон полного тока). Вихревой характер магнитного поля.
29. Магнитное поле при наличии магнетиков. Намагниченность. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость. Типы магнетиков.
30. Объемные и поверхностные молекулярные токи в веществе. Напряженность магнитного поля. Граничные условия для векторов напряженности и индукции магнитного поля.
31. Гиромагнитные явления. Гиромагнитные отношения для орбитальных и спиновых моментов.
32. Ларморова прецессия атома. Ларморова частота. Природа диамагнетизма.
33. Парамагнетики. Зависимость парамагнитной восприимчивости от температуры. Закон Кюри.
34. Ферромагнетики. Зависимость намагниченности и магнитной индукции напряженности поля. Закон Кюри. Доменная структура. Антиферромагнетизм. Ферримагнетики.
35. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца. Максвелловская трактовка закона электромагнитной индукции. Вихревой характер электрического поля. Выражение напряженности вихревого поля через векторной потенциал.
36. Явления самоиндукции и взаимной индукции. Индуктивность контура. Трансформатор.
37. Энергия и плотность энергии магнитного поля.
38. Вынужденные электрические колебания в цепи с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Квазистационарный синусоидальный переменный ток. Критерий квазистационарности тока. Закон Ома. Импеданс.
39. Мощность переменного тока. Действующие (эффективные) значения силы тока и напряжения. Коэффициент мощности, его физический смысл.

40. Резонанс напряжений в цепи переменного тока с индуктивностью и емкостью.
 41. Резонанс токов в цепи с индуктивностью и емкостью.
 42. Система уравнений Максвелла (в интегральной и дифференциальной форме) и их физический смысл.
 43. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Фазовая скорость волны.
 44. Уравнение плоской электромагнитной волны. Поперечный характер волны.
 45. Энергия электромагнитной волны. Поток энергии. Вектор Пойнтинга.
 46. Инварианты электромагнитного поля.

6.2 Критерии оценивания компетенций:

Карта критериев оценивания компетенций

Таблица 4

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.): <i>Знает:</i> отдельные законы и модели электричества и магнетизма); методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах. <i>Умеет:</i> выполнять простые математические расчёты для электрических и магнитных величин на основе стандартных формул и уравнений; применять отдельные знания из области электромагнитных колебаний и волн для решения профессиональных задач; применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач.</p> <p>Базовый (хор.): <i>Знает:</i> основные законы и модели электричества и магнетизма; методы и правила расчётов</p>	Отчеты по лабораторным работам; Контрольные вопросы к лабораторным работам: решение 48 домашних задач; 30 вопросов двух коллоквиумов, 46 вопросов к экзамену.	Присутствие и конспектирование лекционного материала на лекционном занятии; полнота и правильность ответов на вопросы коллоквиумов, количество правильно решенных задач; полнота представления отчетов по лабораторным работам с предоставлением обработанных результатов, выводы из проделанной работы; интенсивном использовании основных и дополнительных источников при подготовке к выполнению лабораторных работ и решению задач.

		<p>электрических и магнитных величин и параметров с заданной точностью.</p> <p>Умеет: применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач; применять методы использования основных законов и моделей из области электромагнитных колебаний и волн для решения задач в сфере своей профессиональной деятельности;</p> <p>выполнять математические расчёты для электрических и магнитных величин на основе стандартных и найденных в рекомендованных источниках формул и уравнений.</p> <p>Повышенный (отл.)</p> <p>Знает: основные законы и модели электричества и магнетизма; методы измерений и исследований, основанные на различных эффектах электричества и магнетизма;</p> <p>оптимальные методы и правила расчётов любых электрических и магнитных величин и параметров; способы оценки погрешности результатов вычислений.</p> <p>Умеет: применять базовые знания из области электромагнитных колебаний и волн в сфере своей профессиональной деятельности;</p> <p>применять навыки выполнения аналитических и прикладных расчётов;</p> <p>получать расчетные формулы для различных установок и систем;</p> <p>выполнять математические</p>		
--	--	---	--	--

		расчёты для электрических и магнитных величин на основе стандартных и самостоятельно найденных формул и уравнений, в том числе при выполнении самостоятельных прикладных и научных исследованиях.		
2.	ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.): <i>Знает:</i> отдельные методы исследований физических объектов, систем и процессов; отдельные приемы обработки и представления экспериментальных данных. <i>Умеет:</i> применять отдельные методы исследований из области электромагнитных колебаний и волн для решения профессиональных задач с помощью преподавателя.</p> <p>Базовый (хор.): <i>Знает:</i> основные методы научных исследований физических объектов, систем и процессов; основные приемы обработки и представления экспериментальных данных. <i>Умеет:</i> применять основные методы научных исследований из области электромагнитных колебаний и волн для решения профессиональных задач с помощью преподавателя; самостоятельно пользоваться основными приемами обработки и представления экспериментальных данных.</p> <p>Повышенный (отл.):</p>	Отчеты по лабораторным работам; Контрольные вопросы к лабораторным работам.	Правильность и полнота ответов по основным техническим параметрам и физическим принципам работы измерительных приборов; умение правильно оценивать приборную погрешность, используя статистические методы обработки данных.

		<p>Знает: основные методы физических исследований; основные приемы обработки и представления данных.</p> <p>Умеет: самостоятельно использовать и применять основные методы физических исследований; самостоятельно использовать различные методы статистической обработки и представления экспериментальных данных из области электромагнитных колебаний и волн.</p>		
--	--	--	--	--

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1 Основная литература:

1. Пономарева, В. А. Электричество и магнетизм : курс лекций / В. А. Пономарева, В. А. Кузьмичева. — Москва : Московская государственная академия водного транспорта, 2007. — 116 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/46357.html> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

7.2 Дополнительная литература:

1. Гринберг, Я. С. Электричество и магнетизм : учебное пособие / Я. С. Гринберг, Э. А. Кошелев, А. Г. Моисеев. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2017. — 191 с. — ISBN 978-5-7782-3163-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91590.html> (дата обращения: 12.05.2021).
2. Дубровский, В. Г. Электричество и магнетизм. Сборник задач и примеры их решения/Дубровский В.Г., Харламов Г.В. - Новосибирск : НГТУ, 2011. - 92 с.: ISBN 978-5-7782-1600-6. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/546026> (дата обращения: 12.05.2021).
3. Дерябин В.М., Борисенко В.Е. Физика. – Тюмень, Изд-во ТюмГУ, 2001. – 656 с.
4. Елканова, Т. М. Практикум по курсу «Электричество и магнетизм» : учебное пособие / Т. М. Елканова. — Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2017. — 254 с. — ISBN 978-5-4486-0148-4. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/71578.html> (дата обращения: 12.05.2021).
5. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм : лабораторный практикум / составители Д. В. Гладких [и др.]. — Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2018. — 290 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/92711.html> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7.3 Интернет-ресурсы:

1. eLIBRARY – Научная электронная библиотека (Москва) <http://elibrary.ru>

7.4 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Не предусмотрено использование в данной дисциплине.

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

- Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:

платформа для электронного обучения Microsoft Teams, офисный пакет Microsoft Office.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекционных занятий требуется аудитория, рассчитанная на 60-80 человек, оборудованная мультимедийными средствами, а так же меловой или интерактивной доской.

Для проведения практических занятий требуется аудитория, рассчитанная на 20-25 человек, оборудованная меловой или интерактивной доской.

Для лабораторных занятий - лаборатория физического практикума с лабораторным оборудованием (лабораторными стендами), аналоговые и цифровые приборы для электроизмерений, мультимедийное и компьютерное оборудование:

Лабораторная работа 1: осциллограф, генератор, соединительные кабели.

Лабораторная работа 2: электролитическая ванна, набор электродов и зондов, реохорд (потенциометр R_p , индикатор нуля (осциллограф), вольтметр, звуковой генератор.

Лабораторная работа 3: исследуемый контур, магазин сопротивлений, вольтметр переменного тока или осциллограф в качестве измерителя напряжения, генератор сигналов, частотомер, соединительные проводники и кабели.

Лабораторная работа 4: набор катушек индуктивности и конденсаторов, реостат, ключ, источник постоянного и переменного напряжения, вольтметр, амперметр, соединительные проводники.

Лабораторная работа 5: стенд с набором сменных панелей, источник питания, осциллограф, мультиметр, соединительные кабели.

Лабораторная работа 6: лабораторный прибор с реохордом, магазин сопротивлений, соединительные проводники, набор сопротивлений.

Лабораторная работа 7: звуковой генератор, магазин сопротивлений, реохорд (реостат), осциллограф, конденсаторы неизвестной ёмкости, вольтметр, эталонный конденсатор, конденсатор переменной ёмкости градуированный, катушка индуктивности эталонная, сопротивление 5...10 Ом, омметр.

Лабораторная работа 8: источник питания, ваттметр, реостат, набор сопротивлений нагрузки.

Лабораторная работа 9: лабораторный стенд, включающий соленоиды и измерительную катушку, звуковой генератор, осциллограф, соединительные проводники.

Лабораторная работа 10: осциллограф, лабораторный макет установки для возбуждения колебаний, конденсатор, две эталонные катушки индуктивности, переменное сопротивление, соединительные проводники, дроссельная катушка 1200 витков.

Лабораторная работа 11: лабораторный стенд для наблюдения петли гистерезиса, генератор, двухканальный осциллограф, соединительные провода.

Лабораторная работа 12: два источника ЭДС, амперметр, вольтметр, реостат.

Лабораторная работа 13: датчик Холла, электромагнит, измерительные приборы, осциллограф, генератор, соединительные провода.

Лабораторная работа 14: вакуумный диод 2Ц2С, источник питания высокого и низкого напряжения, миллиамперметр 0-25 мА, вольтметр 0-150 В, амперметр 0-2,5 А.

Лабораторная работа 15: катушка индуктивности, усилитель-интегратор для регистрации воздействия магнитного поля.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


_____ С.А. Креков
23.06.2021

ФИЗИКА АТОМА, ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки
03.03.02 Физика

Профиль: Фундаментальная физика
форма обучения очная

Кислицын А.А. Физика атома, ядра и элементарных частиц. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

1. Пояснительная записка

Цель дисциплины — представить физическую теорию как обобщение наблюдений, практического опыта и эксперимента, дать студентам последовательную систему знаний о физике атома, атомного ядра и элементарных частиц, необходимых для формирования в сознании физической картины окружающего мира, применения физических понятий и законов к решению конкретных физических задач.

Задачи дисциплины:

- сообщить обучающимся основные принципы и законы современной физики атома, атомного ядра и элементарных частиц, и их математическое выражение;
- ознакомить обучающихся с основными физическими явлениями, происходящими в микромире, методами их наблюдения, с основными приборами и методами экспериментальных исследований в физике атома, атомного ядра и элементарных частиц;
- дать обучающимся ясное представление о границах применимости моделей и законов классической и современной физики.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в обязательную часть блока Б1 Дисциплины (модули).

Для ее успешного освоения необходимо предварительное изучение дисциплин «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Математический анализ», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Дополнительные главы математики для физиков».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевый/функциональный)
ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	–	Знает фундаментальные разделы общей физики; методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах; современные тенденции развития физико-математических и естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности
		Умеет применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач; получать расчетные формулы для различных установок и систем; планировать и проводить эксперимент, обрабатывать его результаты, оценивать погрешность полученных результатов
ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	–	Знает избранные области экспериментальных физических исследований; современную приборную базу, тенденции ее развития
		Умеет использовать различные метрические системы; работать с различной измерительной и аналитической аппаратурой, оценивать достоверность и погрешность измерений

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы	Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
		5 семестр
Общий объем зач. ед. час	4	4
	144	144
Из них:		
Часы контактной работы (всего):	114	114
Лекции	34	34
Практические занятия	34	34
Лабораторные / практические занятия по подгруппам	34	34
Консультации и иная контактная работа	12	12
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося	30	30
Вид промежуточной аттестации		экзамен

3. Система оценивания

3.1. При текущем контроле учитываются следующие виды деятельности обучающихся:

- Посещение лекций: 2 балла за посещение 1 пары лекций, т.е. до 34 баллов за семестр;
- Контрольные работы на семинарах: до 12 баллов за 3 задачи контрольной работы, т.е. до 24 баллов за 2 контрольные работы в семестре;

- Активная работа на семинарах, которая включает в себя разбор (защиту) выполненных домашних заданий у доски на семинаре: от 1 до 3 баллов за каждое задание (в зависимости от сложности). Защита выполненных заданий подразумевает, что обучающийся поясняет ход решения задач, обосновывает применения тех или иных формул и законов. Кроме этого, за участие в решении и обсуждении задачи «с места», за решение задач опережающими темпами и т.п. за один семинар обучающийся может получить 1 дополнительный балл; за весь семестр за этот вид деятельности – до 10 баллов.

- Выполнение лабораторных работ: до 4 баллов за одну лабораторную работу (1 балл – допуск к выполнению практической части, 2 балла – выполнение измерений и обработка результатов, 1 балл – защита выполненной работы в формате собеседования с преподавателем по контрольным вопросам). За семестр обучающийся имеет возможность выполнить 8 лабораторных работ, т.е. набрать до 32 баллов.

Таким образом, каждый обучающийся имеет возможность набрать за семестр до 100 баллов.

Критерии оценивания задач контрольных работ (максимум за одну задачу – 4 балла):

- Решение не приведено, или есть попытка решить задачу, но основные формулы приведены ошибочно: 0 баллов.

- Есть попытка решить задачу, правильно приведены основные формулы, но рассуждения содержат грубые ошибки; ответы либо не получены, либо неправильные (как численный, так и в общем виде): 1 балл.

- Есть попытка решить задачу, правильно приведены основные формулы, грубых ошибок нет, но решение не доведено до конца, ответы либо не получены, либо ответ неправильный, как численный, так и в общем виде: 2 балла.

- Задача правильно решена в общем виде, но нет необходимых комментариев, или отсутствует численный ответ, либо численный ответ неправильный из-за ошибок в расчетах или в размерности используемых или полученных величин: 3 балла.

– Задача решена правильно, получены правильные ответы, как численный, так и в общем виде, есть все необходимые комментарии и расчеты: 4 балла.

Форма промежуточной аттестации – экзамен.

Обязательным условием получения положительной оценки («удовлетворительно», «хорошо» или «отлично») за экзамен по дисциплине является набор не менее 24 баллов за лабораторный практикум (т.е. из 8 лабораторных работ необходимо полностью выполнить в течение семестра не менее 6); в ином случае студент автоматически получает оценку «неудовлетворительно».

Экзаменационную оценку можно получить автоматически при условии, что набрано не менее 24 баллов за лабораторный практикум, а также набрано не менее 20 баллов за семинарские занятия, включая контрольные работы. Если при этом суммарное количество баллов, полученных в течение семестра, составляет:

61 – 75, то можно автоматически получить оценку "удовлетворительно";

76 – 90 – оценку "хорошо";

91 и более – оценку "отлично".

Если студент набрал за семестр менее 61 балла или желает повысить оценку, то он сдает экзамен в устной форме.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
<i>Лекции и практические занятия</i>						
1.	Развитие атомистических и квантовых представлений	4	2	2	0	0
2.	Основы квантовой теории. Волновая функция, ее физический смысл.	5	2	2	0	0
3.	Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Уравнение Шредингера.	5	2	2	0	0
4.	Современные представления о строении атома.	5	2	2	0	0
5.	Физическое объяснение периодической системы Д.И. Менделеева.	5	2	2	0	0

6.	Атомы в магнитном и электрическом полях.	5	2	2	0	0
7.	Физика молекул.	5	2	2	0	0
8.	Элементы квантовой теории твердых тел.	5	2	2	0	0
9.	Свойства атомных ядер.	5	2	2	0	0
10.	Радиоактивный распад ядер. Основной закон радиоактивного распада.	5	2	2	0	0
11.	Альфа-распад ядер. Теория альфа-распада. Бета-распад ядер; виды бета-распада. Гамма-излучение ядер. Эффект Мессбауэра.	5	2	2	0	0
12.	Ядерные реакции.	5	2	2	0	0
13.	Деление и синтез атомных ядер.	5	2	2	0	0
14.	Взаимодействие ядерного излучения с веществом. Дозиметрия.	5	2	2	0	0
15.	Основные свойства элементарных частиц.	5	2	2	0	0
16.	Фундаментальные взаимодействия. Стандартная модель физики элементарных частиц.	5	2	2	0	0
17.	Современные астрофизические представления. Элементы космологии.	5	2	2	0	0
Итого (лекции и практические занятия, часов)		84	34	34	0	0
Лабораторные занятия						
18.	Дозиметрия ионизирующих излучений.	6	0	0	2	0
19.	Определение удельного заряда электрона.	6	0	0	4	0
20.	Определение среднего пробега и энергии альфа-частиц.	6	0	0	4	0

21.	Определение максимальной энергии бета-частиц.	6	0	0	4	0
22.	Счетчик Гейгера-Мюллера.	6	0	0	4	0
23.	Эффект Зеемана.	6	0	0	4	0
24.	Рентгеновские спектрометры.	6	0	0	4	0
25.	Эффект Мёссбауэра.	6	0	0	4	0
Итого (лабораторные занятия, часов)		48	0	0	34	0
26.	Консультации по дисциплине	10	0	0	0	10
27.	Экзамен	2	0	0	0	2
Итого (часов)		144	34	34	34	2

4.2. Содержание дисциплины по темам

Темы лекций и практических занятий:

Тема 1. Развитие атомистических и квантовых представлений.

Порядки величин, расстояний, энергий, специфика законов в микромире. Основные формулы теории относительности. Краткие исторические сведения о развитии физики атома, атомного ядра и элементарных частиц. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома. Квантовые постулаты Бора. Опыты Франка и Герца. Теория атома Бора. Спектр атома водорода. Изотопический сдвиг спектральных линий. Недостатки теории Бора.

Тема 2. Основы квантовой теории. Волновая функция, ее физический смысл.

Волновые свойства микрочастиц. Волны де Бройля. Экспериментальные доказательства волновых свойств микрочастиц. Волновая функция, ее физический смысл.

Тема 3. Соотношения неопределенностей Гейзенберга. Уравнение Шредингера.

Соотношения неопределенностей Гейзенберга. Стационарное и нестационарное уравнения Шредингера. Простейшие задачи квантовой механики. Частица в прямоугольной потенциальной яме. Квантовые точки. Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннельный эффект. Гармонический осциллятор. Различия квантовомеханического и классического описания движения. Понятие об операторах физических величин. Электрон в центрально-симметричном поле (водородоподобный атом): уровни энергии, квантовые числа, вид волновых функций.

Тема 4. Современные представления о строении атома.

Орбитальный механический и магнитный моменты электрона в атоме. Спин и собственный магнитный момент электрона. Экспериментальные доказательства существования спина и магнитного момента электрона; опыты Штерна и Герлаха. Ферми- и Бозе-частицы. Принцип Паули. Электронные оболочки атома и их заполнение. Спектры атомов щелочных металлов. Рентгеновские спектры, их природа. Закон Мозли. Эффект Оже.

Тема 5. Физическое объяснение периодической системы Д.И. Менделеева.

Физическое объяснение периодической системы Д.И. Менделеева. Полный момент импульса электрона в атоме. Символические обозначения атомных состояний. Спин-орбитальное взаимодействие и тонкая структура атомных спектров. Правила отбора. Векторная модель многоэлектронного атома. Правило Хунда. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры.

Тема 6. Атомы в магнитном и электрическом полях.

Взаимодействие атома с магнитным и электрическим полями. Магнитный момент атома. Экспериментальные методы измерения магнитных моментов. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР). Эффекты Зеемана и Штарка.

Контрольная работа 1 по темам: Специальная теория относительности. Водородоподобные атомы. Состояния электронов в атоме.

Тема 7. Физика молекул.

Типы химической связи, ковалентная и ионная связь. Метод орбиталей. Ион молекулы водорода. Молекулы галогенов щелочных металлов. Вращательные, колебательные и электронные спектры молекул.

Тема 8. Элементы квантовой теории твердых тел.

Элементы физики жидкости и твердого тела. Кристаллические и аморфные тела. Типы связей в кристаллах. Основные понятия зонной теории твердых тел. Зонные модели металлов, полупроводников, диэлектриков. Фононы и другие квазичастицы. Сверхпроводимость.

Тема 9. Свойства атомных ядер.

Состав атомного ядра. Заряд и массовое число ядра. Изотопы и изобары. Энергия связи атомного ядра. Магические числа. Стабильные и радиоактивные ядра. Радиус, спин и магнитный момент ядра. Статистика и четность ядер. Методы измерения спина и магнитного момента ядра. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Ядерные силы и их основные свойства. Взаимодействие нуклонов в ядре и модели атомных ядер. Капельная модель ядра. Полуэмпирическая формула Вейцеккера для энергии связи ядра. Оболочечная модель ядра, ее физическое обоснование. Потенциал усредненного ядерного поля. Спин-орбитальное взаимодействие. Объяснение спинов, четностей и магнитных моментов ядер в оболочечной модели. Вращательные и колебательные состояния ядер.

Тема 10. Радиоактивный распад ядер.

Основной закон радиоактивного распада, его статистический характер. Активность, единицы измерения активности. Постоянная распада, период полураспада, среднее время жизни ядра; методы измерения этих величин.

Тема 11. Альфа-распад ядер. Теория альфа-распада. Бета-распад ядер; виды бета-распада. Гамма-излучение ядер.

Альфа-распад ядер. Альфа-частицы. Спектры альфа-частиц. Энергетическое условие альфа-распада. Связь между периодом полураспада и энергией альфа-частиц (закон Гейгера-Неттола). Теория альфа-распада. Бета-распад ядер; виды бета-распада. Энергетические спектры электронов. Гамма-излучение ядер. Способы получения гамма-активных ядер. Ядерная изомерия. Внутренняя конверсия. Эффект Оже. Эффект Мессбауэра и его применение в физике. Спонтанное деление ядер.

Тема 12. Ядерные реакции.

Сечения реакций. Каналы ядерных реакций. Законы сохранения в ядерных реакциях. Энергия и порог ядерной реакции. Механизмы ядерных реакций. Модель составного ядра. Резонансные ядерные реакции. Формулы Брейта-Вигнера. Прямые ядерные реакции. Реакции под действием нейтронов. Методы получения и регистрации нейтронов. Быстрые, медленные и резонансные нейтроны. Искусственные и трансурановые элементы.

Тема 13. Деление и синтез атомных ядер.

Деление ядер под действием нейтронов. Цепная реакция деления. Активная зона; коэффициент размножения, критические размеры, критическая масса активной зоны. Ядерные реакторы на медленных и на быстрых нейтронах. Атомная энергетика. Вопросы безопасности атомной энергетика. Синтез легких ядер. Реакции в звездах. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Токамаки и стеллараторы. Лазерный и пузырьковый термояд. Мюонный катализ.

Тема 14. Взаимодействие ядерного излучения с веществом. Дозиметрия.

Пробег заряженных частиц в веществе. Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов. Прохождение гамма-излучения через вещество, основные механизмы взаимодействия с веществом и эффективные сечения. Взаимодействие нейтронов с веществом. Биологическое действие ядерных излучений. Дозиметрия и защита от ядерных излучений.

Тема 15. Основные свойства элементарных частиц.

Экспериментальные методы в физике элементарных частиц. Детекторы ядерных

частиц. Физические принципы работы ускорителей. Основные свойства элементарных частиц. Квазистабильные частицы и резонансы. Типы взаимодействий и классификация элементарных частиц. Лептоны и адроны. Частицы и античастицы. Законы сохранения в физике элементарных частиц.

Тема 16. Фундаментальные взаимодействия. Стандартная модель физики элементарных частиц.

Виртуальные частицы. Диаграммы Фейнмана. Электромагнитные взаимодействия. Элементы квантовой электродинамики. Лэмбовский сдвиг. Аномальный магнитный момент электрона. Сильные взаимодействия. Кварковая структура адронов. Мезоны и барионы, их основные свойства. Кварки и глюоны, их основные характеристики. Элементы квантовой хромодинамики. Экспериментальные подтверждения кварковой теории. Тетра- и пентакварки. Слабые взаимодействия. Основные свойства лептонов. Свойства нейтрино. Экспериментальные доказательства существования нейтрино. Проблема массы нейтрино. Несохранение четности в слабых взаимодействиях. Опыт Ву. Носители слабого взаимодействия - тяжелые бозоны. Стандартная модель фундаментальных взаимодействий в физике элементарных частиц. Бозон Хиггса. Недостатки стандартной модели. Теория струн.

Тема 17. Современные астрофизические представления. Элементы космологии.

Нуклеосинтез во Вселенной. Основные этапы развития Вселенной. Космические лучи и их основные характеристики. Первичные и вторичные космические лучи. Радиационные пояса Земли.

Контрольная работа 2 по темам: Оболочечная модель ядра. Радиоактивный распад ядер. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений.

Темы лабораторных занятий:

Тема 1. Дозиметрия ионизирующих излучений.

Ознакомление с дозиметрическими характеристиками ионизирующих излучений, единицами измерения и принципом работы промышленного дозиметра. Измерение и расчет мощности эквивалентной дозы для различных излучателей.

Тема 2. Определение удельного заряда электрона.

Ознакомление с теорией движения электрических зарядов в магнитном поле. Практическое применение этой теории для измерения отношения электрического заряда электрона к его массе.

Тема 3. Определение среднего пробега и энергии альфа-частиц.

Ознакомление с теорией α -распада, практическое изучение прохождения α -частиц в веществе (в воздухе), измерение энергии альфа-частиц.

Тема 4. Определение максимальной энергии бета-частиц.

Ознакомление с элементами теории бета-распада. Исследование поглощения β -частиц в алюминии, определение верхней границы β -спектра изотопного источника $\text{Sr}^{90}/\text{Y}^{90}$.

Тема 5. Счетчик Гейгера-Мюллера.

Ознакомление с принципами работы газонаполненных детекторов ядерных излучений. Исследование счетной характеристики и определение мертвого времени счетчика Гейгера-Мюллера.

Тема 6. Эффект Зеемана.

Ознакомление с теорией эффекта Зеемана. Исследование простого (нормального) эффекта Зеемана, наблюдаемого при расщеплении синглетной спектральной линии ртутного источника света, помещенного в магнитное поле.

Тема 7. Рентгеновские спектрометры.

Ознакомление с теорией рентгеновского излучения. Теоретическое и практическое изучение работы рентгеновских спектрометров, способов получения рентгеновских спектров и методов их обработки.

Тема 8. Эффект Мёссбауэра.

Ознакомление с теорией эффекта Мёссбауэра. Изучение принципов работы мёссбауэровского спектрометра, получение практических навыков настройки спектрометра, регистрация, обработка и интерпретация мёссбауэровских спектров ядер ^{57}Fe .

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
<i>Лекции и практические занятия</i>		
1.	Развитие атомистических и квантовых представлений.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
2.	Основы квантовой теории. Волновая функция, ее физический смысл.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
3.	Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Уравнение Шредингера.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
4.	Современные представления о строении атома.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
5.	Физическое объяснение периодической системы Д.И. Менделеева.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
6.	Атомы в магнитном и электрическом полях.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
7.	Строение и свойства молекул.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
8.	Элементы квантовой теории твердых тел.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
9.	Свойства атомных ядер.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
10.	Радиоактивный распад ядер. Основной закон радиоактивного распада. Активность, постоянная распада, период полураспада.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
11.	Альфа-распад ядер. Теория альфа-распада. Бета-распад ядер; виды бета-распада. Гамма-излучение ядер.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
12.	Ядерные реакции.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.

13.	Деление и синтез атомных ядер.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
14.	Взаимодействие ядерного излучения с веществом. Дозиметрия.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
15.	Основные свойства элементарных частиц.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы. - Выполнение домашнего задания.
16.	Фундаментальные взаимодействия. Стандартная модель физики элементарных частиц.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы.
17.	Современные астрофизические представления. Элементы космологии.	- Проработка лекций. - Чтение основной и дополнительной литературы.
Лабораторные занятия		
18.	Дозиметрия ионизирующих излучений.	- Подготовка лабораторного отчёта.
19.	Определение удельного заряда электрона.	- Подготовка лабораторного отчёта.
20.	Определение среднего пробега и энергии альфа-частиц.	- Подготовка лабораторного отчёта.
21.	Определение максимальной энергии бета-частиц.	- Подготовка лабораторного отчёта.
22.	Счетчик Гейгера-Мюллера.	- Подготовка лабораторного отчёта.
23.	Эффект Зеемана.	- Подготовка лабораторного отчёта.
24.	Рентгеновские спектрометры.	- Подготовка лабораторного отчёта.
25.	Эффект Мёссбауэра.	- Подготовка лабораторного отчёта.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устной форме.

Вопросы к экзамену разделены на три уровня: 0 (пороговый уровень), 1 (базовый уровень), 2 (повышенный уровень). Каждый экзаменационный билет содержит 3 вопроса: первый – уровня 0, второй – уровня 1 и третий – уровня 2.

Для получения удовлетворительной оценки необходимо и достаточно дать полный и правильный ответ на первый вопрос билета. На оценку «хорошо» надо дать полные и правильные ответы на первый вопрос билета, а также, на любой из оставшихся (2-й или 3-й). На оценку «отлично» надо дать полные и правильные ответы на все три вопроса билета.

Кроме этого, если студент набрал за практические занятия менее 20 баллов (т.е. без учета баллов за посещение лекций и лабораторный практикум), то к билету прилагается задача. В этом случае для получения положительной оценки необходимо, кроме ответов на вопросы, правильно решить задачу.

Примерные вопросы к экзамену:

В скобках указан уровень: 0 (пороговый уровень), 1 (базовый уровень), 2 (повышенный уровень)

1.(0). Специфика законов физики в микромире. Основные формулы теории относительности.

2.(0). Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома.

- 3.(0). Квантовые постулаты Бора. опыты Франка и Герца.
 - 4.(0). Модель водородоподобного атома по теории Бора.
 - 5.(0). Волновые свойства микрочастиц. Волны де Бройля. Экспериментальные доказательства волновых свойств микрочастиц.
 - 6.(1). Фазовая и групповая скорость волн де Бройля. Волновой пакет.
 - 7.(1). Волновая функция, ее физический смысл.
 - 8.(0). Соотношения неопределенности.
 - 9.(1). Уравнение Шредингера.
 - 10.(1). Частица в "потенциальной яме" ("ящике") с бесконечно высокими стенками.
- Квантовые точки.
- 11.(2). Частица в "потенциальной яме" ("ящике") конечной глубины.
 - 12.(1). Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннельный эффект. Коэффициент прозрачности потенциального барьера (без вывода формулы).
 - 13.(2). Туннельный эффект. Коэффициент прозрачности потенциального барьера (вывод формулы).
 - 14.(2). Линейный гармонический осциллятор.
 - 15.(2). Операторы физических величин в квантовой теории.
 - 16.(0). Водородоподобный атом. Орбитальный и собственный моменты импульса электрона и описание различных состояний электрона в атоме (основные результаты без вывода формул).
 - 17.(2). Водородоподобный атом. Вывод формул.
 - 18.(1). Спин и магнитный момент электрона.
 - 19.(1). Экспериментальные доказательства существования спина и магнитного момента электрона.
 - 20.(0). Ферми- и Бозе-частицы. Принцип Паули.
 - 21.(0). Строение электронных оболочек. Объяснение периодической системы Д.И. Менделеева.
 - 22.(1). Полный момент импульса электрона в атоме. Символические обозначения термов.
- Правила отбора для оптических переходов.
- 23.(2). Векторная модель многоэлектронного атома.
 - 24.(2). Квантовые состояния многоэлектронных атомов. Правило Хунда.
 - 25.(1). Рентгеновские спектры. Закон Мозли. Эффект Оже.
 - 26.(2). Магнитный момент электронной оболочки атома.
 - 27.(2). Эффект Зеемана. Эффект Штарка. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).
 - 28.(1). Физика молекулы. Ковалентная и ионная связь. Молекулярные спектры.
 - 29.(1). Излучение возбужденных атомов. Лазеры.
 - 30.(1). Элементы физики твердого тела. Виды и типы кристаллических решеток. Индексы Миллера.
 - 31.(2). Элементы квантовой теории твердого тела. Энергетические зоны. Фононы и другие квазичастицы.
 - 32.(0). Состав атомного ядра. Изотопы и изобары. Энергия связи атомного ядра.
 - 33.(1). Радиус, спин и магнитный момент ядра. Статистика и четность ядер.
 - 34.(2). Методы измерения спина и магнитного момента ядра. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР).
 - 35.(1). Ядерные силы. Капельная модель ядра. Формула Вейцеккера для энергии связи ядра.

- 36.(2). Оболочечная модель ядра. Спин-орбитальное взаимодействие нуклонов в ядре.
- 37.(2). Магнитный момент ядра. Гиромагнитное отношение нуклона в оболочечной модели ядра. Возбужденные состояния ядер.
- 38.(0). Радиоактивный распад ядер. Основной закон радиоактивного распада.
- 39.(0). Альфа-распад ядер.
- 40.(2). Теория альфа-распада.
- 41.(0). Бета-распады ядер.
- 42.(0). Гамма-излучение ядер. Внутренняя конверсия электронов. Ядерная изомерия. Эффект Мессбауэра.
- 43.(0). Спонтанное деление ядер.
- 44.(0). Ядерные реакции; их классификация, способы записи и общие закономерности.
- 45.(1). Энергия и порог ядерной реакции. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и четности в ядерных реакциях.
- 46.(2). Теория ядерных реакций.
- 47.(2). Ядерные реакции под действием нейтронов. Формулы Брейта-Вигнера.
- 48.(1). Искусственные и трансурановые элементы.
- 49.(0). Цепная реакция деления тяжелых ядер под действием нейтронов.
- 50.(0). Ядерные реакторы на медленных и на быстрых нейтронах. Атомная энергетика.
- 51.(0). Реакции термоядерного синтеза. Ядерные реакции в звездах.
- 52.(0). Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС). Критерий Лоусона. Магнитное удержание плазмы. Установки типа ТОКАМАК.
- 53.(1). Инерционное удержание плазмы. Лазерный термоядерный синтез. Пузырьковый термоядерный синтез. Мюонный катализ.
- 54.(1). Прохождение заряженных частиц, гамма-квантов и нейтронов через вещество. Защита от радиоактивных излучений.
- 55.(0). Дозиметрические единицы. Биологическое действие радиоактивных излучений. Нормы радиационной безопасности.
- 56.(1). Приборы физики элементарных частиц. Детекторы частиц (счетчики и трековые регистраторы). Ускорители.
- 57.(0). Элементарные частицы и их свойства. Законы сохранения в физике элементарных частиц.
- 58.(0). Типы взаимодействий и классификация элементарных частиц. Античастицы. Виртуальные частицы.
- 59.(2). Электромагнитные взаимодействия. Диаграммы Фейнмана.
- 60.(1). Сильные взаимодействия. Кварковая структура мезонов и барионов. Экспериментальные подтверждения кварковой теории.
- 61.(2). Слабые взаимодействия. Основные свойства лептонов. Несохранение четности в слабых взаимодействиях. Опыт Ву.
- 62.(1). Свойства нейтрино.
- 63.(2). Стандартная модель фундаментальных взаимодействий в физике элементарных частиц. Бозон Хиггса.
- 64.(2). Недостатки Стандартной модели. Теория струн.
- 65.(1). Космические лучи.
- 66.(2). Современные астрофизические представления. Элементы космологии.

Примерные задачи для подготовки к экзамену:

Задача 1. На какое минимальное расстояние приблизится альфа-частица с кинетической энергией $T = 0,40$ МэВ (при лобовом соударении) к покоящемуся тяжелому ядру атома свинца?

Задача 2. В спектре атомарного водорода известны длины волн трех линий, принадлежащих одной и той же серии: 97,26, 102,58 и 121,57 нм. Найти длины волн других линий в данном спектре, которые можно предсказать с помощью этих трех линий.

Задача 3. Определить для атома водорода и иона He^+ : энергию связи электрона в основном состоянии, потенциал ионизации, первый потенциал возбуждения и длину волны головной линии серии Лаймана.

Задача 4. Найти для атомов легкого и тяжелого водорода (H и D) разность:

- а) энергий связи их электронов в основном состоянии;
- б) длин головных линий серии Лаймана.

Задача 5. Нейтрон с кинетической энергией $T = 25$ эВ налетает на покоящийся дейтрон (ядро тяжелого водорода). Найти дебройлевские длины волн обеих частиц в системе их центра масс.

Задача 6. Узкий пучок электронов с кинетической энергией $T = 10$ кэВ проходит через поликристаллическую алюминиевую фольгу, образуя на экране систему дифракционных колец. Вычислить межплоскостное расстояние, соответствующее отражению третьего порядка от некоторой системы кристаллических плоскостей, если ему отвечает дифракционное кольцо диаметра $D = 3,20$ см. Расстояние между экраном и фольгой $l = 10,0$ см.

Задача 7. Используя правила Хунда, найти основной терм атома, незаполненная подболочка которого содержит:

- а) три p-электрона;
- б) четыре p-электрона.

Задача 8. Покоившееся ядро Po-210 испустило альфа-частицу с кинетической энергией $T = 5,77$ МэВ. Найти скорость отдачи дочернего ядра. Какую долю полной энергии, освобождаемой в этом процессе, составляет энергия отдачи дочернего ядра?

Задача 9. Тонкую золотую фольгу из стабильного Au-197 облучают по нормали к поверхности тепловыми нейтронами, плотность потока которых $J = 1,0 \times 10^{10} \text{ с}^{-1} \times \text{см}^{-2}$. Масса фольги $m = 10$ мг. В результате захвата нейтронов возникает бета-активный Au-198 , сечение образования которого $s = 98$ барн и период полураспада $T = 2,7$ сут. Найти время облучения, за которое число ядер Au-197 уменьшится на $h = 1,0\%$.

Задача 10. Найти средний путь, проходимый пи-мезонами с кинетической энергией, которая в $h = 1,2$ раза превышает их энергию покоя. Среднее время жизни очень медленных пи-мезонов $t_0 = 25,5$ нс.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ОПК-1: способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.)</p> <p><i>Знает</i> основные экспериментальные факты, лежащие в основе теории относительности и квантовой теории; основные положения квантовой теории; квантовые числа, характеризующие состояние электрона в атоме, принцип Паули, объяснение периодической системы Д.И. Менделеева; основные характеристики атомных ядер, виды радиоактивного распада, основной закон радиоактивного распада; способы получения ядерной энергии, физические принципы действия ядерных реакторов; основные свойства элементарных частиц; основные механизмы взаимодействия ядерного излучения с веществом, дозиметрические единицы, нормы радиационной безопасности и методы защиты от ядерных излучений.</p> <p><i>Умеет</i> применять законы физики атома, атомного ядра и элементарных частиц для решения конкретных научно-технических задач, возникающих в ходе профессиональной деятельности.</p> <p>Базовый (хор.)</p> <p><i>Знает</i> фундаментальные разделы физики атома, атомного ядра и элементарных частиц; экспериментальные факты, лежащие в основе теории относительности и квантовой теории; основные положения квантовой теории; квантовые числа, характеризующие состояние электрона в атоме, принцип Паули, объяснение периодической системы Д.И. Мен-</p>	Задачи домашних заданий, контрольных работ, отчеты по лабораторным работам, контрольные вопросы к лабораторным работам	Активность на практических занятиях. Правильность решений задач на практических задачах и в контрольных работах. Указание всех необходимых формул при решении контрольных работ. Демонстрация причинно-следственных связей при ответах на вопросы преподавателя. Правильность интерпретации физических законов.

	<p>делеева; основные характеристики атомных ядер; основные свойства ядерных сил; виды радиоактивного распада, основной закон радиоактивного распада; основные закономерности процессов деления и синтеза ядер, способы получения ядерной энергии, физические принципы действия ядерных реакторов; типы взаимодействий и современную классификацию элементарных частиц, основные свойства элементарных частиц; основные механизмы взаимодействия ядерного излучения с веществом, дозиметрические единицы, нормы радиационной безопасности и методы защиты от ядерных излучений.</p> <p>Умеет применять законы физики атома, атомного ядра и элементарных частиц для решения конкретных научно-технических задач, как в области фундаментальной физики физики, так и на междисциплинарных границах с другими областями знаний.</p> <p>Повышенный (отл.)</p> <p>Знает фундаментальные разделы физики атома, атомного ядра и элементарных частиц; основные этапы развития современных атомистических и квантовых представлений, экспериментальные факты, лежащие в основе теории относительности и квантовой теории; основные положения квантовой теории; квантовые числа, характеризующие состояние электрона в атоме, принцип Паули, объяснение периодической системы Д.И. Менделеева; основные характеристики атомных ядер, основные свойства ядерных сил; виды радиоактивного распада, основной закон радиоактивного распада, теорию альфа-распада; основные виды ядерных реакций, теорию ядерных реакций; основные закономерности процессов деления и синтеза ядер,</p>		
--	---	--	--

		<p>способы получения ядерной энергии, физические принципы действия ядерных реакторов; типы взаимодействий и современную классификацию элементарных частиц, основные свойства элементарных частиц; современные астрофизические представления; основные механизмы взаимодействия ядерного излучения с веществом, дозиметрические единицы, нормы радиационной безопасности и методы защиты от ядерных излучений.</p> <p><i>Умеет</i> применять законы физики атома, атомного ядра и элементарных частиц для решения конкретных научно-технических задач, как в области фундаментальной физики, так и на междисциплинарных границах с другими областями знаний; применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач, использовать различные разделы физики для решения комбинированных задач.</p>		
2.	<p>ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные</p>	<p>Пороговый (удовл.) <i>Знает</i> физические принципы работы современной технологической аппаратуры, применяемой в атомной и ядерной физике. <i>Умеет</i> применять законы и методы атомной и ядерной физики при решении задач экспериментального и прикладного характера; с помощью дозиметрических приборов измерять уровень радиационного фона, и определять степень его опасности.</p> <p>Базовый (хор.) <i>Знает</i> физические принципы работы современной технологической аппаратуры, применяемой в атомной и ядерной физике, их теоретическое и экспериментальное обоснование; успехи современной физики в синтезе трансурановых элементов. <i>Умеет</i> применять законы и методы атомной и ядерной физики</p>	<p>Отчеты по лабораторным работам, контрольные вопросы к лабораторным работам</p>	<p>Качество подготовки допуска к лабораторной работе. Полнота и правильность устных ответов на дополнительные вопросы преподавателя о работе лабораторной установки. Правильность снятия измерений с соблюдением необходимых условий. Приведение уравнений, необходимых для расчетов. Правильность расчетов погрешности. Формулировка</p>

		<p>при решении задач экспериментального и прикладного характера; выполнять физические измерения и оценивать получаемые результаты; с помощью дозиметрических приборов измерять уровень радиационного фона, определять степень его опасности и рассчитывать толщину экранов для защиты от радиоактивных излучений в лабораторных условиях; обосновать использование ускорителей для решения конкретных задач в ходе профессиональной деятельности.</p> <p>Повышенный (отл.)</p> <p><i>Знает</i> физические принципы работы современной технологической аппаратуры, применяемой в атомной и ядерной физике, их теоретическое и экспериментальное обоснование и границы их применимости; принципы работы ЭПР- и ЯМР-спектрометров; успехи современной физики в синтезе трансурановых элементов.</p> <p><i>Умеет</i> применять законы и методы атомной и ядерной физики при решении задач экспериментального и прикладного характера; выполнять физические измерения и оценивать получаемые результаты; обосновать использование ЭПР- и ЯМР-спектрометров, ускорителей, радиоактивных изотопов и трансурановых элементов для решения конкретных задач в ходе профессиональной деятельности; с помощью дозиметрических приборов измерять уровень радиационного фона, определять степень его опасности и рассчитывать толщину экранов для защиты от радиоактивных излучений в лабораторных условиях; получать расчетные формулы для различных установок и систем.</p>	<p>вывода к работе. Полнота и правильность ответов на контрольные вопросы к лабораторным работам.</p>
--	--	--	---

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

1. Кузнецов, С.И. Физика. Волновая оптика. Квантовая природа излучения. Элементы атомной и ядерной физики: учеб. пособие / С.И. Кузнецов, А.М. Лидер. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2019. — 212 с. - ISBN 978-5-9558-0350-0. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/1002478> (дата обращения: 13.05.2021). — Режим доступа: по подписке.

7.2. Дополнительная литература:

1. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: Учебное пособие / Сивухин Д.В. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 784 с.: ISBN 978-5-9221-0645-0. — Текст : электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/944829> (дата обращения: 13.05.2021). — Режим доступа: по подписке/

2. Кузнецов С.И. Курс физики с примерами решения задач. Часть III. Геометрическая и волновая оптика. Элементы атомной и ядерной физики. Основы физики элементарных частиц [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Кузнецов С.И.— Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2015. — 302 с. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34672.html> (дата обращения: 13.05.2021). — ЭБС «IPRbooks»/

3. Браун, А.Г. Атомная и ядерная физика. Элементы квантовой механики. Практикум: учебное пособие / А.Г. Браун, И.Г. Левитина. — Москва: ИНФРА-М, 2020. — 88 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — ISBN 978-5-16-010798-1. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/1062078> (дата обращения: 13.05.2021). — Режим доступа: по подписке.

7.3. Интернет-ресурсы:

-

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

eLIBRARY – научная библиотека (г. Москва). – <http://elibrary.ru>

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:
платформа для электронного обучения Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций и практических занятий требуется мультимедийная учебная аудитория, оснащенная учебной мебелью, доской аудиторной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием, персональным компьютером. На ПК должно быть установлено офисное ПО: операционная система MS Windows, офисный пакет MS Office, платформа MS Teams, офисный пакет LibreOffice, антивирусное ПО Kaspersky, а также должно быть обеспечено проводное подключение ПК к локальной сети и сети Интернет.

Для проведения лабораторных занятий требуется учебная аудитория «Лаборатория оптики и атомной физики», оснащенная учебной мебелью, доской аудиторной и специализированным оборудованием.

Специализированное оборудование:

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №1 «Дозиметрия ионизирующих излучений»: дозиметр-радиометр типа ДКС-96, блок детектирования БДКС-96ГБ, блок детектирования БДЗБ- 96, источник гамма-излучения с изотопом кобальт-60 типа

ИТОР-1, источник радионуклидный бета-излучения с радионуклидами стронций-90+иттрий-90, источник бета-излучения с изотопом криптон-85 типа БИК-М;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №2 «Определение удельного заряда электрона»: соленоид с вакуумным диодом ЗЦ18П, мультиметр типа 830-B (2 шт.), источник питания Б5-78/1, источник питания БЗ-706.1, источник питания DC POWER SUPPLY НУ 3005-2;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №3 «Определение среднего пробега и энергии альфа-частиц»: регулятор напряжения РШК, источник альфа-частиц, детектор альфа-частиц БДЗА2-01, измеритель скорости счёта УИМ2-2;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №4 «Определение максимальной энергии бета-частиц»: источники бета-частиц, установка для определения максимальной энергии бета-частиц (блок питания, детекторы), пластинки из алюминиевой фольги;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №5 «Счётчик Гейгера-Мюллера»: счётчик Гейгера-Мюллера типа ТВ-2, источник постоянного тока ТВ2, пересчетное устройство на микросхемах АП-17, источник радионуклидный бета-излучения с радионуклидами стронций-90+иттрий-90;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №6 «Эффект Зеемана»: экспериментальная установка ЛКР-1Р «для наблюдения эффекта Зеемана»;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №7 «Рентгеновские спектрометры»: учебно-моделирующий комплекс «Рентгеновский спектрометр» (УМК РС), системный блок Celeron-346/256Mb/80Gb/DVD-ROM/, клавиатура, мышь;

- лабораторная установка для выполнения лабораторной работы №8 «Эффект Мёссбауэра»: учебно-лабораторный комплекс «Эффект Мёссбауэра», системный блок «Unit»/AMD Phenom X49550/Giga-Bute GAMA78G-DS3H/DDRII1024Mb 3.5, клавиатура, мышь.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ФТИ

 С.А. Креков

23.06.2021

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Рабочая программа

для обучающихся по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) Фундаментальная физика

форма обучения очная

Геннадиник В.Б. Квантовая теория. Рабочая программа для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль Фундаментальная физика, академический бакалавриат, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины (модуля) опубликована на сайте ТюмГУ: Квантовая теория [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Геннадиник В.Б., 2021.

1. Пояснительная записка

Цель дисциплины: изучение закономерностей микромира, как для нерелятивистского, так и для релятивистского случаев.

Задачи дисциплины:

- познакомить студентов с фундаментальными положениями квантовой теории;
- в рамках нерелятивистской теории познакомить студентов с математическим аппаратом теории и уравнением Шредингера;
- познакомить студентов с элементарной теорией представлений квантовой теории;
- познакомить студентов с формами квантовой механики: операторной, матричной и вторичного квантования,
- продемонстрировать применение приближенных методов квантовой механики,
- познакомить студентов с принципом соответствия и предельным переходом к классической механике;
- познакомить студентов с проблематикой релятивистской теории и решении ее в рамках теории Дирака;
- продемонстрировать применение рассмотренных методов к решению конкретных задач квантовой теории.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в обязательную часть Блока 1 Дисциплины, реализуется в 6 семестре.

Для ее успешного освоения необходимо предварительное изучение дисциплин «Механика», «Специальная теория относительности», «Электричество и магнетизм», «Оптика», «Введение в математический анализ», «Математический анализ», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Векторный и тензорный анализ», «Дифференциальные уравнения», «Интегральные уравнения и вариационное исчисление», «Методы математической физики».

Освоение дисциплины «Квантовая теория» необходимо при последующем изучении дисциплин «Физика конденсированного состояния», «Статистическая физика. Физическая кинетика», а также для подготовки и написания выпускной квалификационной работы.

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения: (знаниевые/функциональные)
ОПК-3: Способность применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности.	-	Знает
		Умеет

- основные понятия квантовой теории;
- основные законы квантовой механики;
- связь квантовой теории с классической механикой;
- элементарную теорию представлений;
- основы квазирелятивистской теории движения частицы во внешнем поле;
- квантовую теорию систем тождественных частиц.

- применять основные понятия и законы теории при решении задач;

		<ul style="list-style-type: none"> – применять методы теории возмущений; – применять квазиклассический метод решения задач квантовой механики; – применять вариационный метод при решении задач. – использовать специализированные знания квантовой теории для освоения профильных физических дисциплин.
--	--	--

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 1

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			6 семестр
Общий объем	зач. ед.	3	3
	час	108	108
Из них:			
Часы аудиторной работы (всего):		84	84
Лекции		34	34
Практические занятия		34	34
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		0	0
Консультации и иная аудиторная работа		16	16
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		24	24
Вид промежуточной аттестации (зачет, диф. зачет, экзамен)			Экзамен

3. Система оценивания

При текущем контроле учитывается несколько видов деятельности обучающихся:

- активность на семинарах (0 – 5баллов);
- выполнение домашних заданий (0 – 3баллов);
- разбор (защита) выполненных заданий (0 – 3баллов);
- контрольные работы (0 – 10баллов);

Активность на семинаре включает в себя решение задач у доски, участие в решении задачи «с места», решение задач опережающими темпами и т.д. За один семинар обучающийся может набрать до 5 баллов.

Выполнение домашних заданий подразумевает проверку в начале занятия наличия выполненных заданий. Оценивается до 3 баллов.

Защита выполненных заданий подразумевает, что обучающийся поясняет ход решения задач, обосновывает применения тех или иных формул и законов. 0 – 3 баллов.

Критерии оценивания задач контрольных работ (**условный** максимум за одну задачу – 1 балл):
0 баллов (0%, «-»):

- Решение не приведено.
- Есть попытка решить задачу, но основные формулы или условия задачи приведены ошибочно.

0,3 балла (30%, «-+»):

- Правильно приведены основные формулы, но рассуждения содержат грубые ошибки.

- Задача решена в общем виде, но отсутствуют количественные расчеты.
- Отсутствуют необходимые рисунки или построения.

0,7 балла (70%, «+-»):

- Ход решения верный, но в выводах формул или расчетах есть незначительные ошибки.
- Неверно определены размерности используемых/полученных величин.

1 балл (100%, «+»):

- Задача решена правильно, есть все необходимые комментарии, рисунки и расчеты.

В определенных случаях по итогам набранных в семестре баллов обучающийся может получить экзаменационную оценку (см. п. 6).

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Основания квантовой теории	2	2			
2.	Линейные операторы 1	3		2		
3.	Основные понятия квантовой теории	3	2			
4.	Линейные операторы 2	3		2		
5.	Изменение квантовых состояний с течением времени	3	2			
6.	Волновая функция	3		2		
7.	Стационарное уравнение Шредингера	3	2			
8.	Стационарное уравнение Шредингера 1	3		2		
9.	Элементы теории представлений	5	2			2
10.	Стационарное уравнение Шредингера 2	3		2		
11.	Теория моментов 1	2	2			

12.	Стационарное уравнение Шредингера 3	3		2		
13.	Теория моментов 2	5	2			2
14.	Теория моментов	3		2		
15.	Движение частицы в центральном поле	5	2			2
16.	Контрольная работа	3		2		
17.	Квазиклассическое приближение	2	2			
18.	Движение частицы в центральном поле 1	3		2		
19.	Теория возмущений	5	2			2
20.	Движение частицы в центральном поле 2	3		2		
21.	Уравнение Клейна-Гордона	2	2			
22.	Квазиклассическое приближение	3		2		
23.	Уравнение Дирака и Паули	2	2			
24.	Вариационный метод	3		2		
25.	Квазирелятивистские приближения уравнения Дирака	2	2			
26.	Теория возмущений	3		2		
27.	Квантовая теория тождественных частиц	4	2			2
28.	Уравнение Дирака 1	3		2		
29.	Теория простейших атомов и молекул	2	2			
30.	Уравнение Дирака 2	3		2		
31.	Вторичное квантование 1	2	2			
32.	Уравнение Дирака 3	3		2		
33.	Вторичное квантование 2	5	2			2
34.	Методы решения задач	4		2		2
	Экзамен	2				2
	Итого (часов)	108	34	34		16

4.2. Содержание дисциплины по темам

Темы лекционных занятий:

Тема 1. Основания квантовой теории. Что объяснила квантовая теория, её место в эволюции физики. Физические основы квантовой теории. Ограниченность классической теории и необходимость перехода к квантовым понятиям. Гипотезы Планка, Эйнштейна, Бора, де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм. Состояние квантовомеханической системы. Волновая функция. Условие нормировки. Вероятностный смысл волновой функции. Принцип суперпозиции.

Тема 2. Основные понятия квантовой теории. Операторы физических величин (наблюдаемых). Свойства собственных значений и собственных векторов линейных самосопряженных операторов. Дискретные и непрерывные спектры собственных значений и их физическая интерпретация. Разложение векторов состояний по системе собственных векторов наблюдаемой, физический смысл коэффициентов разложения. Нормировка собственных векторов в случаях дискретного и непрерывного спектров. Измерение физических величин, понятие идеального измерения. Средние значения физических величин. Полный набор наблюдаемых, одновременная измеримость физических величин. Соотношение неопределенности для некоммутирующих наблюдаемых.

Тема 3. Изменение квантовых состояний с течением времени. Изменение векторов состояний со временем. Представление Шредингера. Основное уравнение квантовой нерелятивистской теории – уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности. Стационарные состояния и их свойства.

Тема 4. Стационарное уравнение Шредингера. Стационарные состояния и их свойства. Представление Гейзенберга. Уравнение Гейзенберга. Представление взаимодействия. Уравнение для волновой функции и наблюдаемых в представлении взаимодействия. Одномерные задачи квантовой теории. Линейный гармонический осциллятор в координатном, импульсном, матричном представлении и в представлении чисел заполнения.

Тема 5. Элементы теории представлений. Элементы теории представлений. Обозначения Дирака. Различные представления векторов состояний и наблюдаемых. Переход от одного представления к другому как результат унитарного преобразования, свойства унитарных преобразований.

Тема 6. Теория моментов 1. Общая теория моментов. Собственные значения и собственные векторы операторов моментов. Матричные элементы моментов. Момент импульса частицы.

Тема 7. Теория моментов 2. Сферические функции. Операторы спина. Спин электрона как пример системы с полуцелым моментом, матрицы Паули. Векторное сложение моментов, коэффициенты Клебша-Гордана.

Тема 8. Движение частицы в центральном поле. Движение в центральном поле. Общая теория движения в центральном поле. Радиальное уравнение Шредингера и разложение по полиномам Лаггера. Теория водородоподобного атома.

Тема 9. Квазиклассическое приближение. Приближенные методы квантовой теории. Переход к классической теории, квазиклассическое приближение, метод ВКБ. Туннельный эффект в квазиклассическом приближении. Условие квантования Бора-Зоммерфельда.

Тема 10. Теория возмущений. Теория возмущений для стационарных задач с дискретным спектром при отсутствии и наличии вырождения, первое и второе приближения.

Тема 11. Уравнение Клейна-Гордона. Основы релятивистской квантовой теории. Уравнение Клейна-Гордона-Фока (КГФ) и его применимость к описанию частиц с нулевым спином. Уравнение КГФ в электромагнитном поле.

Тема 12. Уравнение Дирака и Паули. Уравнение Дирака и его применимость к описанию частиц со спином половина. Решение уравнения Дирака для свободных частиц. Частицы и античастицы. Уравнение Дирака в электромагнитном поле. Уравнение непрерывности. Уравнение Паули.

Тема 13. Квазирелятивистские приближения уравнения Дирака. Первое квазирелятивистское приближение уравнения Дирака в электромагнитном поле. Второе квазирелятивистское приближение. Смысл поправок. Тонкая и сверхтонкая структура водородоподобного атома. Понятие о лэмбовском сдвиге. Нормальный и аномальный эффекты Зеемана.

Тема 14. Квантовая теория тождественных частиц. Тождественные частицы. Принцип неразличимости тождественных частиц. Симметричные и антисимметричные волновые функции. Бозоны и фермионы.

Тема 15. Теория простейших атомов и молекул. Теория двухэлектронных атомов, пара- и орто- состояния, вклад обменных эффектов. Многоэлектронные атомы, метод Хартри-Фока. Статистический метод Томаса-Ферми. Теория простейших молекул.

Тема 16. Вторичное квантование 1. Метод вторичного квантования для гармонического осциллятора

Тема 17. Вторичное квантование 2. Методы вторичного квантования для решения других задач.

Темы семинарских занятий:

Тема 1. Линейные операторы 1. Знакомство с линейными операторами

Тема 2. Линейные операторы 2. Манипуляции с линейными операторами

Тема 3. Волновая функция. Знакомство с волновой функцией

Тема 4. Стационарное уравнение Шредингера 1. Стационарное уравнение Шредингера. Свободная частица

Тема 5. Стационарное уравнение Шредингера 2. Одномерное движение. Простейшие задачи

Тема 6. Стационарное уравнение Шредингера 3. Одномерное движение. Простейшие задачи

Тема 7. Теория моментов. Теория моментов

Тема 8. Контрольная работа. Контрольная работа

Тема 9. Движение частицы в центральном поле 1. Движение частицы в центральном поле

Тема 10. Движение частицы в центральном поле 2. Движение частицы в центральном поле

Тема 11. Квазиклассическое приближение. Квазиклассическое приближение

Тема 12. Вариационный метод. Вариационный метод

Тема 13. Теория возмущений. Теория возмущений

Тема 14. Уравнение Дирака 1. Уравнение Дирака

Тема 15. Уравнение Дирака 2. Уравнение Дирака

Тема 16. Уравнение Дирака 3. Уравнение Дирака

Тема 17. Методы решения задач. Методология решения задач по квантовой теории.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовкам занятиям
1.	Основания квантовой теории	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
2.	Линейные операторы 1	Выполнение домашнего задания.
3.	Основные понятия квантовой теории	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.

4.	Линейные операторы 2	Выполнение домашнего задания.
5.	Изменение квантовых состояний с течением времени	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
6.	Волновая функция	Выполнение домашнего задания.
7.	Стационарное уравнение Шредингера	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
8.	Стационарное уравнение Шредингера 1	Выполнение домашнего задания.
9.	Элементы теории представлений	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
10.	Стационарное уравнение Шредингера 2	Выполнение домашнего задания.
11.	Теория моментов 1	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
12.	Стационарное уравнение Шредингера 3	Выполнение домашнего задания.
13.	Теория моментов 2	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
14.	Теория моментов	Выполнение домашнего задания.
15.	Движение частицы в центральном поле	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
16.	Контрольная работа	Выполнение домашнего задания.
17.	Квазиклассическое приближение	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
18.	Движение частицы в центральном поле 1	Выполнение домашнего задания.
19.	Теория возмущений	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
20.	Движение частицы в центральном поле 2	Выполнение домашнего задания.
21.	Уравнение Клейна-Гордона	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
22.	Квазиклассическое приближение	Выполнение домашнего задания.
23.	Уравнение Дирака и Паули	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
24.	Вариационный метод	Выполнение домашнего задания.
25.	Квазирелятивистские приближения уравнения Дирака	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
26.	Теория возмущений	Выполнение домашнего задания.
27.	Квантовая теория тождественных частиц	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
28.	Уравнение Дирака 1	Выполнение домашнего задания.
29.	Теория простейших атомов и молекул	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.

30.	Уравнение Дирака 2	Выполнение домашнего задания.
31.	Вторичное квантование 1	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
32.	Уравнение Дирака 3	Выполнение домашнего задания.
33.	Вторичное квантование 2	Проработка лекций. Чтение обязательной и дополнительной литературы.
34.	Методы решения задач	Выполнение домашнего задания.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

Экзаменационную оценку возможно получить автоматически, при условии, что: количество баллов, полученных в течение семестра, составляет 61% от максимально возможного при усвоении дисциплины – оценка "удовлетворительно";

количество баллов, полученных в течение семестра, составляет 76% от максимально возможного при усвоении дисциплины – оценка "хорошо".

Если студент желает повысить оценку или претендует на оценку "отлично", то он сдает экзамен в устной форме.

Экзаменационный билет, содержит 2 теоретических вопроса и задачу.

Ответы на экзаменационный билет оцениваются по следующим критериям:

"отлично" - студент дал полный ответ на теоретические вопросы, правильно решил задачу;

"хорошо" - студент показал систематические знания по дисциплине, способность применять их для решения практических задач, но имеются недочеты в ответах и решениях;

"удовлетворительно" - студент имеет представления об основах квантовой теории, однако недостаточно владеет теоретическим материалом, в ответах и решениях допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;

"неудовлетворительно" - студент не имеет систематических знаний в области квантовой теории, слабо разбирается в теоретических и практических вопросах, допускает принципиальные ошибки в ответах и решениях.

6.1 Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Примерные вопросы к экзамену

Обязательные вопросы

1. Физические основы квантовой теории
2. Состояние квантовомеханической системы. Принцип суперпозиции.
3. Среднее значение положения и импульса частицы.
4. Операторы физических величин (наблюдаемые).
5. Свойства собственных функций и собственных значений линейного самосопряженного оператора.
6. Одновременная измеримость физических величин. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
7. Полный набор наблюдаемых.
8. Уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности.
9. Стационарные состояния.
10. Изменение средних значений наблюдаемых. Уравнение Гейзенберга.
11. Интегралы движения.
12. Представление вектора состояния и операторов физических величин.
13. Унитарные преобразования.

14. Представления Гейзенберга, Шредингера и взаимодействия.

Дополнительные вопросы

15. Одномерное движение. Частица в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме.
16. Туннельный эффект.
17. Линейный гармонический осциллятор (алгебраический метод решения).
18. Общая теория моментов.
19. Момент импульса частицы.
20. Спин.
21. Движение частицы в центральном поле.
22. Водородоподобный атом.
23. Вариационный принцип и его использование для приближенного решения задач.
24. Стационарная теория возмущений (случай невырожденного уровня).
25. Стационарная теория возмущений (случай вырожденного уровня).
26. Нестационарная теория возмущений. Вероятности переходов.
27. Переход от квантовой в механики к классической.
28. Квазиклассическое приближение.
29. Условия квантования Бора-Зоммерфельда.
30. Прохождение частицы через потенциальный барьер в квазиклассическом приближении.
31. Принцип тождественности в квантовой теории. Бозоны и фермионы. Принцип запрета Паули.
32. Атом гелия. Орто- и парасостояния.
33. Уравнение Дирака. Решение уравнения Дирака для свободной частицы. Частицы и античастицы.
34. Уравнение Дирака для частицы в электромагнитном поле. Уравнение Паули.

Примерные задачи для контрольной работы/экзамена

1. Имеется бесконечно глубокая прямоугольная потенциальная яма (ППЯ):

$$V = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \alpha \\ \infty, & x < 0 \text{ и } x > \alpha \end{cases}$$

Найдите нормированные ВФ стационарных состояний частицы массы m , плотность распределения координат частицы. Постройте графики $\rho_n(x)$ для $n = 1, 2, 3$. Найдите среднее значение координаты, её флуктуацию, плотность распределения импульса частицы, среднее значение и флуктуацию импульса.

Решение.

Граничные условия (ГУ) $\psi(0) = \psi(\alpha) = 0$. УрШ для стационарных состояний $i\hbar\partial_t\psi = \hat{H}\psi$.

Ищем ψ в виде $\psi(x, t) = e^{-\frac{iEt}{\hbar}}\varphi(x)$. Тогда

$$i\hbar\frac{-iE}{\hbar}\varphi(x) = \hat{H}\varphi(x) \Rightarrow E\varphi(x) = \frac{(-i\hbar\partial_x)^2}{2m}\varphi(x) = \frac{-\hbar^2}{2m}\partial_{xx}^2\varphi(x).$$

Ищем решение в виде $\varphi(x) = A \sin(kx + \varphi_0)$:

$$EA \sin(kx + \varphi_0) = \frac{\hbar^2}{2m}k^2 A \sin(kx + \varphi_0) \Rightarrow E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \text{ и } k = \frac{1}{\hbar}\sqrt{2mE}.$$

Из ГУ:

$$\varphi(0) = A \sin(\varphi_0) = 0 \Rightarrow \varphi_0 = 0,$$

$$\varphi(\alpha) = \sin(k\alpha) = 0 \Rightarrow k\alpha = \pi n \Rightarrow k_n = \pi/\alpha \quad \text{и} \quad E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m\alpha^2} \quad - \quad \text{дискретный спектр}$$

энергетических уровней – следствие ГУ и ограниченности задачи в пространстве.

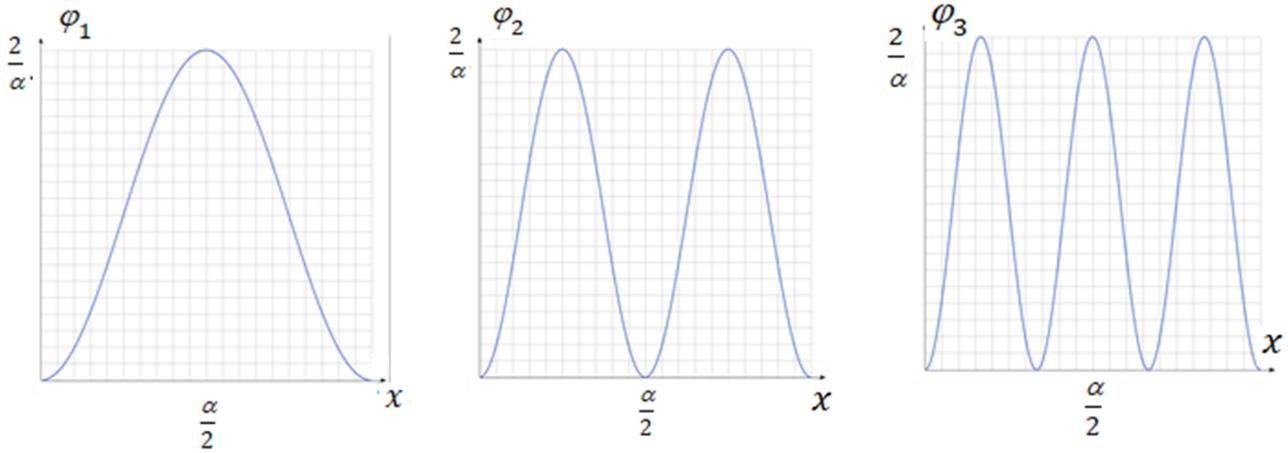
Итак: $\varphi_n(x) = A \sin\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right)$. Нормировка: $\langle \varphi_n | \varphi_n \rangle = 1 = \int_0^\alpha A^2 \sin^2 \frac{\pi x}{\alpha} dx$.

Из $\sin^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) \Rightarrow \int \sin^2(cx) dx = \frac{x}{2} - \frac{\sin(2cx) \cos(2cx)}{4c}$. Тогда

$$\langle \varphi_n | \varphi_n \rangle = A^2 \left[\frac{x}{2} - \frac{\alpha}{2\pi n} \sin \frac{\pi x}{\alpha} \cos \frac{\pi x}{\alpha} \right]_0^\alpha = A^2 \frac{\alpha}{2} \Rightarrow A = \sqrt{2/\alpha}.$$

Итого, нормированная ВФ стационарного состояния $\varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \sin\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right)$.

Плотность распределения координат частицы $\rho_n = \varphi_n^* \varphi_n = \frac{2}{\alpha} \sin^2\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right)$.



Среднее значение координаты

$$\overline{x}_n = \langle \varphi_n | \hat{x} | \varphi_n \rangle = \frac{2}{\alpha} \int_0^\alpha x \sin^2\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right) dx.$$

Из интегрирования по частям по Градштейн и Рыжик (ГР) 2.636.3 \Rightarrow

$$\int x \sin^2 ax dx = \frac{x^2}{4} - \frac{x \sin 2ax}{4} - \frac{\cos 2ax}{8a^2}. \text{ У нас:}$$

$$\overline{x}_n = \frac{2}{\alpha} \left[\frac{x^2}{4} - \frac{x}{4} \sin \frac{2\pi x}{\alpha} - \frac{\alpha^2}{8\pi^2 n^2} \cos \frac{2\pi x}{\alpha} \right]_0^\alpha = \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha^2}{8\pi^2 n^2} \cos 2\pi n + \frac{\alpha^2}{8\pi^2 n^2} = \frac{\alpha}{2}.$$

Среднее значение координаты – середина потенциальной ямы и не зависит от энергетического уровня: $\overline{x}_n = \frac{\alpha}{2}$.

Среднее значение квадрата координаты:

$$\overline{x}_n^2 = \langle \varphi_n | \hat{x}^2 | \varphi_n \rangle = \frac{2}{\alpha} \int_0^\alpha x^2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right) dx. \text{ Из ГР 2.636.4 } \Rightarrow$$

$$\int x^2 \sin^2 x dx = \frac{x^3}{6} - \frac{x \cos 2x}{4} - \frac{1}{4} \left(x^2 - \frac{1}{2}\right) \sin 2x. \text{ У нас:}$$

$$\int_0^\alpha x^2 \sin^2 cx dx = \frac{1}{c^3} \int_0^{\alpha c} (cx)^2 \sin^2 cx d(cx) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 \int_0^{\alpha c} (\xi)^2 \sin^2 \xi d\xi.$$

$$\overline{x}_n^2 = \frac{2}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 \left[\frac{\xi^3}{6} - \frac{\xi \cos 2\xi}{4} - \frac{1}{4} \left(\xi^2 - \frac{1}{2}\right) \sin 2\xi \right]_0^{\alpha c} = \frac{2\alpha^2}{(\pi)^3} \left\{ \frac{(\pi)^3}{6} - \frac{\pi}{4} \right\} = \alpha^2 \left\{ \frac{1}{3} - \frac{1}{2\pi^2 n^2} \right\}.$$

$$\text{Флуктуация координаты } \delta x^2 = \overline{x}_n^2 - \overline{x}_n^2 = \alpha^2 \left\{ \frac{1}{12} - \frac{1}{2\pi^2 n^2} \right\}.$$

Дисперсия $\delta x \in [0.033\alpha, 0.083\alpha]$ растет с ростом энергетического уровня.

$$\text{ВФ в импульсном представлении } a_n(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \int_0^\alpha e^{-ipx/\hbar} \sin \frac{\pi x}{\alpha} dx.$$

$$\text{Из ГР 2.663.1 } \Rightarrow \int e^{ax} \sin bx dx = \frac{1}{a^2 + b^2} e^{ax} (a \sin bx - b \cos bx).$$

У нас $a = -ip/\hbar$, $b = \pi/\alpha$.

$$a_n(p) = \frac{1}{\sqrt{\pi\hbar\alpha}} \frac{1}{(p/\hbar)^2 + (\pi/\alpha)^2} \left[e^{-ipx/\hbar} \left(\frac{-ip}{\hbar} \sin \frac{\pi x}{\alpha} - \frac{\pi}{\alpha} \cos \frac{\pi x}{\alpha} \right) \right]_0^\alpha.$$

Синус на пределах интегрирования обращается в 0.

$$a_n(p) = \frac{1}{\sqrt{\pi\hbar\alpha}} \frac{1}{\left(\frac{p}{\hbar}\right)^2 + \left(\frac{\pi m}{\alpha}\right)^2} \frac{m}{\alpha} \left[-e^{-\frac{ipx}{\hbar}} \cos \frac{\pi x}{\alpha} \right]_0^\alpha = \frac{1}{\sqrt{\pi\hbar\alpha}} \cdot \frac{\hbar^2}{p^2 + (m\hbar/\alpha)^2} \frac{m}{\alpha} \left\{ -e^{-\frac{ip\alpha}{\hbar}} \cos \pi + 1 \right\}.$$

Итого ВФ в импульсном представлении $a_n(p) = \sqrt{\frac{\pi\hbar}{\alpha}} \cdot \frac{n\hbar/\alpha}{p^2 + 2mE_n} \left\{ 1 - (-1)^n e^{-\frac{ip\alpha}{\hbar}} \right\}$.

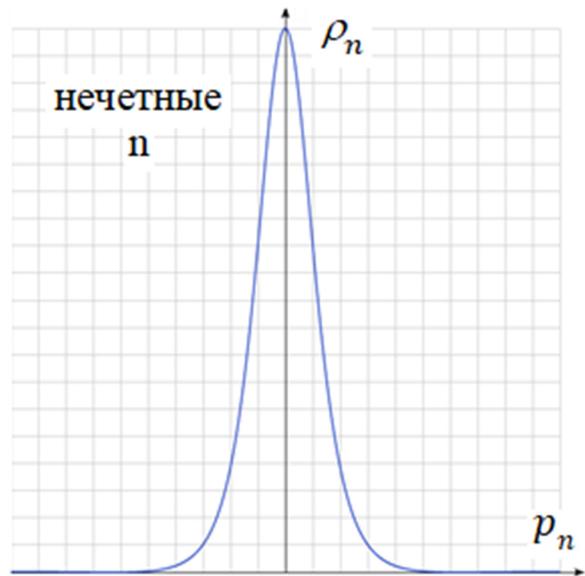
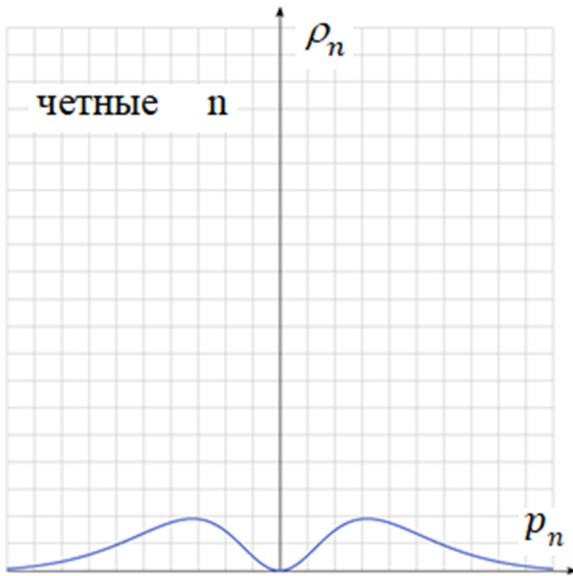
Плотность вероятности $\rho_n = a_n^* a_n$

$$\rho_n = \frac{\pi\hbar}{\alpha} \left(\frac{n\hbar}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{1}{(p^2 + 2mE_n)^2} \left\{ 1 - (-1)^n e^{\frac{ip\alpha}{\hbar}} \right\} \left\{ 1 - (-1)^n e^{-\frac{ip\alpha}{\hbar}} \right\} =$$

$$= \frac{\pi^2 \hbar^3 n^2}{\pi \alpha^3 (p^2 + 2mE_n)^2} \left\{ 1 + 1 - (-1)^n 2 \frac{e^{\frac{ip\alpha}{\hbar}} + e^{-\frac{ip\alpha}{\hbar}}}{2} \right\} = \frac{4\hbar m E_n}{\pi \alpha (p^2 + 2mE_n)^2} \left\{ 1 - (-1)^n \cos \frac{p\alpha}{\hbar} \right\}.$$

Для бесконечных скоростей $\rho_n(\pm\infty) = 0$.

Для покоящейся частицы $\rho_n(0) = \frac{4\hbar m E_n}{\pi \alpha m^2 E_n^2} \{1 - (-1)^n\}$. Для четных энергетических уровней $\rho_{2k}(0) = 0$, для нечетных $\rho_{2k+1}(0) = \frac{2\hbar}{\pi \alpha m E_n}$.



Среднее значение импульса

$$\overline{p}_n = \langle a_n | \hat{p} | a_n \rangle = \int_R \frac{4\hbar m E_n p}{\pi \alpha (p^2 + 2mE_n)^2} \left\{ 1 - (-1)^n \cos \frac{p\alpha}{\hbar} \right\} dp = 0 \text{ т.к. подынтегральное выражение}$$

нечетное, а интеграл берется по \mathbb{R} .

Для поиска среднего значения квадрата импульса вспомним, что $[\hat{p}^2, \hat{E}] = 0$, т.е. \hat{p}^2 и \hat{E} имеют общий набор ВФ $|\psi_n\rangle$: $\hat{E}|\psi_n\rangle = E_n|\psi_n\rangle$.

$$\text{Средняя энергия } \overline{E}_n = \langle \psi_n | \hat{E} | \psi_n \rangle = E_n \langle \psi_n | \psi_n \rangle = E_n.$$

$$\overline{p}_n^2 = \langle a_n | \hat{p}^2 | a_n \rangle = \langle \psi_n | 2m\hat{E} | \psi_n \rangle = 2m\overline{E}_n = 2mE_n.$$

Итого среднее значение квадрата импульса и флуктуация импульса:

$$\overline{p}_n^2 = \delta p_n^2 = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{\alpha^2}.$$

Другой способ – поиск \overline{p}_n^2 в конфигурационном представлении где $\hat{p} = -i\hbar\vec{\nabla}$.

$$\begin{aligned}\overline{p_n^2} &= \langle \psi_n | \hat{p}^2 | \psi_n \rangle = \langle \psi_n | -\hbar^2 \partial_{xx}^2 | \psi_n \rangle = \frac{-2\hbar^2}{\alpha} \int_0^\alpha \sin\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right) \partial_{xx}^2 \sin\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right) dx \\ &= \frac{-2\hbar^2}{\alpha} \int_0^\alpha -\left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{\alpha}\right) dx = \frac{2\pi\hbar^2}{\alpha^2} \int_0^\alpha \sin^2(\xi) d\xi = \frac{2\pi\hbar^2}{\alpha^2} \left[\frac{\xi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\xi \right]_0^\alpha \\ &= \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{\alpha^2}\end{aligned}$$

Проверим СНГ: $\delta x^2 \delta p_n^2 = \alpha^2 \left\{ \frac{1}{12} - \frac{1}{2\pi^2 n^2} \right\} \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{\alpha^2} = \hbar^2 \left(\frac{\pi^2 n^2}{12} - \frac{1}{2} \right) > \hbar^2 / 3.1$

2. Имеется бесконечно глубокая прямоугольная потенциальная яма (ППЯ):

$$V = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \alpha \\ \infty, & x < 0 \text{ и } x > \alpha \end{cases}$$

Состояние частицы описывается ВФ $\psi(x) = A x(x - \alpha)$.

Найдите нормированные ВФ, плотность распределения координат частицы. Постройте график $\rho(x)$. Найдите среднее значение и флуктуацию координаты. Нарисуйте на графике $\rho(x)$ дисперсию Δx . Найдите ВФ в импульсном представлении, плотность распределения импульса, среднее значение импульса, среднее значение квадрата импульса в конфигурационном представлении и его флуктуацию. Найдите распределение вероятностей энергий системы, среднее значение энергий и ее флуктуацию.

Решение.

ВФ $\psi(x) = A x(x - \alpha)$ – суперпозиция стационарных ВФ из 1.3.1.

Определим нормировку: $\langle \psi | \psi \rangle = 1 = \int_0^\alpha A^2 x^2 (x - \alpha)^2 dx = A^2 \int_0^\alpha (x^4 - 2\alpha x^3 + \alpha^2 x^2) dx = A^2 \left[\frac{1}{5} x^5 - \frac{2\alpha}{4} x^4 + \frac{\alpha^2}{3} x^3 \right]_0^\alpha = A^2 \alpha^5 \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = \frac{A^2 \alpha^5}{30} \Rightarrow A = \sqrt{\frac{30}{\alpha^5}}$

Итого нормированная ВФ: $\psi(x) = \sqrt{\frac{30}{\alpha^5}} x(x - \alpha)$.

Максимум плотности x_0 : $\text{max}(\psi) = \psi(x_0)$,
 $\psi'(x_0) = 0 = A(2x_0 - \alpha) \Rightarrow x_0 = \alpha/2$ и $\text{max}(\psi) = \frac{15}{8\alpha}$.

Плотность распределения координат частицы $\rho = \frac{30}{\alpha^5} x^2 (x - \alpha)^2$.

Среднее значение координаты

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \langle \psi | \hat{x} | \psi \rangle = \frac{30}{\alpha^5} \int_0^\alpha x^3 (x - \alpha)^2 dx = \\ &= \frac{30}{\alpha^5} \left[\frac{1}{6} x^6 - \frac{2\alpha}{5} x^5 + \frac{\alpha^2}{4} x^4 \right]_0^\alpha = \frac{\alpha}{2} \quad \text{— середина}\end{aligned}$$

потенциальной ямы.

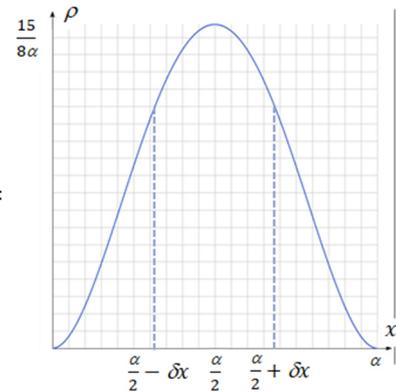
Среднее значение квадрата координаты:

$$\overline{x^2} = \langle \psi | \hat{x}^2 | \psi \rangle = \frac{2}{\alpha} \int_0^\alpha x^4 (x - \alpha)^2 dx = \frac{30}{\alpha^5} \left[\frac{1}{7} x^7 - \frac{2\alpha}{6} x^6 + \frac{\alpha^2}{5} x^5 \right]_0^\alpha = \frac{2}{7} \alpha^2.$$

Флуктуация координаты $\delta x^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2 = \alpha^2 / 28$.

ВФ в импульсном представлении:

$$a(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sqrt{\frac{30}{\alpha^5}} \int_0^\alpha e^{-ipx/\hbar} x(x - \alpha) dx = \sqrt{\frac{15}{\pi\hbar\alpha^5}} \int_0^\alpha (x^2 - \alpha x) e^{-ipx/\hbar} dx.$$



$\psi^* \psi =$

Из ГР 2.322.1-2 $\Rightarrow a(p) = \sqrt{\frac{15}{\pi\hbar\alpha^5}} \left[e^{-ipx/\hbar} \left(\frac{\hbar x^2}{-ip} - \frac{2\hbar^2 x}{(ip)^2} + \frac{2\hbar^3}{(-ip)^3} - \frac{\hbar\alpha x}{-ip} + \frac{\alpha\hbar^2}{(ip)^2} \right) \right]_0^\alpha =$

$$\sqrt{\frac{15}{\pi\hbar\alpha^5}} \left[e^{-ip\alpha/\hbar} \left(\frac{i\hbar\alpha^2}{p} + \frac{2\hbar^2\alpha}{p^2} - \frac{i2\hbar^3}{p^3} - \frac{i\hbar\alpha^2}{p} - \frac{\alpha\hbar^2}{p^2} \right) + \left(\frac{i2\hbar^3}{p^3} + \frac{\alpha\hbar^2}{p^2} \right) \right] = \sqrt{\frac{15\hbar}{\pi\alpha^5}} \frac{1}{p^3} \left[\alpha p \hbar (e^{-ip\alpha/\hbar} + 1) - \right.$$

$$\left. i2\hbar^2 (e^{-ip\alpha/\hbar} - 1) \right] = \sqrt{\frac{15\hbar}{\pi\alpha^5}} \frac{2}{p^3} e^{-ip\alpha/2\hbar} \left[\alpha p \hbar \frac{(e^{-ip\alpha/2\hbar} + e^{ip\alpha/2\hbar})}{2} + 2\hbar^2 \frac{(e^{-ip\alpha/2\hbar} - e^{ip\alpha/2\hbar})}{2i} \right]$$

Итого $a(p) = \sqrt{\frac{15\hbar}{\pi\alpha^5}} \frac{2\hbar}{p^3} e^{-ip\alpha/2\hbar} \left[\alpha p \cos \frac{\alpha p}{2\hbar} - 2\hbar \sin \frac{\alpha p}{2\hbar} \right]$.

Плотность вероятности $\rho = a^* a = \frac{60\hbar^3}{\pi\alpha^5 p^6} \cdot \left[\alpha p \cos \frac{\alpha p}{2\hbar} - 2\hbar \sin \frac{\alpha p}{2\hbar} \right]^2$ – четная функция.

Плотность очень быстро убывает с ростом импульса.

Среднее значение импульса

$\bar{p} = \langle a | \hat{p} | a \rangle = \int_R \rho(p) p dp = 0$ т.к. подынтегральное выражение нечетное, а интеграл берется по R.

Среднее значение квадрата импульса и флуктуацию импульса определим в конфигурационном представлении.

$$\overline{p^2} = \langle \psi | \hat{p}^2 | \psi \rangle = \frac{30}{\alpha^5} \int_0^\alpha x(x - \alpha) \left(-\hbar^2 \partial_{xx}^2 \right) (x^2 - \alpha x) dx = \frac{-60\hbar^2}{\alpha^5} \int_0^\alpha x(x - \alpha) dx = \frac{-60\hbar^2}{\alpha^5} \left[\frac{x^3}{3} - \frac{\alpha}{2} x^2 \right]_0^\alpha = \frac{10\hbar^2}{\alpha^2} = \delta p^2.$$

Проверим СНГ: $\delta x^2 \delta p^2 = \frac{\alpha^2}{28} \frac{10\hbar^2}{\alpha^2} = \frac{5}{14} \hbar^2$

ВФ $\psi(x) = Ax(x - \alpha)$ – суперпозиция стационарных ВФ из 1.3.1.

$|\psi(x)\rangle = \sum_n c_n |\psi_n(x)\rangle$, где $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \sin\left(\frac{\pi n x}{\alpha}\right)$.

$c_n = \langle \psi_n | \psi \rangle = \int_0^\alpha \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \sin\left(\frac{\pi n x}{\alpha}\right) \cdot \sqrt{\frac{30}{\alpha^5}} x(x - \alpha) dx = \frac{\sqrt{60}}{\alpha^3} \int_0^\alpha (x^2 - \alpha x) \sin\left(\frac{\pi n x}{\alpha}\right) dx$.

Из ГР 2.633.1 $\Rightarrow c_n = \frac{\sqrt{60}}{\alpha^3} \left[\frac{2\alpha^3}{(\pi n)^3} \cos \frac{\pi n x}{\alpha} + \frac{2\alpha^2 x}{(\pi n)^2} \sin \frac{\pi n x}{\alpha} - \frac{\alpha x^2}{\pi} \cos \frac{\pi n x}{\alpha} - \frac{\alpha^3}{(\pi n)^2} \sin \frac{\pi n x}{\alpha} + \frac{\alpha^2 x}{\pi} \cos \frac{\pi n x}{\alpha} \right]_0^\alpha = \frac{\sqrt{60}}{\alpha^3} \left[\cos \pi n \left(\frac{2\alpha^3}{(\pi n)^3} - \frac{\alpha^3}{\pi} + \frac{\alpha^3}{\pi} \right) - \frac{2\alpha^3}{(\pi n)^3} \right]_0^\alpha = \frac{4\sqrt{15}}{(\pi n)^3} ((-1)^n - 1)$.

Распределение вероятностей энергий системы

$\rho(E_n) = c_n^* c_n = \frac{240}{(\pi n)^6} ((-1)^n - 1)^2 = \frac{480}{(\pi n)^6} (1 - (-1)^n)$ – четные уровни энергии отсутствуют в суперпозиции СФ энергии, составляющей ВФ.

Средняя энергия $\bar{E} = \frac{\overline{p^2}}{2m} = \frac{5\hbar^2}{m\alpha^2}$.

Посчитаем ее также через распределение вероятностей энергий системы:

$\bar{E} = \sum_{n=1}^\infty c_n^* c_n E_n = \sum_{n=1}^\infty \frac{480}{(\pi n)^6} \frac{\hbar^2 (\pi n)^2}{2m\alpha^2} (1 - (-1)^n)$, где $E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m\alpha^2}$ – дискретный спектр энергетических уровней. В сумме остаются только нечетные слагаемые $n = 2k - 1$

$\bar{E} = \sum_{k=1}^\infty \frac{480}{(\pi(2k-1))^4} \frac{\hbar^2}{m\alpha^2} = \frac{480\hbar^2}{\pi^4 m\alpha^2} \sum_{k=1}^\infty \frac{1}{(2k-1)^4} = \frac{5\hbar^2}{m\alpha^2}$, в соответствии с ГР 0.234.5 $(\sum_{k=1}^\infty \frac{1}{(2k-1)^4} = \frac{\pi^4}{96})$.

Представим \bar{E} через $E_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m\alpha^2}$: $\bar{E} = \frac{10}{\pi^2} E_1 = 1,013 E_1$ т.е. энергия системы практически определяется первым энергетическим состоянием.

Среднее квадрата энергии:

$\overline{E^2} = \langle \psi | \hat{H}^2 | \psi \rangle = \frac{30}{\alpha^5} \int_0^\alpha x(x - \alpha) \left(\frac{\hbar^4}{4m^2} \partial_{xxxx}^4 \right) (x^2 - \alpha x) dx = 0$.

Флуктуация энергии $\delta E^2 = \overline{E^2} - \overline{E}^2 = -\overline{E}^2 = -\frac{25\hbar^4}{m^2\alpha^4}$. Таким образом, характерное время системы $\delta t > \frac{\hbar}{2\delta E} = \frac{\hbar}{2\overline{E}} = \frac{m\alpha^2}{10\hbar}$.

3. Линейный гармонический осциллятор находится в n -ом стационарном состоянии. Найдите среднюю потенциальную и кинетическую энергии.

Решение.

В n -ом стационарном состоянии линейный гармонический осциллятор описывается ВФ $|\psi_n\rangle = (\pi a^2)^{-1/4} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right) H_n\left(\frac{x}{a}\right)$, где $H_n(z)$ – полиномы Эрмита, $a = \sqrt{\hbar/m\omega}$ – характерный линейный масштаб осциллятора.

Полиномы Эрмита удовлетворяют следующим рекуррентным соотношением:

$zH_n(z) = nH_{n-1}(z) + \frac{1}{2}H_{n+1}(z)$. Следовательно:

$$\begin{aligned} \frac{x}{a} |\psi_n\rangle &= (\pi a^2)^{-1/4} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right) \left\{ nH_{n-1}\left(\frac{x}{a}\right) + \frac{1}{2}H_{n+1}\left(\frac{x}{a}\right) \right\} \\ &= (\pi a^2)^{-1/4} \frac{1}{\sqrt{2^{n-1}(n-1)!}} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right) \frac{n}{\sqrt{2n}} H_{n-1}\left(\frac{x}{a}\right) \\ &\quad + (\pi a^2)^{-1/4} \frac{1}{\sqrt{2^{n+1}(n+1)!}} \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right) \frac{\sqrt{2(n+1)}}{2} H_{n+1}\left(\frac{x}{a}\right) \\ &= \sqrt{\frac{n}{2}} |\psi_{n-1}\rangle + \sqrt{\frac{n+1}{2}} |\psi_{n+1}\rangle. \end{aligned}$$

Итак:

$$\begin{aligned} \frac{x}{a} |\psi_n\rangle &= \sqrt{\frac{n}{2}} |\psi_{n-1}\rangle + \sqrt{\frac{n+1}{2}} |\psi_{n+1}\rangle. \\ \left(\frac{x}{a}\right)^2 |\psi_n\rangle &= \sqrt{\frac{n}{2}} \frac{x}{a} |\psi_{n-1}\rangle + \sqrt{\frac{n+1}{2}} \frac{x}{a} |\psi_{n+1}\rangle = \sqrt{\frac{n}{2}} \sqrt{\frac{n-1}{2}} |\psi_{n-2}\rangle + \sqrt{\frac{n}{2}} \sqrt{\frac{n}{2}} |\psi_n\rangle + \sqrt{\frac{n+1}{2}} \sqrt{\frac{n+1}{2}} |\psi_n\rangle + \\ &\quad \sqrt{\frac{n+1}{2}} \sqrt{\frac{n+2}{2}} |\psi_{n+2}\rangle = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{2} |\psi_{n-2}\rangle + \left(n + \frac{1}{2}\right) |\psi_n\rangle + \frac{\sqrt{(n+1)(n+2)}}{2} |\psi_{n+2}\rangle. \end{aligned}$$

Средняя потенциальная энергия:

$$\begin{aligned} \overline{U}_n &= \langle \psi_n | \frac{k}{2} \hat{x}^2 | \psi_n \rangle = \int_R \psi_n^* \frac{ka^2}{2} \left(\frac{x}{a}\right)^2 \psi_n dx = \frac{ka^2}{2} \int_R \psi_n^* \left(\frac{\sqrt{n(n-1)}}{2} \psi_{n-2} + \left(n + \frac{1}{2}\right) \psi_n + \right. \\ &\quad \left. \frac{\sqrt{(n+1)(n+2)}}{2} \psi_{n+2} \right) dx = \frac{ka^2}{2} \left(n + \frac{1}{2}\right) \int_R \psi_n^* \psi_n dx = \text{в силу ортогональности } |\psi_n\rangle. \end{aligned}$$

$$\text{Итак: } \overline{U}_n = \frac{ka^2}{2} \left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{k\hbar}{2m\omega} \left(n + \frac{1}{2}\right).$$

Т.к. частота колебаний $\omega = \sqrt{k/m}$, то $\overline{U}_n = \frac{\hbar\omega}{2} \left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} E_n$.

2. Среднюю кинетическую энергию \overline{K}_n можно найти в конфигурационном представлении $\overline{K}_n = \langle \psi_n | \frac{\hat{p}^2}{2m} | \psi_n \rangle$, зная выражение для оператора импульса $\hat{p} = -i\hbar \partial_x$ и выражению для производной полинома Эрмита: $d_z H_n(z) = 2nH_{n-1}(z)$.

Однако проще получить \overline{K}_n из полной энергии осциллятора в n -ом состоянии и найденной средней потенциальной энергии: $\overline{K}_n = E_n - \overline{U}_n = \frac{1}{2} E_n = \frac{\hbar\omega}{2} \left(n + \frac{1}{2}\right) = \overline{U}_n$.

Как и в классическом осцилляторе средние кинетические и потенциальные энергии совпадают и равны половине общей энергии.

4. Имеется частица в поле $V = -\lambda\delta(x)$, $\lambda > 0$. Найдите нормированную ВФ. Найдите значение энергии. Найдите среднее значение потенциальной и кинетической энергии.

Решение.

1. Общее решение УрШ $|\psi\rangle$:

– в области $x < 0$: $|\psi\rangle_- = A_- e^{-\chi x} + B_- e^{\chi x}$.

– в области $x > 0$: $|\psi\rangle_+ = A_+ e^{-\chi x} + B_+ e^{\chi x}$.

Из требования ограниченности ВФ при $\pm\infty$ $A_- = B_+ = 0$:

$$|\psi\rangle_- = B_- e^{\chi x} \text{ и } |\psi\rangle_+ = A_+ e^{-\chi x}.$$

УрШ: $\frac{-\hbar^2}{2m} \partial_{xx}^2 |\psi\rangle = \frac{-\hbar^2 \chi^2}{2m} |\psi\rangle = E |\psi\rangle \Rightarrow E = \frac{-\hbar^2 \chi^2}{2m}$ – уровни энергии.

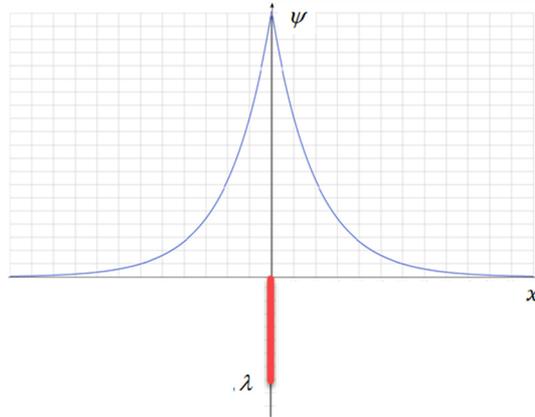
Из непрерывности ВФ при $x = 0$: $|\psi(0)\rangle_- = |\psi(0)\rangle_+ \Rightarrow B_- = A_+ = A$. Итак:

$$|\psi\rangle = (1 - \theta(x)) |\psi\rangle_- + \theta(x) |\psi\rangle_+, \text{ где } \theta(x) \text{ – функция Хэвисайда.}$$

Нормировка:

$$\begin{aligned} \langle \psi | \psi \rangle = 1 &= \int_R \left((1 - \theta(x)) |\psi\rangle_- + \theta(x) |\psi\rangle_+ \right)^2 dx = \int_{R^-} |\psi\rangle_-^2 dx + \int_{R^+} |\psi\rangle_+^2 dx = \\ &= 2 \int_{R^+} |\psi\rangle_+^2 dx = 2 \int_{R^+} A^2 e^{-2\chi x} dx = \frac{2A^2}{-2\chi} e^{-2\chi x} \Big|_0^\infty = \frac{A^2}{\chi} \Rightarrow A = \sqrt{\chi}. \end{aligned}$$

Нормированная ВФ: $|\psi\rangle = \sqrt{\chi} \left((1 - \theta(x)) e^{\chi x} + \theta(x) e^{-\chi x} \right)$



2. Разрыв производной при $x = 0$:

$$\Delta(\partial_x \psi)|_0 = (\partial_x \psi)|_{+0} - (\partial_x \psi)|_{-0} = \sqrt{\chi}(-\chi) - \sqrt{\chi}\chi = -2\chi^{3/2},$$

С другой стороны по теореме Ньютона-Лейбница интеграл по узкой области вблизи 0 дает:

$$\int_{-0}^{+0} \frac{-\hbar^2}{2m} \partial_{xx}^2 \psi dx = \frac{-\hbar^2}{2m} \Delta(\partial_x \psi)|_0. \text{ И этот же интеграл по УрШ равен } \int_-^+ (E - V(x)) \psi(x) dx =$$

$$\lambda \psi(0) = \lambda \sqrt{\chi} \Rightarrow \frac{-\hbar^2}{2m} \Delta(\partial_x \psi)|_0 = \frac{-\hbar^2}{2m} (-2\chi^{3/2}) = \frac{\hbar^2 \chi^{3/2}}{m} = \lambda \sqrt{\chi}. \text{ Отсюда } \chi = \frac{\lambda m}{\hbar^2} \text{ и энергия } E_0 = \frac{-\hbar^2 \chi^2}{2m} = \frac{-m\lambda^2}{2\hbar^2}.$$

3. Среднее значение потенциальной энергии. Потенциальная энергия отлична от 0 только при $x = 0, V = -\lambda\delta(x)$:

$$\bar{V} = \langle \psi | \hat{V} | \psi \rangle = \int_R (-\lambda)\delta(x) \psi^2(x) dx = -\lambda \psi^2(0) = -\lambda \chi e^{2\chi x} |_{x=0} = -\chi\lambda = -\frac{\lambda^2 m}{\hbar^2} = 2E_0.$$

Средняя кинетическая энергия $\bar{K} = \left\langle \psi \left| \frac{\hat{p}^2}{2m} \right| \psi \right\rangle$ вычисляется в виде интеграла по всей действительной оси без точки сингулярности и отдельно вклада сингулярности. Начнем с вклада сингулярности:

$$\int_{-0}^{+0} \psi \frac{-\hbar^2}{2m} \partial_{xx}^2 \psi dx = \psi(0) \int_{-0}^{+0} \frac{-\hbar^2}{2m} \partial_{xx}^2 \psi dx = \sqrt{\chi} e^{\chi^0} \frac{-\hbar^2}{2m} \Delta(\partial_x \psi)|_0 = \sqrt{\chi} \frac{-\hbar^2}{2m} (-2\chi^{\frac{3}{2}})$$

$$= \frac{\hbar^2 \chi^2}{m} = \frac{m\lambda^2}{\hbar^2}$$

Интеграл \int_R сведется к $2\int_{R^+}$:

$$\int_R = 2 \int_{R^+} \chi e^{-\chi x} \frac{-\hbar^2 \partial_{xx}^2}{2m} e^{-\chi x} dx = \frac{-\hbar^2 \chi^3}{m} \int_{R^+} e^{-2\chi x} dx = \frac{\hbar^2 \chi^2}{2m} e^{-2\chi x} \Big|_0^\infty = \frac{-m\lambda^2}{2\hbar^2}.$$

$$\text{Итого } \bar{K} = \int_R + \frac{m\lambda^2}{\hbar^2} = \frac{m\lambda^2}{2\hbar^2}$$

Сумма средней кинетической и потенциальной энергий предсказуемо равна полной: $\bar{K} + \bar{V} = E_0$.

5. Частица находится в поле: $V(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ V_0 > 0, & x > 0 \end{cases}$.

Найдите ВФ стационарных состояний для энергии частицы $E < V_0$. Образуют ли полученные функции полную систему?

Запишем УрШ для нашего потенциала: $\frac{-\hbar^2}{2m} \partial_{xx}^2 |\psi\rangle = (E - V_0 \theta(x)) |\psi\rangle$. Его решение с точностью до нормировки падающая и отраженная от стенки волна при $x < 0$ и :

$$\psi(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx}, & x < 0, \text{ где } k = \sqrt{2mE}/\hbar \text{ и } \chi = \sqrt{2m(V_0 - E)}/\hbar. \\ Ce^{-\chi x}, & 0 < x \end{cases}$$

ГУ при $x = 0$:

$$\begin{cases} \psi_-(0) = \psi_+(0) \\ \partial_x \psi_-(0) = \partial_x \psi_+(0) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A + B = C \\ ik(A - B) = -\chi C \end{cases}. \text{ Решая систему получим:}$$

$$B = A \frac{ik + \chi}{ik - \chi} \text{ и } C = A \frac{2ik}{ik - \chi}. \text{ Итого:}$$

$$\psi(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + A \frac{ik + \chi}{ik - \chi} e^{-ikx}, & x < 0 \\ A \frac{2ik}{ik - \chi} e^{-\chi x}, & 0 < x \end{cases}$$

6. Покажите, что в состоянии с определенным значением проекции $\hat{L}_z |m\rangle = m|m\rangle$:

$$\overline{L_x} = \overline{L_y} = 0, \overline{L_x L_y} = -\overline{L_y L_x} = \frac{im}{2}, \overline{L_x^2} = \overline{L_y^2}.$$

Решение.

При $\hat{L}_z |m\rangle = m|m\rangle$. Рассмотрим средние $\hat{L}_\pm = \hat{L}_x \pm i\hat{L}_y$

Из ортогональности СФ $\overline{L_\pm} = \langle m | \hat{L}_\pm | m \rangle = C \langle m | m \pm 1 \rangle = 0 \Rightarrow \overline{L_x} \pm i\overline{L_y} = 0$. Следовательно:

$$\overline{L_x} = 0 \text{ и } \overline{L_y} = 0.$$

Также верно $\overline{L_\pm^2} = \langle m | \hat{L}_\pm^2 | m \rangle = C' \langle m | m \pm 2 \rangle = 0$

$$\overline{L_\pm^2} = \overline{(\hat{L}_x \pm i\hat{L}_y)^2} = \overline{\hat{L}_x^2 - \hat{L}_y^2 \pm i(\hat{L}_x \hat{L}_y + \hat{L}_y \hat{L}_x)} = 0$$

Из равенства нулю действительной части $\Rightarrow \overline{\hat{L}_x^2} = \overline{\hat{L}_y^2}$.

Из равенства нулю мнимой части $\Rightarrow \overline{L_x L_y} = -\overline{L_y L_x}$.

Среднее коммутатора $[\hat{L}_x, \hat{L}_y] = i\hbar \hat{L}_z = i\hbar m = \overline{L_x L_y - L_y L_x} = 2\overline{L_x L_y}$

Отсюда: $\overline{L_x L_y} = -\overline{L_y L_x} = \frac{i\hbar}{2}$.

7. Ротатор – вращающаяся система двух жестко связанных частиц. Момент инерции ротатора $I = \mu\alpha^2$, где μ – приведенная масса частиц, α – расстояние между ними.

Найдите ВФ стационарных состояний и уровни энергии плоского ротатора с моментом инерции I . Какова кратность вырождения уровней?

Решение.

Классический гамильтониан вращающегося вокруг оси z абсолютно твердого тела: $H = L_z^2/2I$. Соответственно оператор Гамильтона ротатора $\hat{H} = \hat{L}_z^2/2I$. $[\hat{H}, \hat{L}_z] = 0 \Rightarrow \hat{H}$ и \hat{L}_z имеют общий набор ВФ $|m\rangle$: $\hat{L}_z|m\rangle = \hbar m|m\rangle$ и $\hat{H}|m\rangle = \frac{\hbar^2 m^2}{2I}|m\rangle$. Спектр СЗ гамильтониана $E_m = \frac{\hbar^2 m^2}{2I}$. Кратность вырождения всех уровней кроме первого – 2 т.к. $E_m = E_{-m}$ – вращение по и против часовой стрелки энергетически эквивалентны. E_0 соответствует состоянию покоя ротатора.

СФ оператора \hat{L}_z : $|m\rangle = C e^{i\mu\varphi}$. Нормировка $\langle m|m\rangle = \int_0^{2\pi} C^2 d\varphi = 1$. Откуда: $|m\rangle = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{i\mu\varphi}$

8. Найдите стационарные состояния сферически симметричного гармонического осциллятора с потенциальной энергией $V(r) = \frac{m\omega^2 r^2}{2}$.

Решение.

Потенциальная энергия сферически симметричного гармонического осциллятора $V(r) = \frac{m\omega^2 r^2}{2} = \frac{m\omega^2(x^2+y^2+z^2)}{2}$ допускает разделение переменных.

Решение УрШ в конфигурационном представлении ищем в виде $|n\rangle = |n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle$:
 $-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta|n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle + \frac{m\omega^2 r^2}{2}|n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle = -\frac{\hbar^2}{2m}(d_{xx}^2 + d_{yy}^2 + d_{zz}^2)|n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle +$
 $\frac{m\omega^2(x^2+y^2+z^2)}{2}|n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle = E|n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle$. Деля обе части уравнения на $|n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle$:

$$\left\{-\frac{\hbar^2 d_{xx}^2}{2m|n_x\rangle}|n_x\rangle + \frac{m\omega^2 x^2}{2}\right\} + \left\{-\frac{\hbar^2 d_{yy}^2}{2m|n_y\rangle}|n_y\rangle + \frac{m\omega^2 y^2}{2}\right\} + \left\{-\frac{\hbar^2 d_{zz}^2}{2m|n_z\rangle}|n_z\rangle + \frac{m\omega^2 z^2}{2}\right\} = E_x + E_y + E_z =$$

E . Выполнение это равенства при независимых x, y и z возможно только при выполнении 3 равенств $\left\{-\frac{\hbar^2 d_{ii}^2}{2m|n_i\rangle}|n_i\rangle + \frac{m\omega^2 r_i^2}{2}\right\} = E_i$ описывающих 3 независимых ЛО.

Итак: стационарные состояния сферического ЛО – $|n\rangle = |n_x\rangle|n_y\rangle|n_z\rangle$, а энергетический спектр $E = E_x + E_y + E_z = \hbar\omega\left(n_x + n_y + n_z + \frac{3}{2}\right) = \hbar\omega\left(n + \frac{3}{2}\right)$.

Кратность вырождения r число комбинаций n_i , таких что $n = n_x + n_y + n_z$. Значение n_x – любое целым числом от 0 до n . Для заданного n_x значение n_y может быть любым целым числом от 0 до $n + 1 - n_x$. Выбор n_x и n_y однозначно определяет n_z . Итак: $r = \sum_{n_x=0}^n (n + 1 - n_x) = \sum_{n_x=0}^n (n + 1) - \sum_{n_x=0}^n n_x = (n + 1)^2 - \frac{n(n+1)}{2} = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$

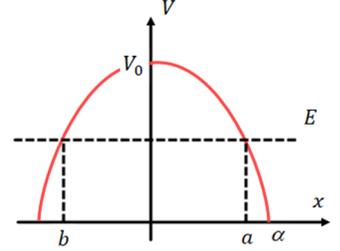
9. Вычислите в квазиклассическом приближении коэффициент прозрачности параболического барьера вида: $V(x) = \begin{cases} V_0 \left(1 - \frac{x^2}{\alpha^2}\right), & |x| < \alpha \\ 0, & |x| > \alpha \end{cases}$. Укажите критерий применимости результата (рассмотрите случай медленных частиц $E \rightarrow 0$).

Решение.

Коэффициент прозрачности $D = e^{-\frac{2}{\hbar} \int_b^a |p| dx}$.

При $E < V_0$: $|p(x)| = \sqrt{2m(V-E)} = \sqrt{2m \left\{ V_0 \left(1 - \frac{x^2}{\alpha^2}\right) - E \right\}}$.

Точки поворота: $V(b) = V(a) = E = V_0 \left(1 - \frac{a^2}{\alpha^2}\right) \Rightarrow a = -b =$



$$\alpha \sqrt{\frac{V_0 - E}{V_0}}.$$

$$I = \int_b^a |p| dx = \sqrt{2m} \int_b^a \sqrt{(V_0 - E) - \frac{V_0}{\alpha^2} x^2} dx = \sqrt{2m(V_0 - E)} \int_{-a}^a \sqrt{1 - \frac{V_0}{\alpha^2(V_0 - E)} x^2} dx.$$

$$\text{Делаем замену: } \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{V_0}{V_0 - E}} x = \sin y, \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{V_0}{V_0 - E}} dx = \cos y dy \Rightarrow dx = \alpha \cos y \sqrt{\frac{V_0 - E}{V_0}} dy$$

Пределы интегрирования $\sin(\pm a) = \sin\left(\pm \alpha \sqrt{\frac{V_0 - E}{V_0}} \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{V_0}{V_0 - E}}\right) = \sin(\pm 1) = \pm \frac{\pi}{2}$. Итак:

$$I = \sqrt{2m(V_0 - E)} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \sin^2 y} \alpha \cos y \sqrt{\frac{V_0 - E}{V_0}} dy = \sqrt{\frac{2m}{V_0}} \alpha (V_0 - E) \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 y dy =$$

$$\sqrt{\frac{2m}{V_0}} \alpha (V_0 - E) \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 + \cos 2y}{2} dy = \sqrt{\frac{m}{2V_0}} \alpha (V_0 - E) \left[y + \frac{\sin 2y}{2} \right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \sqrt{\frac{m}{2V_0}} \pi \alpha (V_0 - E).$$

$$D = e^{-\frac{2I}{\hbar}} = \exp\left(-\sqrt{\frac{2m}{V_0}} \frac{\pi \alpha}{\hbar} (V_0 - E)\right).$$

В случае медленных частиц $E \rightarrow 0$: $D = \exp\left(-\sqrt{2mV_0} \frac{\pi \alpha}{\hbar}\right)$.

Результат верен при $a = \alpha \sqrt{\frac{V_0 - E}{V_0}} \gg \bar{\lambda}$. При $E \rightarrow 0$ рассчитанный коэффициент прозрачности верен при $\alpha \gg \bar{\lambda}$.

10. Для частицы в БГППЯ ширины α , найдите в первом порядке теории возмущений смещение энергетических уровней под действием возмущения вида:

а) $V(x) = \frac{V_0}{\alpha} (\alpha - |2x - \alpha|), 0 < x < \alpha$

б) $V(x) = \begin{cases} V_0, & \beta < x < \alpha - \beta \\ 0, & 0 < x < \beta \text{ и } \alpha - \beta < x < \alpha \end{cases}$

Укажите условие применимости полученного результата.

Решение.

Для частицы в БГППЯ ширины α , найдите в первом порядке теории возмущений смещение

энергетических уровней $E_n^{(1)} = \hat{V}_{nn} = \langle \psi_n^{(0)} | \hat{V} | \psi_n^{(0)} \rangle$. Невозмущенные ВФ $\psi_n^{(0)}(x) = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \sin\left(\frac{\pi n x}{\alpha}\right)$.

а) Для потенциала $V(x) = \frac{V_0}{\alpha} (\alpha - |2x - \alpha|), 0 < x < \alpha$.

$$V(x) = \begin{cases} \frac{2V_0}{\alpha} x, & \text{при } x < \frac{\alpha}{2} \\ \frac{2V_0}{\alpha} (\alpha - x), & \text{при } x > \frac{\alpha}{2} \end{cases}$$

$$\hat{V}_{nn} = \frac{2V_0}{\alpha} \int_0^{\alpha} \sin^2\left(\frac{\pi mx}{\alpha}\right) (\alpha - |2x - \alpha|) dx = \frac{4V_0}{\alpha^2} \left\{ \int_0^{\alpha/2} \sin^2\left(\frac{\pi mx}{\alpha}\right) x dx + \int_{\alpha/2}^{\alpha} \sin^2\left(\frac{\pi mx}{\alpha}\right) (\alpha - x) dx \right\} = \frac{4V_0}{\alpha^2} \int_0^{\alpha/2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi mx}{\alpha}\right) \right\} x dx = \frac{4V_0}{2\alpha^2} \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 - \frac{4V_0}{\alpha^2} \left\{ \left[\frac{\alpha}{2\pi m} \sin\left(\frac{2\pi mx}{\alpha}\right) x \right]_0^{\alpha/2} - \frac{\alpha}{2\pi m} \int_0^{\alpha/2} \sin\left(\frac{2\pi mx}{\alpha}\right) dx \right\} = \frac{V_0}{2} - \left[\frac{4V_0}{\alpha^2} \left(\frac{\alpha}{2\pi m}\right)^2 \cos\left(\frac{2\pi mx}{\alpha}\right) \right]_0^{\alpha/2} = \frac{V_0}{2} - \frac{V_0}{\pi^2 n^2} (\cos(\pi n) - 1) = \frac{V_0}{2} \left\{ 1 + \frac{1 - (-1)^n}{\pi^2 n^2} \right\}.$$

$E_n^{(1)} = \frac{V_0}{2}$ и не зависит от уровня энергии для четных уровней. При росте n : $E_n^{(1)} \rightarrow \frac{V_0}{2}$.

Результат применим при $E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m\alpha^2} \gg E_n^{(1)} \sim \frac{V_0}{2} \Rightarrow V_0 \ll \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{m\alpha^2}$.

б) Для потенциала $V(x) = \begin{cases} V_0, & \beta < x < \alpha - \beta \\ 0, & 0 < x < \beta \text{ и } \alpha - \beta < x < \alpha \end{cases}$

$$\hat{V}_{nn} = \frac{2V_0}{\alpha} \int_{\beta}^{\alpha-\beta} \sin^2\left(\frac{\pi mx}{\alpha}\right) dx = \frac{V_0}{\alpha} \int_{\beta}^{\alpha-\beta} \left\{ 1 - \cos\frac{2\pi mx}{\alpha} \right\} dx = \frac{V_0}{\alpha} \left[x - \frac{\alpha}{2\pi m} \cos\frac{2\pi mx}{\alpha} \right]_{\beta}^{\alpha-\beta} = \frac{V_0}{\alpha} \left[\alpha - 2\beta - \frac{\alpha}{2\pi m} \left(\cos\frac{2\pi m(\alpha-\beta)}{\alpha} - \cos\frac{2\pi m\beta}{\alpha} \right) \right] = \frac{V_0}{\alpha} \left[\alpha - 2\beta + \frac{\alpha}{\pi m} \left(\sin \pi m \sin \frac{\pi(\alpha-2\beta)}{\alpha} \right) \right] = V_0 \frac{\alpha-2\beta}{\alpha}.$$

$E_n^{(1)}$ не зависит от уровня энергии. При $\beta = 0$ поправка к энергии $E_n^{(1)} = V_0$

Результат применим при $E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m\alpha^2} \gg E_n^{(1)} = V_0 \frac{\alpha-2\beta}{\alpha} \Rightarrow V_0 \ll \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m\alpha(\alpha-2\beta)}$.

6.2 Критерии оценивания компетенций:

Таблица 4

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ОПК-3: Способность применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности.	Пороговый(удовл.) Знает – фундаментальные положения квантовой теории. Умеет – применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач.	1. Контрольная работа (7 вариантов); 2. Вопросы к экзамену, 34 вопроса.	Полнота и правильность решения задач контрольной работы. Полнота и правильность ответов на экзамене.

		<p>Базовый (хор.)</p> <p><i>Знает</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – фундаментальные положения квантовой теории; – математический аппарат теории и уравнение Шредингера; – элементарную теорию представлений квантовой теории; – формы квантовой механики: операторную, матричную и вторичного квантования. <p><i>Умеет</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач; – применять приближенные методы квантовой механики. 		
		<p>Повышенный (отл.)</p> <p><i>Знает</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – фундаментальные положения квантовой теории; – математический аппарат теории и уравнение Шредингера; – элементарную теорию представлений квантовой теории; – формы квантовой механики: операторную, матричную и вторичного квантования, 		

		<ul style="list-style-type: none"> – принципом соответствия и предельный переход к классической механике; – проблематике релятивистской теории в рамках теории Дирака. <p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – применять физические законы и расчетные формулы при решении конкретных задач; – применять приближенные методы квантовой механики, – использовать различные разделы физики для решения комбинированных задач. 		
--	--	---	--	--

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1 Основная литература:

1. Ландау Л.Д. Теоретическая физика : учеб. пособие для физ. спец. ун-тов / Москва : Наука, 1974. Т. 3: Квантовая механика. Нерелятивистская теория.
2. Львовский А. Отличная квантовая механика = Quantum physics : учебное пособие : в 2 ч. / перевод с английского Н. Лисовой. Москва : Альпина нон-фикшн, 2019.

7.2 Дополнительная литература:

1. Балашов, В. В. Курс квантовой механики / В. В. Балашов, В. К. Долинов. — 2-е изд. — Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. — 336 с. — ISBN 978-5-4344-0603-1. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91940.html> (дата обращения: 12.11.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Толмачев, В. В. Основы квантовой механики : учебное пособие / В. В. Толмачев, А. А. Федотов, С. В. Федотова. — Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. — 240 с. — ISBN 978-5-4344-0754-0. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91974.html> (дата обращения: 12.11.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
3. Парфенов, П. С. Квантовая механика : методическое пособие к практикуму по квантовой физике / П. С. Парфенов. — Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2012. — 133 с. — ISBN 2227-8397. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт].

- URL: <http://www.iprbookshop.ru/66502.html> (дата обращения: 12.11.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
4. Ведринский, Р. В. Квантовая механика : учебник / Р. В. Ведринский. — Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2009. — 384 с. — ISBN 978-5-9275-0706-1. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/46976.html> (дата обращения: 12.11.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.
 5. Байков, Ю. А. Квантовая механика : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. - 3-е изд. - Москва : Лаборатория знаний, 2020. - 294 с. - ISBN 978-5-00101-856-8. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1200576> (дата обращения: 12.11.2020). – Режим доступа: по подписке.

7.3 Интернет-ресурсы:

1. Калькулятор Интегралов – <https://www.integral-calculator.ru/>.
2. Калькулятор Производных – <https://www.derivative-calculator.net/>.
3. Построение графиков функций онлайн – <http://www.yotx.ru/>.

7.4 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы: не требуются

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

– Лицензионное ПО:

платформа для электронного обучения Microsoft Teams

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекционных занятий требуется аудитория, рассчитанная на 60-80 человек, оборудованная мультимедийными средствами, а так же меловой или интерактивной доской.

Для проведения семинарских занятий требуется аудитория, рассчитанная на 20-30 человек, оборудованная меловой или интерактивной доской.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ФТИ

 С.А. Креков

23.06.2021

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Рабочая программа

для обучающихся по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль): Фундаментальная физика
форма обучения очная

Гильманов А. Я., Вершинин В. Е. Вычислительная физика и численные методы. Рабочая программа для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика: Фундаментальная физика, академический бакалавриат, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины (модуля) опубликована на сайте ТюмГУ: Вычислительная физика и численные методы [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Гильманов А. Я., Вершинин В. Е., 2021.

Рабочая программа дисциплины включает следующие разделы:

1. Пояснительная записка

Целью дисциплины является освоение методики проведения численных исследований физических процессов, знакомство с основными численными методами для нелинейных алгебраических уравнений, обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, получение опыта численных исследований, ознакомление с основными требованиями к анализу результатов исследований.

Задачи учебного курса:

- познакомить студентов с основными этапами численного исследования физических процессов;
- научить применять необходимые численные методы для решения;
- дать понятия порядка аппроксимации, устойчивости и сходимости;
- дать основные требования к анализу результатов исследований.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в обязательную часть блока Б1 Дисциплины, изучается в 5 и 6 семестрах. Для ее успешного изучения необходимы знания и умения, приобретенные в результате освоения предшествующих дисциплин: «Математический анализ», «Дополнительные главы математики для физиков», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество и магнетизм».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения: (знаниевые/функциональные)
Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности (ОПК-3)	-	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> – основы информационной и библиографической культуры; – современные информационно-коммуникационные технологии для применения численных методов; – основные требования информационной безопасности
		<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – использовать информационно-коммуникационные технологии при решении стандартных задач численных методов; – безопасно работать с данными в локальных и глобальных сетях

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 1

Вид учебной работы		Всего часов	Часов в семестре	
			5	6
Общая трудоемкость	зач. ед.	8	4	4
	час	288	144	144
Из них:				
Часы аудиторной работы (всего):		236	118	118
Лекции		68	34	34
Практические занятия		0	0	0
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		136	68	68
Консультации и иная контактная работа		32	16	16
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		52	26	26
Вид промежуточной аттестации (зачет, диф. зачет, экзамен)			Зачет	Экзамен

3. Система оценивания

Оценочными средствами являются лабораторные работы, домашние задания, посещение лекций, зачёт и экзамен.

Текущий контроль на занятиях в семестрах 5 и 6 оценивается по 100-балльной шкале в соответствии с критериями:

За посещение лекции студенту ставится 1 балл за каждую посещённую лекцию, за непосещение – 0 баллов за каждую не посещённую лекцию.

За выполнение более 50% заданий на лабораторной работе (кроме последней в каждом семестре) студенту ставится 1 балл, в ином случае – 0 баллов, за выполнение домашнего задания с каждой лабораторной работы студенту ставится 1 балл, в случае невыполнения – 0 баллов.

За выполнение последней лабораторной работы в семестрах 5 и 6 студенту ставится 16 баллов, если все её задания были выполнены, если выполнено более половины заданий, но не выполнено хотя бы одно задание – 8 баллов, в случае выполнения менее половины заданий – 0 баллов.

Шкала перевода баллов в оценки:

5 семестр.

- менее 61 балла – «незачтено»;
- от 61 до 100 баллов – «зачтено».

6 семестр.

- менее 61 балла – «неудовлетворительно»;
- от 61 до 75 баллов – «удовлетворительно»;
- от 76 до 90 баллов – «хорошо»;
- от 91 до 100 баллов – «отлично».

Форма промежуточной аттестации в пятом семестре – зачёт. Если студент согласен с оценкой, полученной в ходе текущего контроля, то она ставится автоматически, иначе студент сдаёт зачёт. Зачёт проводится в форме собеседования по вопросам билета. В билете предлагается два теоретических вопроса и один практический (задача). Необходимым условием положительной оценки является выполнение всех лабораторных работ. На оценку «зачтено» нужно ответить не менее чем на 1 теоретический вопрос и решить задачу, в ином случае ставится «не зачтено».

Форма промежуточной аттестации в шестом семестре – экзамен. Если студент согласен с оценкой, полученной в ходе текущего контроля, то она ставится автоматически, иначе студент сдаёт экзамен. Экзамен проводится в форме собеседования по вопросам билета. В билете предлагается два теоретических вопроса и один практический (задача).

Необходимым условием положительной оценки является выполнение всех лабораторных работ.

На оценку «отлично» нужно подробно ответить на все теоретические вопросы и решить задачу, на оценку «хорошо» допускается неточность в ответе на один из теоретических вопросов при подробном ответе на другой теоретический вопрос и при решённой задаче, на оценку «удовлетворительно» необходимо ответить на 1 теоретический вопрос и решить задачу.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины (модуля), час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
	Семестр 5					
1	Введение в вычислительную физику	12	4	0	4	0
2	Погрешности округления	16	2	0	8	2
3	Интерполяция функций	22	6	0	12	2
4	Методы решения нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений	28	8	0	16	2
5	Методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Законы Кирхгофа	18	4	0	8	2
6	Метод автоматической переменной. Уравнение пьезопроводности	14	2	0	4	2
7	Численное нахождение значений интегралов	16	4	0	8	2
8	Линеаризация дифференциальных	16	4	0	8	2

	уравнений. Гармонический осциллятор					
	Зачёт	2	0	0	0	2
	Итого (часов, семестр 5)	144	34	0	68	16
	Семестр 6					
1	Введение в методы конечных разностей. Метод Эйлера	24	6	0	12	4
2	Методы Рунге-Кутты	24	4	0	8	2
3	Явная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа	24	6	0	12	2
4	Неявная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа	24	6	0	12	2
5	Методы решения физических уравнений гиперболического типа. Волновое уравнение	24	6	0	12	2
6	Методы решения физических уравнений эллиптического типа	22	6	0	12	2
	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов, семестр 6)	144	34	0	68	16
	Итого (часов)	288	68	0	136	32

4.2. Содержание дисциплины по темам

Семестр 5:

1. "Введение в вычислительную физику"

Введение в вычислительную физику. Повторение основ программирования и составления алгоритмов и блок-схем. Классификация численных методов. Необходимость применения численных методов.

2. "Погрешности округления"

Погрешности округления. Погрешность численного метода. Методы оценки погрешностей округления. Накопление погрешностей округления.

3. "Интерполяция функций"

Основные понятия численных методов. Сетка. Сеточная функция. Консервативные схемы. Интерполяция функций. Интерполяционный полином. Интерполяционные формулы Лагранжа и Ньютона. Метод наименьших квадратов.

4. "Методы решения нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений"

Методы решения нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений. Метод простой итерации для нахождения решений уравнения на собственные значения при использовании метода разделения переменных Фурье для решения уравнения теплопроводности с заданным потоком по закону Ньютона-Рихмана. Сжимающие отображения. Итерационный метод Ньютона.

5. "Методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Законы Кирхгофа"

Методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Законы Кирхгофа. Метод Гаусса. Правило Крамера. Совместность систем линейных алгебраических уравнений. Метод простой итерации для решения систем линейных алгебраических уравнений. Метод Зейделя.

6. "Метод автомодельной переменной. Уравнение пьезопроводности"

Уравнения в частных производных. Уравнение пьезопроводности и его решение. Метод автомодельной переменной. Специальные функции.

7. "Численное нахождение значений интегралов"

Численное нахождение значений интегралов. Метод трапеций. Метод Симпсона.

8. "Линеаризация дифференциальных уравнений. Гармонический осциллятор"

Линеаризация дифференциальных уравнений. Линеаризация с помощью разложения в ряд Тейлора. Гармонический осциллятор.

Примеры оценочных средств для текущего контроля:

Задания для лабораторной работы:

1. Найти с помощью программы:

1) Корень линейного уравнения $2x+3=0$.

2) Все корни квадратного уравнения $x^2+6x-7=0$.

Ответ: 1) $x=-1,5$; 2) $x_1=1, x_2=-7$.

2. Интерполировать интеграл от приведённой функции распределения Максвелла, характеризующий относительное число молекул, скорости которых лежат в диапазоне от относительной скорости u до ∞ , по формуле Лагранжа и найти относительное число молекул, скорости которых лежат в диапазоне относительных скоростей от 0,6 до 1,4.

Напомним, что интеграл от приведённой функции распределения Максвелла вычисляется по формуле

$$\psi(u) = \int_u^{\infty} \frac{4}{\sqrt{\pi}} u^2 e^{-u^2} du,$$

где относительная скорость

$$u = \frac{v}{v_{не}}$$

v – скорость молекулы, $v_{не}$ – наиболее вероятная скорость молекул.

Известны следующие значения этого интеграла:

u	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
$\psi(u)$	0,9992	0,9190	0,5724	0,2123	0,0460

Построить график зависимости найденного полинома от u с шагом по u 0,1 в диапазоне относительных скоростей от 0,1 до 2,1 включительно (для точки 2,1 будет экстраполяция). Наложить на эти же координатные оси график, построенный по методу наименьших квадратов самой программой Excel по 5 точкам из таблицы. Сравнить полученный полином с трендом – полиномом 4 степени, который рассчитывает сам Excel. Сделать выводы.

Ответ: 0,5886 (с точностью до 4 знака после запятой включительно).

Семестр 6:

1. "Введение в методы конечных разностей. Метод Эйлера"

Введение в методы конечных разностей. Метод Эйлера. Порядок аппроксимации, устойчивость, сходимость.

2. "Методы Рунге-Кутты"

Методы Рунге-Кутты. Метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Применение метода Рунге-Кутты 4-го порядка для решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

3. "Явная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа"

Явная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа. Явные и неявные схемы. Аппроксимация производных. Порядок аппроксимации явной схемы. Устойчивость явной схемы.

4. "Неявная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа"

Неявная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа. Аппроксимация производных. Метод прогонки. Порядок аппроксимации неявной схемы. Устойчивость неявной схемы. Абсолютная устойчивость.

5. "Методы решения физических уравнений гиперболического типа. Волновое уравнение"

Методы решения физических уравнений гиперболического типа. Волновое уравнение. Явные и неявные схемы для уравнений гиперболического типа.

6. "Методы решения физических уравнений эллиптического типа"

Методы решения физических уравнений эллиптического типа. Уравнение Лапласа.

Примеры оценочных средств для текущего контроля:

Задания для лабораторной работы:

1. Найти распределение давления в нестационарном случае в пласте с помощью уравнения пьезопроводности. Решить уравнение с помощью явной конечно-разностной схемы.

Параметры пласта подобрать самостоятельно. Проанализировать влияние параметров пласта.

2. Найти распределение давления в стационарном случае в пласте с помощью уравнения пьезопроводности. Параметры пласта подобрать самостоятельно. Проанализировать влияние параметров пласта.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ Темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
	5 семестр	
1	Введение в вычислительную физику	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
2	Погрешности округления	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
3	Интерполяция функций	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
4	Методы решения нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
5	Методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Законы Кирхгофа	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
6	Метод автомодельной переменной. Уравнение пьезопроводности	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
7	Численное нахождение значений интегралов	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
8	Линеаризация дифференциальных уравнений. Гармонический осциллятор	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
	Зачёт	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
	6 семестр	
1	Введение в методы конечных разностей. Метод Эйлера	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
2	Методы Рунге-Кутты	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
3	Явная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций

4	Неявная конечно-разностная схема для решения физических уравнений параболического типа	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
5	Методы решения физических уравнений гиперболического типа. Волновое уравнение	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
6	Методы решения физических уравнений эллиптического типа	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций
7	Экзамен	Чтение обязательной и дополнительной литературы, проработка лекций

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

Форма промежуточной аттестации в пятом семестре – зачёт. Если студент согласен с оценкой, полученной в ходе текущего контроля, то она ставится автоматически, иначе студент сдаёт зачёт. Зачёт проводится в форме собеседования по вопросам билета. В билете предлагается два теоретических вопроса и один практический (задача). Необходимым условием положительной оценки является выполнение всех лабораторных работ. На оценку «зачтено» нужно ответить не менее чем на 1 теоретический вопрос и решить задачу, в ином случае ставится «не зачтено».

Форма промежуточной аттестации в шестом семестре – экзамен. Если студент согласен с оценкой, полученной в ходе текущего контроля, то она ставится автоматически, иначе студент сдаёт экзамен. Экзамен проводится в форме собеседования по вопросам билета. В билете предлагается два теоретических вопроса и один практический (задача).

Необходимым условием положительной оценки является выполнение всех лабораторных работ.

На оценку «отлично» нужно подробно ответить на все теоретические вопросы и решить задачу, на оценку «хорошо» допускается неточность в ответе на один из теоретических вопросов при подробном ответе на другой теоретический вопрос и при решённой задаче, на оценку «удовлетворительно» необходимо ответить на 1 теоретический вопрос и решить задачу.

6.1 Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Примерные вопросы к зачёту

1. Классификация численных методов.
2. Необходимость применения численных методов.
3. Погрешности округления.
4. Погрешность численного метода.
5. Методы оценки погрешностей округления.
6. Накопление погрешностей округления.
7. Основные понятия численных методов. Сетка. Сеточная функция.
8. Консервативные схемы.
9. Интерполяция функций.
10. Интерполяционный полином.
11. Интерполяционная формула Лагранжа.
12. Интерполяционные формулы Ньютона.
13. Метод наименьших квадратов.
14. Метод простой итерации.
15. Сжимающие отображения.
16. Итерационный метод Ньютона.
17. Методы решения систем линейных алгебраических уравнений.

18. Законы Кирхгофа.
19. Метод Гаусса.
20. Правило Крамера.
21. Совместность систем линейных алгебраических уравнений.
22. Метод простой итерации для решения систем линейных алгебраических уравнений.
23. Метод Зейделя.
24. Уравнения в частных производных.
25. Уравнение пьезопроводности и его решение.
26. Метод автомодельной переменной. Специальные функции.
27. Метод трапеций.
28. Метод Симпсона.
29. Линеаризация с помощью разложения в ряд Тейлора.
30. Гармонический осциллятор.

Задачи для зачёта:

1. Оценить относительную погрешность округления на ЭВМ при вычислении следующей суммы: $z_n = \sum_{i=1}^n y_i$, если все y_i положительны, больше машинного нуля, но меньше машинной бесконечности.

Ответ: $\frac{|\tilde{z}_n - z_n|}{|z_n|} \leq \varepsilon n(n+1), \varepsilon = 2^{-t}$

2. Перевести число из десятичной системы счисления в шестнадцатеричную: 25,21. В переведённом числе записывать не более 5 знаков после запятой.

Ответ: $19,35C28_{16}$.

3. Пусть $y(x)$ – некоторая функция, бесконечно малое приращение аргумента $\Delta x = h \ll 1$, производная указанной функции вычисляется по формуле

$$y'(x) = \frac{-3y(x) + 4y(x+h) - y(x+2h)}{2h}.$$

Вывести эту формулу. Оценить погрешность δ вычисления производной, если значения $y(x)$ на компьютере вычисляются с абсолютной погрешностью ε , а для модуля производной k -го порядка (для любых целых k , начинающихся от 0) справедлива оценка $|y^{(k)}| \leq M_k$, где M_k – некоторое малое число.

Ответ:

$$\delta \leq \frac{4\varepsilon}{h} + \frac{h^2}{3} M_3.$$

4. Найти интерполяционный полином по формуле Лагранжа для функции, значения которой заданы таблицей:

x_i	0	2	3
y_i	1	0	1

Ответ: $P_2(x) = 0,5x^2 - 2x + 2$.

Примерные вопросы к экзамену

1. Метод Эйлера.
2. Порядок аппроксимации производных.
3. Устойчивость численного решения.
4. Сходимость численного решения.
5. Порядок аппроксимации производных в методе Эйлера.
6. Методы Рунге-Кутты.
7. Метод Рунге-Кутты 4 порядка.

8. Виды устойчивости.
9. Порядок аппроксимации производных в методе Рунге-Кутты 4 порядка. Вывод.
10. Тип уравнения пьезопроводности в качестве линейного уравнения в частных производных второго порядка.
11. Явная конечно-разностная схема для решения уравнения пьезопроводности. Вывод расчётной формулы. Начальные и граничные условия.
12. Явная схема для решения уравнения пьезопроводности. Порядок аппроксимации производных по времени и координате.
13. Алгоритм расчёта по явной схеме.
14. Устойчивость численного решения. Метод Неймана на примере явной схемы.
15. Неявная конечно-разностная схема для решения уравнения пьезопроводности. Аппроксимация производных. Порядок аппроксимации производных по времени и координате.
16. Неявная конечно-разностная схема для решения уравнения пьезопроводности. Метод прогонки. Вывод прогоночных коэффициентов.
17. Неявная конечно-разностная схема для решения уравнения диффузии. Начальные условия. Левое и правое граничные условия.
18. Алгоритм расчёта по неявной схеме.
19. Устойчивость численного решения. Метод Неймана на примере неявной схемы.
20. Методы решения физических уравнений гиперболического типа. Волновое уравнение. Явные и неявные схемы для уравнений гиперболического типа.
21. Методы решения физических уравнений эллиптического типа.
22. Уравнение Лапласа.

Задачи к экзамену:

1. Найти порядок аппроксимации производной по времени в следующей схеме:

$$\frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{(\Delta T)^2} = \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta X)^2}$$

Ответ: Второй.

2. Найти порядок аппроксимации производной по координате в следующей схеме:

$$\frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{(\Delta T)^2} = \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta X)^2}$$

Ответ: Второй.

3. Найти порядок аппроксимации производной по координате в следующей схеме:

$$\frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{(\Delta T)^2} = \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta X}$$

Ответ: Первый.

4. Найти порядок аппроксимации производной по времени в следующей схеме:

$$\frac{u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1}}{(\Delta T)^2} = \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta X}$$

Ответ: Второй.

5. Найти порядок аппроксимации производной по времени в следующей схеме:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta T} = \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta X}$$

Ответ: Первый.

6. Найти порядок аппроксимации производной по координате в следующей схеме:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta T} = \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta X}$$

Ответ: Первый.

6.2 Критерии оценивания компетенций:

Таблица 4

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности (ОПК-3)	<p>Пороговый (удовл.)</p> <p><i>Знает</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – основы информационной и библиографической культуры; – численные методы решения алгебраических уравнений – основные требования информационной безопасности <p><i>Умеет</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – использовать информационно-коммуникационные технологии при решении стандартных задач численных методов <p>Базовый (хор.)</p> <p><i>Знает</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – основы информационной и библиографической культуры; – численные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений – основные требования информационной безопасности <p><i>Умеет</i></p>	Лабораторные работы, посещение лекций, зачёт и экзамен	Полнота и правильность выполнения заданий лабораторных работ, присутствие на лекциях, полнота и правильность ответов на вопросы зачёта и экзамена

		<p>– использовать информационно-коммуникационные технологии при решении стандартных задач численных методов</p> <p>– безопасно работать с данными в локальных и глобальных сетях</p>		
		<p>Повышенный (отл.)</p> <p>Знает</p> <p>– основы информационной и библиографической культуры;</p> <p>– современные информационно-коммуникационные технологии для применения численных методов;</p> <p>– численные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений</p> <p>– основные требования информационной безопасности</p> <p>Умеет</p> <p>– использовать информационно-коммуникационные технологии при решении стандартных задач численных методов</p> <p>– выбирать необходимый численный метод для решения физической задачи</p> <p>– безопасно работать с данными в локальных и глобальных сетях</p>		

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1 Основная литература:

1. Зализняк, В. Е. Основы вычислительной физики. Ч.1. Введение в конечно-разностные методы / В. Е. Зализняк. — Москва, Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. — 252 с. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/92058.html> (дата обращения: 24.04.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

2. Купцов, П. В. Элементарная вычислительная физика. Компьютерная обработка данных на практических и лабораторных занятиях : учебное пособие / П. В. Купцов, А. В. Купцова. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2015. — 36 с. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/76536.html> (дата обращения: 24.04.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: <https://doi.org/10.23682/76536>

7.2 Дополнительная литература:

1. Бытев В.О. Исследование функций (приемы, методы и задачи): Уч. пособие / В. О. Бытев, И. В. Слезко. – Тюмень: Изд-во Тюмгу, 2008. – 148 с.

2. Краснов М.Л. Интегральные уравнения. Введение в теорию / М.Л. Краснов. – М.: УРСС, 2006. – 304 с.

7.3 Интернет-ресурсы:

1. Электронная библиотека Попечительского совета механико-математического факультета Московского государственного университета <http://lib.mexmat.ru>

2. eLIBRARY – Научная электронная библиотека (Москва) <http://elibrary.ru/>

7.4 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:
Не используются в данной дисциплине.

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

- **Лицензионное ПО:** Необходимо наличие программного обеспечения Microsoft Office и MS Visual Studio, в случае дистанционной формы обучения – Microsoft Teams.
- **ПО, находящееся в свободном доступе:** Необходимо наличие программного обеспечения Lazarus, Pascal ABC.NET

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Лекционная аудитория, компьютерный класс для лабораторных занятий.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


С.А. Креков
« 23 » 06. 2021 г.

РАДИОФИЗИКА И ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлениям подготовки 03.03.02 «Физика»
профиль подготовки «Фундаментальная физика»
форма обучения очная

Гармонов А.А. Радиофизика и основы микроэлектроники. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлениям подготовки 03.03.02 «Физика», профиль подготовки «Фундаментальная физика», форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

Рабочая программа дисциплины включает следующие разделы:

1. Пояснительная записка

Содержание курса «Радиофизика и основы микроэлектроники» базируется на знаниях, приобретенных при изучении следующих дисциплин: «Молекулярная физика» и «Электричество и магнетизм», курса «Электродинамика». Математической основой курса являются разделы «Математический анализ», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Линейные и нелинейные уравнения физики».

Главной **целью** дисциплины «Радиофизика и основы микроэлектроники» является ознакомление студентов с теорией и физикой процессов в основных радиоэлектронных устройствах, с элементной базой современной радиоэлектроники, с основными методами анализа и принципами функционирования аналоговых и цифровых радиоэлектронных устройств.

Основные **задачи** дисциплины:

- 1) Формирование умения оценивать возможности применения радиоэлектронных устройств на основе понимания принципов их работы.
- 2) Получение навыков анализа и расчета простых радиоэлектронных устройств.
- 3) Формирование у студентов основных знаний, навыков и умений, позволяющих осуществлять общий анализ и грамотную эксплуатацию аналоговых и цифровых радиоэлектронных устройств и другого радиофизического оборудования.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

«Радиофизика и основы микроэлектроники» является дисциплиной Блока1. Дисциплины (модули), обязательная часть.

Содержание курса «Радиофизика и основы микроэлектроники» базируется на знаниях, приобретенных при изучении следующих дисциплин: разделов «Молекулярная физика» и «Электричество и магнетизм» курса общей физики, курса «Электродинамика». Математической основой курса являются разделы «Математический анализ», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Линейные и нелинейные уравнения физики».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины:

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Компонент (знаниевый/функциональный)
ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> – основы теоретических и экспериментальных исследований физических объектов, систем и процессов; – основные приемы обработки и представления экспериментальных данных.
ПК-1: способен осуществлять выполнение экспериментов и оформление результатов исследований и разработок	<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – выполнять научные исследования физических объектов, систем и процессов; – пользоваться основными приемами обработки и представления экспериментальных данных и оформлять результаты исследований и разработок.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 1

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			6
Общий объем	зач. ед.	4	4
	час	144	144
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		118	118
Лекции		34	34
Практические занятия			
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		16	16
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		26	26
Вид промежуточной аттестации (зачет, диф. зачет, экзамен)			Зачет

3. Система оценивания

В течение семестра каждому студенту необходимо обязательно выполнить и защитить 10 лабораторных работ из предложенного преподавателем списка.

При текущем контроле учитывается несколько видов деятельности обучающихся:

- допуски к выполнению лабораторных работ (0 – 1 балла);
- выполнение лабораторной работы (0-2 балла);
- подготовка отчета по лабораторной работе (0-2 баллов);
- защита лабораторной работы (0-4 баллов);

Особенность выполнения студентами лабораторных работ заключается в предварительной самостоятельной теоретической подготовке по теме исследования в работе. При подготовке от студентов потребуются умения и навыки работы с литературой и другими источниками информации. Кроме того, студенты должны изучить элементарные основы теории вероятности и математической статистики и применять их для обработки экспериментальных результатов.

Студенту рекомендуется следующая схема подготовки к лабораторному занятию:

- проработка конспекта лекций дисциплины «Радиофизика и основы микроэлектроники» по тематике лабораторной работы;
- чтение рекомендованной основной и дополнительной литературы по тематике лабораторной работы;
- заполнение лабораторного журнала и подготовка к допуску для выполнения работы.

По итогам набранных в семестре баллов обучающийся может/не может получить зачет. Обязательным условием сдачи зачета является выполнение и защита всех лабораторных работ.

Студент, не сдавший все лабораторные работы считается не освоившим дисциплину и не может получить зачет.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 2

		Объем дисциплины, час.	
		Всего	Виды аудиторной работы

№ п/п	Наименование тем и/или разделов		(академические часы)			Консультаци и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1	Радиофизика и микроэлектроника: предмет и основные понятия.	4	2	0	0	0
2	Элементы теории сигналов.	6	4	0	0	0
3	Физические принципы работы и основы технологии изготовления электронных приборов.	6	4	0	0	0
4	Базовые компоненты электронных устройств.	28	6	0	16	4
5	Линейные пассивные цепи.	4	2	0	0	0
6	Усилители электрических сигналов.	21	4	0	12	2
7	Генерирование колебаний.	16	2	0	8	2
8	Нелинейные преобразования сигналов.	26	2	0	18	3
9	Основы цифровой радиоэлектроники.	27	6	0	14	3
10	Основы функциональной электроники.	4	2	0	0	0
	Зачет	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	144	34	0	68	16

4.2. Содержание дисциплины по темам

Темы лекционных занятий:

Тема 1. Радиофизика и микроэлектроника: предмет и основные понятия. Краткий исторический обзор. Роль радиофизики и микроэлектроники в современной науке и технике, основные применения, тенденции развития.

Тема 2. Элементы теории сигналов. Классификация сигналов. Непрерывные и дискретные сигналы, узкополосные и широкополосные, детерминированные и случайные, псевдослучайные сигналы. Частотные спектры периодических и непериодических сигналов. Преобразование Фурье и Лапласа. Природа шумов в радиоэлектронных устройствах. Тепловой, дробовой и $1/f$ -шум, другие виды шумов. Помехи.

Тема 3. Физические принципы работы и основы технологии изготовления электронных приборов. Принципы работы и основы технологии изготовления полупроводниковых электронных и микроэлектронных приборов.

Тема 4. Базовые компоненты электронных устройств. Полупроводниковые приборы. Свойства р-п перехода. Диоды, их разновидности (стабилитроны, варикапы, туннельные диоды и др.). Биполярные транзисторы. Модель биполярных транзисторов. Описание свойств транзистора как четырехполюсника с помощью h - параметров. Полевые транзисторы, их разновидности. Интегральные микросхемы.

Тема 5. Линейные пассивные цепи. Определение. Элементы пассивных цепей. Линейные цепи с сосредоточенными параметрами. Условия квазистационарности. Комплексный метод анализа линейных цепей. Дифференцирующая и интегрирующая цепи, колебательный контур, фильтры. Спектральные и переходные характеристики.

Тема 6. Усилители электрических сигналов. Классификация усилителей, основные понятия. Усилительные каскады на биполярных и полевых транзисторах. Основные характеристики усилительного каскада: амплитудная, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики, входное и выходное сопротивления, паразитные параметры. Резонансные усилители, широкополосные усилители, усилители постоянного тока, усилители мощности. Обратная связь в усилителях. Дифференциальный каскад. Операционный усилитель (ОУ). Применения ОУ (сумматоры, активные фильтры, и другие).

Тема 7. Генерирование колебаний. LC- и RC-генераторы гармонических колебаний. Баланс амплитуд и фаз, мягкий и жесткий режим самовозбуждения. Стабильность частоты.

Тема 8. Нелинейные преобразования сигналов. Прохождение гармонического сигнала через нелинейную цепь. Умножение частоты. Модуляция и детектирование. Спектры сигналов с амплитудной, частотной и фазовой модуляцией. Амплитудный и частотный детектор. Синхронный детектор.

Тема 9. Основы цифровой радиоэлектроники. Понятие о дискретизации и квантовании сигналов, теорема Котельникова. Логические операции «И», «ИЛИ», «НЕ», их физическая реализация. Элементы цифровой памяти. Триггеры, регистры, счетчики. Сумматоры. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.

Тема 10. Основы функциональной электроники. Криоэлектроника. Акустоэлектроника. Магнитоэлектроника. Оптоэлектроника. Диэлектрическая электроника. Хемотроника.

Примерные темы лабораторных занятий:

Лабораторная работа №1. Исследование диодов.

Изучаются характеристики и параметры диодов – выпрямительного, Шоттки, стабилитрона и светодиода.

Для выпрямительного диода и стабилитрона строятся графики прямой и обратной ветви; фиксируются осциллограммы ВАХ; определяются максимальные напряжения между анодом и катодом в открытом состоянии, пороговые напряжения и дифференциальные сопротивления.

Для диода Шоттки и светодиода строятся графики прямой ветви. Определяется ток, при котором становится заметным свечение светодиода.

Лабораторная работа №2. Исследование биполярного транзистора.

Изучаются характеристики и параметры биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Снимается передаточная характеристика прямой передачи по току, статическая характеристика прямой передачи по току при сопротивлении в цепи коллектора равном нулю, характеристика прямой передачи по току при заданном сопротивлении в цепи коллектора, измеряют выходные статические ВАХ с помощью осциллографа.

Лабораторная работа №3. Исследование полевого транзистора и транзисторного усилительного каскада.

Лабораторная работа состоит из 4 упражнений: Экспериментальное исследование характеристик полевого транзистора, включенного по схеме с общим истоком, где измеряют статическую характеристику при отсутствии нагрузки, наличии нагрузки, где измеряют выходные статические ВАХ полевого транзистора при помощи осциллографа; Экспериментальное исследование усилительного каскада в классе А, где определяют максимальную амплитуду неискаженного выходного напряжения, определяют коэффициент усиления каскада по напряжению в классе А; Экспериментальное исследование усилительного каскада на полевом транзисторе в классе В и АВ, где определяют форму выходного сигнала усилителя класса В и определяют рабочую точку покоя усилителя класса АВ; Экспериментальное исследование усилительного каскада в ключевом режим (класс D), где определяют ток стока и напряжение стока на постоянном токе в двух точках: отсечки и насыщения.

Лабораторная работа №4. Исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителя на операционном усилителе.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Экспериментальное исследование инвертирующего усилителя, где измеряют амплитудную характеристику (АХ) инвертирующего усилителя на постоянном токе, где определяют коэффициент усиления по напряжению, измеряют АХ инвертирующего усилителя при помощи осциллографа и измеряют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ); Экспериментальное исследование неинвертирующего усилителя, где определяют коэффициент усиления по напряжению, измеряют АХ неинвертирующего усилителя при помощи осциллографа и измеряют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) неинвертирующего усилителя.

Лабораторная работа №5. Исследование интегратора и активного фильтра.

Лабораторная работа состоит из 3 упражнений: Расчет параметров входного сигнала, где рассчитывают амплитуду, частоты входного прямоугольного сигнала; Экспериментальное исследование интегратора на ОУ, где исследуют работу интегратора в режиме генератора пилообразного напряжения и измеряют амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) интегратора; Экспериментальное исследование активного фильтра, где измеряют АЧХ активного фильтра низких частот на основе интегрирующего усилителя, определяют ширину пропускания фильтра и коэффициент передачи, сравнивая их с теоретическими значениями, вычисленными по формулам.

Лабораторная работа №6. Исследование компараторов.

Лабораторная работа состоит из 3 упражнений: Расчет параметров регенеративного компаратора, где рассчитывают его ширину петли гистерезиса; Исследование обычного компаратора, где определяют передаточную характеристику компаратора без обратной связи; Исследование регенеративного компаратора с положительной обратной связью, где определяют его передаточную характеристику и получают осциллограммы при сравнении опорного и переменного напряжений.

Лабораторная работа №7. Исследование мультивибратора.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Расчет параметров симметричного мультивибратора, где выполняется расчёт периода сигнала для различных значений сопротивлений; Исследование симметричного мультивибратора, где измеряют период выходного сигнала и исследуют влияние величины сопротивлений на частоту (период) выходного сигнала мультивибратора.

Лабораторная работа №8. Исследование логических элементов цифровых интегральных микросхем.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Экспериментальное исследование базовых логических элементов цифровых интегральных микросхем, где составляется таблица истинности логического элемента 2И-НЕ и исследуется его работа с помощью осциллографа; Исследование асинхронного RS-триггера, где исследуется поведение триггера при различных комбинациях логических сигналов на входах управления.

Лабораторная работа №9. Исследование JK-триггера и счетчика.

Лабораторная работа состоит из 2 упражнений: Исследование JK-триггера; Исследование асинхронного четырехразрядного двоичного счетчика.

Лабораторная работа №10. Исследование параметрического стабилизатора напряжения.

Лабораторная работа состоит из 4 упражнений: Расчет параметрического стабилизатора; Исследование параметрического стабилизатора без нагрузки при изменении напряжения питания; Исследование параметрического стабилизатора при изменении нагрузки; Исследование параметрического стабилизатора при изменении питающего напряжения при наличии нагрузки.

Все лабораторные работы по дисциплине проводятся в «Лаборатории радиоэлектроники и электротехники» ФТИ.

На вводном лабораторном занятии проводится инструктаж по технике безопасности.

Преподавателем объясняется формат проведения лабораторных занятий, требования к допуску к выполнению лабораторной работы, содержание отчета по лабораторной работе, формат защиты лабораторной работы.

К каждой лабораторной работе имеются подробные методические рекомендации с необходимыми теоретическими сведениями, описанием установки, описанием последовательности выполнения заданий и обработки полученных результатов, а также список литературы.

В течение семестра каждому студенту необходимо обязательно выполнить и защитить 10 лабораторных работ. Лабораторные работы выполняются в малых группах (2 студента). Очередность выполнения лабораторных работ определяется преподавателем.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовкам занятиям
1	Радиофизика и микроэлектроника: предмет и основные понятия.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
2	Элементы теории сигналов.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
3	Физические принципы работы и основы технологии изготовления электронных приборов.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
4	Базовые компоненты электронных устройств.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
5	Линейные пассивные цепи.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
6	Усилители электрических сигналов.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
7	Генерирование колебаний.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.

8	Нелинейные преобразования сигналов.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
9	Основы цифровой радиоэлектроники.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.
10	Основы функциональной электроники.	1. Проработка лекций. 2. Работа с учебной литературой.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

Обязательным условием сдачи зачета является выполнение и защита всех 10 лабораторных работ.

Студент, не сдавший все лабораторные работы считается не освоившим дисциплину и не может получить зачет.

6.1 Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Примерные контрольные вопросы к лабораторным работам

Лабораторная работа 1. Исследование диодов.

- Что называется полупроводниковым диодом? Каково устройство и принцип работы диода?
- Как образуется запирающий слой в электронно-дырочном переходе и как он изменяется, если приложить к переходу прямое или обратное напряжение?
- Каково аналитическое выражение ВАХ диода? Объясните величины входящие в формулу.
- Почему обратный ток диода практически не зависит от величины обратного напряжения? Что называется током утечки? Что называется током термогенерации?
- Назовите основные виды пробоя $p-n$ перехода. Что такое лавинный пробой? Что такое тепловой пробой? Как влияет температура на ВАХ?
- Каково устройство и принцип работы диода Шоттки и светодиода?

Лабораторная работа 2. Исследование биполярного транзистора.

- Что называется биполярным транзистором? Приведите схемотехнические обозначения биполярных транзисторов двух типов и название электродов. Нарисуйте схему включения с ОЭ.
- Принцип действия транзистора. За счет каких носителей тока в транзисторе образуются токи эмиттера, коллектора и базы $I_э, I_к, I_б$.
- Почему транзистор не будет работать при большом расстоянии между эмиттерным и коллекторным переходами?
- Приведите аналитические выражения, токов базы, и коллектора. Поясните смысл коэффициентов α и β . Приведите связь между ними.
- Приведите входные характеристики для схемы включения транзистора с ОЭ и объясните их.
- Приведите выходные характеристики для схемы включения транзистора с ОЭ. Объясните их.
- Представьте транзистор в виде четырехполюсника. Что такое h -параметры транзистора.

Лабораторная работа 3. Исследование полевого транзистора и транзисторного усилительного каскада.

- Перечислить основные типы полевых транзисторов, указать их условные обозначения.
- Каков принцип действия полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом?

- Что такое статическая сток-затворная характеристика полевого транзистора? Как её построить? Как она видоизменяется при наличии нагрузки?
- Можно ли в лабораторной работе снять сток-затворную характеристику полевого транзистора при помощи осциллографа?
- Что такое крутизна полевого транзистора? Как её определить по сток-затворной характеристике?
- Как выглядят выходные статические ВАХ в схеме с общим истоком?
- Как построить линию нагрузки?
- Как выбрать рабочую точку покоя в классах А, АВ, В, D?
- Каково значение элементов схемы усилительного каскада с общим истоком?
- Как определить коэффициент усиления по напряжению?
- Что такое область активного усиления, насыщения, отсечки?
- Что такое ключевой режим и каковы его преимущества?

Лабораторная работа 4. Исследование инвертирующего и неинвертирующего усилителя на операционном усилителе.

- Что называется операционным усилителем?
- Каковы основные параметры операционного усилителя?
- Почему операционный усилитель, включенный без обратной связи, работает как релейный элемент?
- Какие допущения принимаются для операционного усилителя при выводе коэффициента усиления с различными обратными связями?
- Для чего применяется отрицательная обратная связь в усилителях?
- Какой знак будет иметь выходное напряжение инвертирующего усилителя, если на вход подано отрицательное напряжение?
- Что такое амплитудная и амплитудно-частотная характеристики усилителя?
- Как определить полосу пропускания усилителя?

Лабораторная работа 5. Исследование интегратора и активного фильтра.

- Как получить на выходе интегратора пилообразное напряжение?
- Как определяется постоянная времени интегрирования?
- В чём заключаются ограничения исследованного интегратора на ОУ в сравнении с идеализированной моделью?
- Какое соотношение должно быть между длительностью импульса, поступающего на вход интегрирующего усилителя, и постоянной времени интегрирования для того, чтобы на выходе избежать ошибки интегрирования?
- Что такое активный фильтр?
- Как определить по амплитудно-частотной характеристике полосу пропускания фильтра?
- От каких элементов схемы и как зависит полоса пропускания активного фильтра?

Лабораторная работа №6. Исследование компараторов.

- Что называется компаратором?
- Обоснуйте возможность использования операционного усилителя в качестве компаратора.
- Как получить периодические прямоугольные импульсы на выходе компаратора?
- Что даёт применение в компараторах положительной обратной связи?
- Как зависит вид передаточной характеристики регенеративного компаратора от величины сопротивления положительной обратной связи?
- С какой целью применяются регенеративные компараторы?

- Как получить амплитудную (передаточную) характеристику компаратора при помощи осциллографа?

Лабораторная работа 7. Исследование мультивибратора.

- Что такое мультивибратор?
- Объяснить принцип работы симметричного мультивибратора на ОУ.
- Как можно изменить частоту на выходе мультивибратора?
- Как можно изменить соотношение времени положительного и отрицательного импульсов на выходе мультивибратора?
- Сравнить значения периода, полученные экспериментально, с расчетными значениями. Если имеются отличия, объяснить их.

Лабораторная работа 8. Исследование логических элементов цифровых интегральных микросхем.

- Какой режим работы транзисторов используется в цифровых устройствах?
- Перечислите, с указанием условных обозначений, базовые логические элементы и реализуемые ими логические функции.
- В чём отличие комбинационных и последовательностных цифровых логических устройств?
- Приведите структурные схемы логического элемента 2И-НЕ на основе ТТЛ и КМОП-логики.
- Перечислите наиболее важные параметры логических элементов.
- Приведите условные обозначения для трехходовых логических элементов 3И и 3ИЛИ-НЕ и составьте для них таблицы истинности.
- Почему логический элемент Иключающее ИЛИ называют сумматором по модулю «2»?
- Дайте определение триггера. Перечислите основные типы триггеров.
- При каких комбинациях входных сигналов изменяется состояние RS -триггера?
- Что означает термин «запрещенная комбинация» для RS -триггера?
- Нарисуйте схему RS -триггера на логических элементах 2ИЛИ-НЕ. Чем отличается такой триггер от исследованного в данной работе?

Лабораторная работа 9. Исследование JK-триггера и счетчика.

- Чем отличаются последовательностные схемы от комбинационных?
- В каком состоянии устанавливаются выходы Q и JK -триггера после окончания синхронизирующего импульса для различных сочетаний сигналов J и K ?
- Чем отличаются таблицы истинности RS - и JK -триггеров?
- Нарисуйте схему T -триггера, реализованную на базе JK -триггера.
- Нарисуйте схему D -триггера, реализованную на базе JK -триггера.
- На основе каких элементов строятся счетчики?
- Нарисовать схему двоичного суммирующего четырехразрядного счетчика на базе JK -триггеров.
- Чем отличаются асинхронные счетчики от синхронных? Перечислить основные преимущества синхронных счетчиков по сравнению с асинхронными.
- Что нужно изменить в схеме суммирующего счетчика, чтобы получить вычитающий асинхронный счетчик?
- Сколько разрядов должен иметь двоичный счетчик, чтобы обеспечить возможность счета 64 импульсов?

Лабораторная работа №10. Исследование параметрического стабилизатора напряжения.

- Где находится рабочий участок на ВАХ стабилитрона?

- Как работает параметрический стабилизатор напряжения?
- Для чего служит балластный резистор?
- При каком минимальном напряжении на входе стабилизатора ещё возможна стабилизация напряжения?
- Как изменится напряжение на выходе стабилизатора при повышении температуры?

6.2 Критерии оценивания компетенций:

Карта критериев оценивания компетенций

Таблица 4

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ОПК-2: способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.):</p> <p>Знает: отдельные методы исследований физических объектов, систем и процессов; отдельные приемы обработки и представления экспериментальных данных.</p> <p>Умеет: проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов с помощью преподавателя, обрабатывая результаты исследований и разработок.</p> <p>Базовый (хор.):</p> <p>Знает: основные методы научных исследований физических объектов, систем и процессов; основные приемы обработки и представления экспериментальных данных.</p> <p>Умеет: применять основные методы научных исследований из</p>	Отчеты по лабораторным работам. Контрольные вопросы к лабораторным работам.	Правильность и полнота ответов по основным техническим параметрам и физическим принципам работы измерительных приборов; умение правильно оценивать погрешности измерений, использовать статистические методы обработки данных и средства их представления.

2.	ПК-1: способен осуществлять выполнение экспериментов и оформление результатов исследований и разработок	области радиофизики и микроэлектроники с помощью преподавателя; самостоятельно пользоваться основными приемами обработки и представления результатов исследований и разработок. Повышенный (отл.): <i>Знает:</i> основные методы физических исследований; основные приемы обработки и представления данных. <i>Умеет:</i> самостоятельно использовать и применять основные методы физических исследований; самостоятельно использовать различные методы статистической обработки и представления экспериментальных данных из области радиофизики и микроэлектроники.		
----	---	--	--	--

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1 Основная литература:

1. Водовозов, А.М. Основы электроники : учеб. пособие / А.М. Водовозов. - 2-е изд. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. - 140 с. - ISBN 978-5-9729-0346-7. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1053394> (дата обращения: 23.06.2021).

2. Немировский, А.Е. Электроника : учеб. пособие / А.Е. Немировский [и др.] - Москва : Инфра-Инженерия, 2019. - 200 с. - ISBN 978-5-9729-0264-4. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1053409> (дата обращения: 23.06.2021)

7.2 Дополнительная литература:

1. Рябов, Б. А. Практикум по радиоэлектронике / Б. А. Рябов, С. М. Малахов, Ю. Л. Хотунцев. — Москва : Прометей, 2011. — 108 с. — ISBN 978-5-4263-0060-6. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/9294.html> (дата обращения: 23.06.2021)

2. Здыренкова, Т. В. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] / Здыренкова Т. В., Михеев В. А., Стариков В. А. : учебное пособие. Тюмень : ТюмГУ, 2013. 412 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/110075>.

3. Шошин, Е. Л. Электроника. Полупроводниковые приборы : учебное пособие / Е. Л. Шошин. Электроника. Полупроводниковые приборы, Весь срок охраны авторского права. Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. 238 с. ISBN 978-5-4497-0508-2.

7.3 Интернет-ресурсы:

1. eLIBRARY – Научная электронная библиотека (Москва) <http://elibrary.ru/>

2. онлайн-симулятор электронных схем: <https://www.easyeda.com>

7.4 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Не предусмотрено использование в данной дисциплине.

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:

платформа для электронного обучения Microsoft Teams, офисный пакет Microsoft Office.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекционных занятий требуется аудитория, рассчитанная на 60-80 человек, оборудованная мультимедийными средствами, а так же меловой или интерактивной доской.

Для лабораторных занятий - лаборатория со специализированным лабораторным оборудованием, аналоговые и цифровые приборы для электроизмерений.

Список оборудования для проведения лабораторных работ:

Лабораторная работа 1: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф С1-83; мультиметр MS-8201 Н.

Лабораторная работа 2: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф GOS-620FG; цифровой настольный прибор (мультиметр) для измерения силы постоянного тока, постоянного и переменного напряжения, частоты, сопротивления, емкости конденсаторов Mastech M-9803R ORIG.

Лабораторная работа 3: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф С1-83; мультиметр MS-8201 Н.

Лабораторная работа 4: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф С1-83; мультиметр MS-8201 Н.

Лабораторная работа 5: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф GOS-620FG; цифровой настольный прибор (мультиметр) для измерения силы постоянного тока, постоянного и переменного напряжения, частоты, сопротивления, емкости конденсаторов Mastech M-9803R ORIG.

Лабораторная работа 6: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф GOS-620FG; цифровой настольный прибор (мультиметр) для измерения силы постоянного тока, постоянного и переменного напряжения, частоты, сопротивления, емкости конденсаторов Mastech M-9803R ORIG.

Лабораторная работа 7: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф С1-83; мультиметр MS-8201 Н.

Лабораторная работа 8: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф GOS-620FG; цифровой настольный прибор (мультиметр) для измерения силы постоянного тока, постоянного и переменного напряжения, частоты, сопротивления, емкости конденсаторов Mastech M-9803R ORIG.

Лабораторная работа 9: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформером ОЭ-МР; осциллограф С1-83; мультиметр MS-8201 Н.

Лабораторная работа 10: лабораторный стенд «Основы электроники», исполнение моноблочное ручное со столом-трансформераом ОЭ-МР; осциллограф С1-83; мультиметр MS-8201 Н.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора ФТИ

23.06.2021 С.А. Креков

НАУЧНО-ПРОЕКТНЫЙ СЕМИНАР
Рабочая программа
для обучающихся по направлению подготовки
03.03.02 Физика
Направленность (профиль): Фундаментальная физика
форма обучения очная

Ганопольский Р.М. Научно-проектный семинар. Рабочая программа для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика: Фундаментальная физика, академический бакалавриат, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины (модуля) опубликована на сайте ТюмГУ: Научно-проектный семинар [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Ганопольский Р.М., 2021.

Рабочая программа дисциплины включает следующие разделы:

1. Пояснительная записка

Цель дисциплины: научить студентов основным элементам научных докладов и презентаций, рецензирования результатов научных исследований. Привить у студентов практический опыт докладов на научные темы, организовать дискуссию по результатам докладов и рецензирования доклада и работы.

Задачи учебного курса:

- познакомить студента с основными элементами и педагогическими приемами представления результатов научных исследований;
- дать содержание и цели научного рецензирования, составные элементы презентаций и их оформления.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в обязательную часть блока Б1 Дисциплины, изучается в 7 и 8 семестрах. Для ее успешного изучения необходимы знания и умения, приобретенные в результате освоения предшествующих дисциплин: «Математический анализ», «Дополнительные главы математики для физиков», «Механика», «Молекулярная физика», «Вычислительная физика», «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Линейные и нелинейные уравнения физики».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения: (знаниевые/функциональные)
Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные (ОПК-3)	-	Знает – основы обработки и представления экспериментальных данных для научных исследований
		Умеет – проводить эксперименты для физических исследований и представлять полученные данные
Способен организовывать выполнение научно-исследовательских работ по закрепленной тематике (ПК-2)	-	Знает – план выполнения научно-исследовательских работ – проблематику отрасли, на которой специализируется образовательная программа.
		Умеет – проводить научно-исследовательские работы по актуальным проблемам физики
Способен формировать новые направления научных исследований и опытно-	-	Знает – технику и методики проведения исследований в избранной области

конструкторских разработок (ПК-3)		экспериментальных и теоретических физических исследований; – современную приборную базу (в том числе сложного физического оборудования); – отечественный и зарубежный опыт проведения исследований в избранной области экспериментальной и теоретической физики.
		Умеет – под руководством/самостоятельно проводить научно-исследовательские работы; – работать с современной приборной базой (в том числе сложного физического оборудования); – анализировать экспериментальные и теоретические задачи с помощью специализированных пакетов прикладных программ.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 1

Вид учебной работы		Всего часов	Часов в семестре (академические часы)	
			7	8
Общая трудоемкость	зач. ед.	9	4	5
	час	324	144	180
Из них:				
Часы аудиторной работы (всего):		154	82	72
Лекции		30	18	12
Практические занятия		0	0	0
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		64	34	30
Консультации и иная контактная работа		60	30	30
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		170	62	108
Вид промежуточной аттестации (зачет, диф. зачет, экзамен)			Зачет	Зачет

3. Система оценивания

Оценочными средствами являются доклад и зачет.

Форма промежуточной аттестации – зачет в семестрах 7,8.

В случае, если сумма баллов составляет не менее 61 и студент выполнил все задания текущего контроля, то ему выставляется оценка "зачтено".

Не получивший зачёт автоматом идёт на промежуточную аттестацию, на которой может получить дополнительные 20 баллов.

Доклад - 10 баллов.

Ответы на вопросы по теории - 10 баллов.

За посещение каждого занятия в семестрах 7,8 студенту ставится 1 балл за каждое занятие, за непосещение – 0 баллов за каждое не посещённое занятие.

7 семестр.

За доклад, в котором отражены все аспекты темы и дан исчерпывающий ответ на дополнительные вопросы, ставится 52 балла, за доклад, в котором тема отражена на базовом уровне, дан ответ минимум на 50% дополнительных вопросов – 42 балла, за сделанный доклад на пороговом уровне – 32 балла.

8 семестр.

За доклад, в котором отражены все аспекты темы и дан исчерпывающий ответ на дополнительные вопросы, ставится 58 баллов, за доклад, в котором тема отражена на базовом уровне, дан ответ минимум на 50% дополнительных вопросов – 48 баллов, за сделанный доклад на пороговом уровне – 38 баллов.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультаци и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
	Семестр 7					
1	Первая информационная лекция	4	2	0	0	0
2	Первое лабораторное занятие	6	0	0	2	2
3	Первое лабораторное занятие	6	0	0	2	2
4	Информационная лекция	6	2	0	0	0
5	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
6	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2

7	Информационная лекция	6	2	0	0	0
8	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
9	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
10	Информационная лекция	6	2	0	0	0
11	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
12	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
13	Информационная лекция	6	2	0	0	0
14	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
15	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
16	Информационная лекция	4	2	0	0	0
17	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
18	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
19	Информационная лекция	6	2	0	0	0
20	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
21	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	2
22	Информационная лекция	4	2	0	0	0
23	Презентация проделанной работы	6	0	0	2	0
24	Презентация проделанной работы	6	0	0	4	0
25	Информационная лекция	6	2	0	0	0
	Зачёт	2	0	0	0	2
	Итого (часов, семестр 7)	144	18	0	34	30
	Семестр 8					

1	Первая информационная лекция	8	2	0	0	2
2	Первое лабораторное занятие	10	0	0	2	0
3	Первое лабораторное занятие	10	0	0	2	0
4	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
5	Информационная лекция	8	2	0	0	0
6	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
7	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
8	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
9	Информационная лекция	8	2	0	0	0
10	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
11	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
12	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
13	Информационная лекция	8	2	0	0	0
14	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
15	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
16	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
17	Информационная лекция	8	4	0	0	2
18	Презентация проделанной работы	10	0	0	2	2
19	Презентация проделанной работы	10	0	0	4	2
	Зачёт	2	0	0	0	2
	Итого (часов, семестр 8)	180	12	0	30	30
	Итого (часов)	324	30	0	64	60

4.2. Содержание дисциплины по темам

Семестр 7:

1. **"Первая информационная лекция"**

Первая информационная лекция

2. **"Первое лабораторное занятие"**

Первое лабораторное занятие

3. **"Первое лабораторное занятие"**

Первое лабораторное занятие

4. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

5. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

6. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

7. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

8. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

9. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

10. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

11. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

12. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

13. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

14. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

15. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

16. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

17. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

18. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

19. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

20. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

21. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

22. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

23. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

24. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

25. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

Семестр 8:**1. "Первая информационная лекция"**

Первая информационная лекция

2. "Первое лабораторное занятие"

Первое лабораторное занятие

3. "Первое лабораторное занятие"

Первое лабораторное занятие

4. "Презентация проделанной работы"

Презентация проделанной работы

5. "Информационная лекция"

Информационная лекция

6. "Презентация проделанной работы"

Презентация проделанной работы

7. "Презентация проделанной работы"

Презентация проделанной работы

8. "Презентация проделанной работы"

Презентация проделанной работы

9. "Информационная лекция"

Информационная лекция

10. "Презентация проделанной работы"

Презентация проделанной работы

11. "Презентация проделанной работы"

Презентация проделанной работы

12. "Презентация проделанной работы"

Презентация проделанной работы

13. "Информационная лекция"

Информационная лекция

14. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

15. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

16. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

17. **"Информационная лекция"**

Информационная лекция

18. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

19. **"Презентация проделанной работы"**

Презентация проделанной работы

Образец презентации для доклада:

Физические основы современных методов теплового воздействия на нефтяные пласты

А. Я. Гилманов, научный руководитель профессор А. П. Шевелев, Тюменский государственный университет

1

Содержание доклада

- Уравнение притока тепла в пористой среде
- Доля высоковязкой нефти
- Тепловой баланс
- Модель парогравитационного дренажа
- Модель парациклического воздействия на пласт

2

Доля высоковязких нефтей в мире

Структура запасов в мире	
Вид запасов	Величина, млрд т
Высоковязкая нефть	810
Нефть средней вязкости	162

3

Для разных нефтей Вязкость тяжёлой нефти

4

Современные технологии

5

Оценка эффективности

- Кин=каОХВ*Квыт*
- КИТ=Φ(тепл потери в скелет+теплотери в округ породы)
- Тразработки

6

Основные допущения при выводе Уравнение притока тепла в пористой среде

$$\rho_i \frac{d u_i}{d t} = \rho_i A_i + \rho_i Q_i + \sum_{j=1}^n J_{ij} (u_{ij} - u_i)$$

где ρ_i – плотность i-ой фазы,
 u_i – внутренняя энергия i-ой фазы,
 A_i – обмен внутренней энергией между j-ой и i-ой фазами,
 J_{ij} – интенсивность массообмена между j-ой и i-ой фазами,
 A_i – работа внутренних сил в единицу времени, отнесенная к единице массы i-ой фазы
 Q_i – приток тепла в единицу времени, отнесенный к единице массы i-ой фазы

7

Уравнение Работа внутренних сил и приток тепла

$$\rho_i A_i = F_i^T \dot{e}^T - v_i^T \dot{e}^T + \sum_{j=1}^n (W_{ij} - R_{ij} v_i^T + \frac{1}{2} J_{ij} (v_j^T - v_i^T)^2)$$

$$\rho_i Q_i = -F_i^T \dot{e}^T + \sum_{j=1}^n Q_{ij}$$

где A_i, F_i – индекс компонент вектора или тензора,
 \dot{e}^T – удельная работа внешних поверхностных сил,
 v_i – тензор напряжений,
 W_{ij} – приток энергии из j-ой фазы в i-ую за счёт работы межфазных сил,
 R_{ij} – межфазная сила (отнесенная к единице объёма смеси) из-за сил трения, давления, сцепления и т.д.,
 v_i – скорость вещества i-ой фазы на границе с j-ой фазой,
 Q_{ij} – теплоприток на границе между j-ой и i-ой фазой.

8

Приближение Ловреве Тепловой баланс

$$\frac{\partial \rho_i u_i}{\partial t} + \text{div}(h_i v_i) = -F_i Q_i + \sum_{j=1}^n Q_{ij}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\Delta T}{l} = \frac{l^2}{\tau} = \frac{l^2}{\tau} \approx 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$H \frac{\partial T}{\partial t} = H_0 \frac{\partial T}{\partial t} + H_1 \text{div}(v) - H_2 = \lambda_0 \Delta T$$

где T – температура,
 τ – характерное время обмена теплом,
 l – характерный размер,
 H – энтропия,
 H_0 – энтропия на фронте прогресса,
 T_0 – температура пласта,
 T_1 – температура теплоносителя,
 ΔT – перепад температур,
 λ_0 – коэффициент температуропроводности.

9

Технология парогравитационного дренажа (SAGD)

Первый этап – разогрев межскважинного пространства с помощью циркуляции пара в нагнетательной скважине.

10

Паровая камера

11

Физико-математическая модель SAGD

Уравнение сохранения массы воды, пара, нефти и нефти в паровой камере

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = -Q_w + J_{wv} \frac{\partial M_v}{\partial t} = Q_{wv} - \frac{\partial M_w}{\partial t} - Q_w$$

Уравнение теплового баланса в элементе разработки

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_w + U_v + U_o + U_s) = Q_{wv} - F_1 - Q_{wv} - Q_{wv}$$

Соотношение притока и оттока массы в паровой камере

$$\frac{Q_{wv}}{\rho_w (\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t})} = \frac{2\pi r}{\phi \mu_w (\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t})}$$

Соотношение расходов нефти и воды в добываемом флюиде

$$\frac{Q_{wv}}{Q_{wv}} = \frac{f_{wv}}{f_{wv}}$$

где Q_w, Q_v, Q_o – массовые расходы воды, пара, нефти, J_{wv} – интенсивность конденсации пара, M_w – масса нефти в элементе разработки, U_w, U_v, U_o, U_s – внутренняя энергия воды, пара, нефти и породы, F_1 – скрытая теплота парообразования, R – теплоток потери из камеры, μ_w – вязкость внутренней энергии нефти и воды, ρ_w, ρ_v, ρ_o – плотности воды, пара, нефти, ρ_s, ρ_{sk} – плотности воды, пара, нефти, ϕ – пористость, λ_0 – коэффициент температуропроводности, λ_0 – коэффициент температуропроводности, λ_0 – коэффициент температуропроводности.

12

Анализ результаты моделирования SAGD:

1) оптимальное время разработки элемента
2) оптимизация геометрии элемента

A_1 – паронефтяное отношение,
 W – обводненность продукции,
 K_1 – коэффициент охвата пласта,
 T_1 – время стабилизации K_1 ,
 T_2 – время резкого роста K_1 ,
 T_3 – время стабилизации W

A_2 – КИН за рентгеновский период,
 N – комплекс, характеризующий систему разработки

13

Главные выводы из моделирования SAGD

1. Созданная модель позволяет провести расчёт процесса за непродолжительное время, дать универсальные рекомендации по выбору оптимальной системы разработки.
2. Осуществлён прогнозный расчёт всех стадий процесса парогравитационного дренажа на модельном объекте.
3. Ограничивающим рентабельности процесса параметром является паронефтяное отношение. Конкуренция двух факторов при сближении рядов скважин – повышение охвата пласта и уменьшения расстояния между разработкой – приводит к налению оптимального расстояния между скважинами.

14

Технология парациклической обработки (ПЦО)

3 стадии процесса:

- 1) Закачка пара, необходимо знать скважину и напайку расхода.
- 2) Остановка работы скважины на конденсацию пара, необходимо знать время остановки.
- 3) Отбор горячей нефти, необходимо знать рост дебита и период добычи.

15

Физико-математическая модель ПЦО

Исходная Мощность тепловый поток

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \int_{V_0}^{\infty} \text{div}(T(r) - T_0) dr$$

Запасываемая в единицу времени теплота

$$\frac{\partial W}{\partial t} = Q_{p,c}(T_0 - T_0) + I$$

Закон Дарси

$$v_i = \frac{Q_i}{F} = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}$$

Дебит нефти

$$Q_o = \frac{2\pi k h \rho_o (p_0 - p_w)}{\mu_o \ln \frac{r_e}{r_w} + \mu_o \ln \frac{r_e}{r_w}}$$

где r_w, r_e – радиус скважины и центра питания, T_0 и u_0 – текущая и максимальная температура фронта прогресса, μ – коэффициент температуропроводности, c_s – удельная теплоёмкость пара, T_0 и T_1 – температура пара и пласта, v_i – скорость фильтрации нефти, F – площадь фильтрации, K – проницаемость пласта, ρ – мощность пласта, ρ_w, ρ_o – мощность нефти, вязкость нефти в разработкой и пористой области, ρ_s , ρ_w – давление, давление на контуре питания, давление на забой скважины.

16

Оптимизации технологии ПЦО

17

Выводы

1. Увеличение доли высоковязкой нефти среди мировых запасов приводит к необходимости применения тепловых методов увеличения нефтеотдачи (МУН)
2. Моделирование тепловых МУН осуществляется либо на основе уравнения притока тепла, либо с использованием балансовых соотношений.
3. Критерием эффективности процесса парогравитационного дренажа является максимум КИН за рентгеновский период, соответствующий оптимальному расстоянию между скважинами.
4. Подбор оптимального периода парациклической обработки позволяет оптимизировать технологию парациклической разработки и максимизировать накопленную добычу.

18

Презентация и доклад готовятся поэтапно в течение занятий в семестре.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ Темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
	7 семестр	
1	Первая информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
2	Первое лабораторное занятие	Проработка лекций
3	Первое лабораторное занятие	Проработка лекций
4	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
5	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
6	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
7	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
8	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
9	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
10	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
11	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
12	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
13	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
14	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
15	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
16	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
17	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
18	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
19	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
20	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
21	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
22	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
23	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
24	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
25	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
	8 семестр	
1	Первая информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
2	Первое лабораторное занятие	Проработка лекций
3	Первое лабораторное занятие	Проработка лекций
4	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
5	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
6	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
7	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
8	Презентация проделанной работы	Проработка лекций

9	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
10	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
11	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
12	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
13	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
14	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
15	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
16	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
17	Информационная лекция	Чтение обязательной и дополнительной литературы
18	Презентация проделанной работы	Проработка лекций
19	Презентация проделанной работы	Проработка лекций

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

Форма промежуточной аттестации – зачёт в семестрах 7,8.

В случае, если сумма баллов составляет не менее 61 и студент выполнил все задания текущего контроля, то ему выставляется оценка "зачтено".

Не получивший зачёт автоматом идёт на промежуточную аттестацию, на которой может получить дополнительные 20 баллов.

Доклад - 10 баллов.

Ответы на вопросы по теории - 10 баллов.

6.1 Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Образец презентации для доклада:

Физические основы современных методов теплового воздействия на нефтяные пласты

А. Я. Гилманов, научный руководитель профессор А. П. Шевелёв, Томский государственный университет

Содержание доклада

- Уравнение притока тепла в пористой среде
- Доля высоковязкой нефти
- Тепловой баланс
- Модель паравитационного дренажа
- Модель парациклического воздействия на пласт

Доля высоковязких нефтей в мире

Вид запасов	Величина, млрд т
Высоковязкая нефть	810
Нефть легкой и средней вязкости	182

Для разных нефтей Вязкость тяжелой нефти

Современные технологии

Оценка эффективности

- Кин=аОХВ*Квыт*
- КИТ= Ф(Ктепл потери в скелет+теплотери в округ породы)
- Тразработки

Основные допущения при выводе Уравнение притока тепла в пористой среде

$$\rho_i A_i \frac{d\omega_i}{dt} = \rho_i A_i + \rho_i Q_i + \sum_{j=1}^N J_{ij}(\omega_{ij} - \omega_i)$$

где ρ – плотность i-ой фазы,
 ω_i – внутренняя энергия i-ой фазы,
 ω_{ij} – обмен внутренней энергией между j-ой и i-ой фазами,
 J_{ij} – интенсивность массообмена между j-ой и i-ой фазами,
 A_i – работа внутренних сил в единицу времени, отнесенная к единице массы i-ой фазы,
 Q_i – приток тепла в единицу времени, отнесенный к единице массы i-ой фазы

Уравнение Работа внутренних сил и приток тепла

$$\rho_i A_i = \rho_i \sigma_i \dot{\epsilon} - \nu_i^T \nabla \sigma_i + \sum_{j=1}^N (W_{ij} - \theta_j \nu_i^T + \sum_{k=1}^N J_{ijk}(\nu_j^k - \nu_i^k))$$

$$\rho_i Q_i = -\rho_i \sigma_i \dot{\epsilon} + \sum_{j=1}^N Q_{ij}$$

где $\sigma, \dot{\epsilon}$ – индекс компонент вектора или тензора,
 σ_i^T – удельная работа внешних поверхностных сил,
 ν_i – скорость,
 ν_i^k – удельная работа значения поверхностных сил,
 ν_i^k – величина тепловой поток,
 W_{ij} – приток энергии из j-ой фазы в гую за счёт работы межфазных сил,
 θ_j – межфазная сила (отнесенная к единице объёма смеси) из-за сил трения, давления, сцепления и г.д.,
 ν_j – скорость вещества j-ой фазы на границе с j-ой фазой,
 Q_{ij} – теплоприток на границе между i-ой и j-ой фазами.

Приближение Ловьерье Тепловой баланс

$$\frac{\partial \rho_i \omega_i}{\partial t} + \text{div}(\rho_i \omega_i \nu_i) = -F_i Q_i + \sum_{j=1}^N J_{ij}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T}{T} \quad \alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$\frac{\rho_i}{\rho} (T - T_i) + H_i \text{div}(T - T_i) = \lambda_i \Delta T$$

где T – температура,
 T_i – температура теплоносителя,
 α – коэффициент времени обмена теплом,
 λ_i – коэффициент размер,
 H_i – эмальция,
 H_i – эмальция на фронте прогресса,
 ρ_i – температура пласта,
 ρ_i – температура теплоносителя,
 ΔT – перепад температур,
 ρ_i – температуропроводность,
 λ_i – эффективный коэффициент теплопроводности.

Технология паравитационного дренажа (SAGD)

Первый этап – разрыв межскважинного расстояния с помощью циркуляции пара в нагнетательной скважине.

Паровая камера

Физико-математическая модель SAGD

Уравнение сохранения массы воды, пара, нефти и нефти M_ж в паровой камере

$$\frac{dM_{ж}}{dt} = -Q_{ж} + J_{жw} \frac{dV}{dt} = Q_{ж} - J_{жw} \frac{dV}{dt} = -Q_{ж}$$

Уравнение теплового баланса в элементе разработки

$$\frac{d}{dt} (M_{ж} \omega_{ж} + M_{п} \omega_{п} + M_{н} \omega_{н}) = Q_{ж} - Q_{ж} - Q_{ж} \omega_{ж}$$

Соотношение притока и оттока массы в паровой камере

$$\frac{Q_{ж}}{\rho_{ж} \omega_{ж}} = \frac{2\pi}{\rho_{ж} \omega_{ж}} \frac{\partial p}{\partial r}$$

Соотношение расходов нефти и воды в добавочном флюиде

$$\frac{Q_{ж} \omega_{ж}}{Q_{ж} \omega_{п}} = \frac{f_{ж} \omega_{ж}}{f_{п} \omega_{п}}$$

где $Q_{ж}, Q_{п}, Q_{н}$ – массовые расходы воды, пара, нефти, $\omega_{ж}, \omega_{п}, \omega_{н}$ – интенсивность конденсации пара, $M_{ж}, M_{п}, M_{н}$ – масса нефти в элементе разработки, $M_{ж}, M_{п}, M_{н}$ – внутренняя энергия воды, пара, нефти и породы, f – коэффициент теплового паравитационного дренажа, R – тепловая потеря из камеры, $\omega_{ж}, \omega_{п}, \omega_{н}$ – удельная внутренняя энергия нефти и воды, $\rho_{ж}, \rho_{п}, \rho_{н}$ – плотности воды, пара, нефти, $\rho_{ж}, \rho_{п}, \rho_{н}$ – плотности воды, пара, нефти, ϕ – пористость, $\omega_{ж}, \omega_{п}, \omega_{н}$ – ОВП воды и нефти, $\lambda_{ж}/\lambda_{п}$ – отношение депрессии на нагнетательной скважине к депрессии на добавочном.

Анализ результаты моделирования SAGD:

1) оптимальное время разработки элемента
 2) оптимизации геометрии элемента

R – паровое отношение,
 W – обводненность продукции,
 K – коэффициент охвата пласта,
 t_1 – время стабилизации K ,
 t_2 – время реального роста R ,
 t_3 – время стабилизации W

K_{opt} – КИТ на рентгеновский период,
 N – комплекс, характеризующий систему разработки

Главные выводы из моделирования SAGD

- Созданная модель позволяет провести расчёт процесса за непродолжительное время, даёт универсальные рекомендации по выбору оптимальной системы разработки.
- Осуществлён прогнозный расчёт всех стадий процесса паравитационного дренажа на модельном объекте.
- Ограничивающим фактором процесса параметром является паровое отношение. Конкуренция двух факторов при сближении рядов скважин – повышения охвата пласта и уменьшения массы нефти в элементе разработки – приводит к наличию оптимального расстояния между скважинами.

Технология парациклической обработки (ПЦО)

3 стадии процесса:

- Закачка пара, необходимо знать скважину и с каким расходом.
- Охлаждение работы скважины на конденсацию пара, необходимо знать время охлаждения.
- Обход поровой нефти, необходимо знать рост добычи и период добычи.

Физико-математическая модель ПЦО

Источники Мощность тепловых потерь

$$\frac{dW}{dt} = \int_{V_0}^V 2\pi r \alpha (T(r) - T_0) dr$$

Закон сохранения в единицу времени энергии

$$\frac{dW}{dt} = Q_{ж} \rho_{ж} c_{ж} (T_0 - T_1) + I$$

Закон Дарси

$$v_i = \frac{Q_i}{F} = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}$$

Добычи нефти

$$Q_i = \frac{2\pi k h \rho_i (p_i - p_0)}{\mu_i \ln \frac{r_0}{r_i} + \mu_i \ln \frac{r_0}{r_w}}$$

где r_0, r_w – радиус скважины и контура питания, r, r_0 – текущая и максимальные координаты фронта прогресса, α – коэффициент теплопроводности, $c_{ж}$ – удельная теплоёмкость пара, T_0, T_1 – температуры пара и пласта, v_i – скорость фильтрации нефти, F – площадь фильтрации, k – проницаемость пласта, μ – вязкость пласта, ρ_i, ρ_0 – вязкость нефти, вязкость нефти в газовой и пористой областях, ρ_i, ρ_0 – давление, давление на контуре питания, давление на забое скважины.

Оптимизации технологии ПЦО

Выводы

- Увеличение доли высоковязкой нефти среди мировых запасов приводит к необходимости применения тепловых методов увеличения нефтеотдачи (МУН).
- Моделирование тепловых МУН осуществляется либо на основе уравнения притока тепла, либо с использованием балансовых соотношений.
- Критерием эффективности процесса паравитационного дренажа является максимум КИТ на рентгеновский период, соответствующий оптимальному расстоянию между скважинами.
- Подбор оптимального периода циклического воздействия позволяет оптимизировать технологию парациклической обработки и максимизировать накопленную добычу.

Презентация и доклад (по теме выпускной квалификационной работы) готовятся поэтапно в течение занятий в семестре.

6.2 Критерии оценивания компетенций:

Таблица 4

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций,	Оценочные материалы	Критерии оценивания
-------	--------------------------------	------------------------------------	---------------------	---------------------

		соотнесенные с планируемыми результатами обучения		
1.	Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные (ОПК-3)	<p>Пороговый (удовл.)</p> <p><i>Знает</i> Основы представления экспериментальных данных для научных исследований</p> <p><i>Умеет</i> проводить эксперименты для физических исследований</p>	Доклад, зачет	Полнота представления информации на докладе, качество ответов на дополнительные вопросы и на вопросы зачёта
		<p>Базовый (хор.)</p> <p><i>Знает</i> Основы обработки и представления экспериментальных данных для научных исследований</p> <p><i>Умеет</i> проводить эксперименты для физических исследований и представлять полученные данные с учётом размерностей физических величин</p>		
		<p>Повышенный (отл.)</p> <p><i>Знает</i> математическую обработку и основы представления экспериментальных данных для научных исследований</p> <p><i>Умеет</i> проводить эксперименты для физических исследований и представлять полученные данные с учётом количества</p>		

		значащих цифр и размерностей физических величин		
2.	Способен организовывать выполнение научно-исследовательских работ по закрепленной тематике (ПК-2)	<p>Пороговый (удовл.)</p> <p>Знает план выполнения научно-исследовательских работ</p> <p>Умеет проводить научно-исследовательские работы по актуальным проблемам физики</p> <p>Базовый (хор.)</p> <p>Знает план выполнения научно-исследовательских работ, некоторые проблемы отрасли, на которых специализируется образовательная программа</p> <p>Умеет организовывать и проводить научно-исследовательские работы по актуальным проблемам физики</p> <p>Повышенный (отл.)</p> <p>Знает план выполнения научно-исследовательских работ, проблематику отрасли, на которой специализируется образовательная программа</p> <p>Умеет организовывать, проводить и публиковать научно-</p>	Доклад, зачет	Полнота представления информации на докладе, качество ответов на дополнительные вопросы и на вопросы зачёта

		исследовательские работы по актуальным проблемам физики		
3.	Способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок (ПК-3)	<p>Пороговый (удовл.)</p> <p>Знает научные исследования в избранной области экспериментальных физических исследований с помощью современной приборной базы</p> <p>Умеет проводить научные исследования в избранной области экспериментальных физических исследований с помощью современной приборной базы</p>	Доклад, зачет	Полнота представления информации на докладе, качество ответов на дополнительные вопросы и на вопросы зачёта
		<p>Базовый (хор.)</p> <p>Знает научные исследования в избранной области экспериментальных физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</p> <p>Умеет проводить научные исследования в избранной области экспериментальных физических исследований с</p>		

		<p>помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</p>		
		<p>Повышенный (отл.) Знает научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта Умеет проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</p>		

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1 Основная литература:

1. Кожухар, В. М. Основы научных исследований [Электронный ресурс] : Учебное пособие / В. М. Кожухар. - Москва : Дашков и К, 2013. - 216 с. - ISBN 978-5-394-01711-7. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/415587> (дата обращения: 22.05.2020). – Режим доступа: по подписке.

2. Зализняк, В. Е. Основы научных вычислений. Введение в численные методы для физиков и инженеров / В. Е. Зализняк. — Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. — 264 с. — ISBN 978-5-4344-0764-9. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91976.html> (дата обращения: 22.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7.2 Дополнительная литература:

1. Губайдуллин А.А. Механика сплошной среды: лекции и задачи/ А. А. Губайдуллин; Тюм. гос. ун-т. - Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. - 172 с.

2. Кислицын, А. А. Основы теплофизики: (Лекции и семинары) / А. А. Кислицын. - Тюмень : Изд-во ТюмГУ, 2002. - 152 с.

3. Самарский А. А. Введение в численные методы: учеб. пособие для вузов/ А. А. Самарский. - Москва: Наука, 1982. - 271 с.

4. Семихина Л.П. Теплофизические свойства реальных газов: учеб. пособие/ Л. П. Семихина; Тюм. гос. ун-т. - Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. - 160 с.

5. Василенко, С. В. Эффектная и эффективная презентация : практическое пособие / С. В. Василенко. — Москва : Дашков и К, Ай Пи Эр Медиа, 2010. — 135 с. — ISBN 978-5-394-00255-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/1146.html> (дата обращения: 22.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7.3 Интернет-ресурсы:

1. Электронная международная библиотека статей на нефтегазовую тематику OnePetro <https://www.onepetro.org/>.

2. Электронная библиотека Попечительского совета механико-математического факультета Московского государственного университета <http://lib.mexmat.ru>

3. eLIBRARY – Научная электронная библиотека (Москва) <http://elibrary.ru/>

7.4 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Не предусмотрено использование в данной дисциплине.

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

- Лицензионное ПО: Необходимо наличие программного обеспечения Microsoft Office, для случаев дистанционной формы обучения – Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Аудитория с мультимедийным оборудованием.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


_____ С.А. Креков
23.06.2021

МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД И МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль: Фундаментальная физика
форма обучения очная

Губайдуллин Амир Анварович. Механика сплошных сред и многофазных систем. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

1. Пояснительная записка

Предметом механики сплошной среды является изучение движения газов, жидкостей и твердых деформируемых тел. Причем рассматривается макроскопическое движение, то есть не учитывается движение отдельных атомов и молекул, и принимается гипотеза сплошности, вводится понятие сплошной среды. Параметрами вещества могут быть плотность, перемещение, скорость, давление, температура, энтропия и др. Сплошную среду можно представлять себе состоящей из бесконечного множества частиц или материальных точек, но при этом каждая частица состоит из многих атомов и молекул и ее размеры много больше размеров атомов, молекул и расстояний между ними, то есть молекулярных размеров.

Теоретическая механика также изучает движение системы материальных точек, но система предполагается конечной, она может содержать пусть очень большое, но конечное число точек. Исследовать бесконечную систему намного сложнее. Механика сплошной среды имеет свою независимую аксиоматику, свои специфические экспериментальные методы изучения макроскопических свойств среды и свои развитые математические методы.

Исторически такие разделы механики и физики как гидродинамика, газовая динамика, электродинамика, теория упругости, теория пластичности, теория ползучести и другие возникли и развивались независимо друг от друга. На первый взгляд они сильно различаются, но на самом деле у них много общего и между ними существуют неразрывные связи. В результате возникла механика сплошной среды как общий фундамент, как наука, объединяющая эти дисциплины.

Механика многофазных систем является разделом механики сплошных сред и изучает макроскопические движения смесей твердых, жидких и газообразных веществ. Многофазные или гетерогенные смеси широко представлены в различных природных процессах и областях человеческой деятельности. Это газовзвеси, аэрозоли, суспензии, эмульсии, жидкости с пузырьками газа, композитные материалы, насыщенные жидкостью и газом грунты, горные породы и т.д. Математическое описание многофазных систем осложняется по сравнению с однофазными средами по двум причинам. Во-первых, осложняется описание процессов в отдельных фазах таких, как сжимаемость, вязкость, прочность, теплопроводность, химические реакции, турбулентность, электромагнитные процессы и др. Во-вторых, в многофазных системах помимо указанных существенно проявляются эффекты структуры фаз и ее изменения, эффекты межфазного взаимодействия такие, как фазовые переходы, обмен импульсом и энергией на межфазной границе, капиллярные эффекты, хаотическое движение, вращение и столкновения частиц, дробление, коагуляция и т.д. В результате число возможных процессов, которые должны быть отражены в уравнениях, многократно расширяется.

Цель дисциплины — дать студентам последовательную систему знаний о механике сплошных сред и многофазных систем, необходимых для формирования в сознании физической картины окружающего мира, применения физических понятий и законов к решению конкретных физических задач.

Задачи дисциплины:

- познакомить студентов с основными принципами и законами физики, касающихся разделов «Механика сплошных сред» и «Механика многофазных систем», и их математическим выражением;
- дать представление о теоретических методах исследований в физике;
- дать навык построения математических моделей простейших физических явлений, используя доступный математический аппарат;
- научить правильно соотносить содержание конкретных задач с общими законами физики.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в блок Б1 Дисциплины (модули), часть, формируемая участниками образовательных отношений, и относится к дисциплинам по выбору. Для её успешного освоения необходимо предварительное изучение дисциплин «Механика»,

«Молекулярная физика», «Математический анализ», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Дополнительные главы математики для физиков».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевые/функциональные)
ПК-2: способен организовывать выполнение научно-исследовательских работ по закрепленной тематике	–	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> – понятие системы многих частиц как континуум; – понятия скалярного, векторного и тензорного полей; – понятия ламинарного и турбулентного течений; – закон подобия; – понятия звуковых и ударных волн, сверхзвуковых течений; – основные методы дифференциального и интегрального исчисления, применяемые при решении задач механики сплошных сред и механики многофазных систем
		<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – применять методы и расчетные формулы механики сплошных сред и механики многофазных систем при решении практических задач; – решать континуальные уравнения сохранения; – записывать уравнения состояния при формировании замкнутой системы уравнений гидродинамики

2. Структура и объём дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			5 семестр
Общий объём	зач. ед.	5	5
	час	180	180
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		122	122
Лекции		34	34
Практические занятия		0	0
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		58	58
Вид промежуточной аттестации			Экзамен

3. Система оценивания

3.1. В качестве форм текущего контроля используются решение задач на практических занятиях и контрольные работы, которые позволяют оценить уровень овладения обучающимися знаниями по предмету.

В семестре предусмотрено проведение 3 контрольных работ. Контрольная работа № 1 состоит из 3 задач и оценивается до 15 баллов. Контрольные работы № 2 и № 3 состоят из одной задачи и могут оцениваться в 20 баллов.

Также дополнительно студент может набрать баллы за решение задач, предназначенных для проведения практических занятий, оцениваемых по пятибалльной шкале. Решение необходимо продемонстрировать преподавателю и обосновать его.

Примерные критерии оценивания решения задач (указаны проценты от используемой шкалы оценивания — 5-балльной или 20-балльной):

0% от используемой шкалы оценивания (0 баллов):

- решение задачи не приведено;
- есть попытка решить задачу, но основные формулы или условия задачи приведены ошибочно;

- студент не поясняет ход решения или его пояснения содержат грубые ошибки;

30% от шкалы оценивания:

- правильно приведены основные формулы, но рассуждения в ходе решения содержат грубые ошибки;

- задача решена в общем виде, но отсутствуют количественные расчеты;

- отсутствуют необходимые рисунки или построения;

- студент поясняет ход решения в общем виде;

70% от шкалы оценивания:

- ход решения верный, но в выводах формул или расчетах есть незначительные ошибки;

- неверно определены размерности используемых/полученных величин;

- студент поясняет ход решения, но допускает незначительные ошибки в рассуждениях;

100% от шкалы оценивания:

- задача решена правильно, есть все необходимые комментарии, рисунки и расчеты, студент верно поясняет ход решения.

Преподаватель может использовать систему штрафов, уменьшая набранные баллы за пропуски занятий без уважительных причин, за непредоставление выполненных домашних заданий на проверку, за систематический отказ отвечать на занятиях и т.д. Возможно также начисление премиальных баллов за работы, выполненные студентом на высоком уровне.

Форма промежуточной аттестации — экзамен. Сдаче экзамена подлежат студенты, по итогам семестра набравшие количество баллов, соответствующее оценке «неудовлетворительно», а также студенты, желающие повысить свою оценку.

Шкала перевода баллов в оценки:

- менее 61 балла – «неудовлетворительно»;
- от 61 до 75 баллов – «удовлетворительно»;
- от 76 до 90 баллов – «хорошо»;
- от 91 до 100 баллов – «отлично».

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Основные гипотезы МСС.	6	2	0	2	0
2.	Линии тока и траектории.	6	2	0	2	0
3.	Тензор 2-го ранга. Операции с тензорами.	14	2	0	8	0
4.	Вектор перемещения материальной частицы.	12	2	0	6	0
5.	Уравнение неразрывности.	12	2	0	6	0
6.	Вектор напряжений. Тензор напряжений.	12	2	0	6	0
7.	Уравнение импульсов. Уравнение кинетической и внутренней энергии.	12	2	0	4	0
8.	Идеальная жидкость.	8	2	0	4	0
9.	Упругое тело.	8	2	0	4	0
10.	Понятие многофазной среды. Виды дисперсных смесей. Размеры неоднородностей. Пространственное осреднение в механике гетерогенных смесей.	6	2	0	1	0
11.	Феноменологическая теория многоскоростного континуума.	8	2	0	3	0
12.	Уравнения динамики пузырьковой жидкости в термодинамически равновесном приближении.	8	1	0	4	0

13.	Уравнения пузырьковой жидкости с учетом неравновесности по давлению и температуре.	8	1	0	4	0
14.	Модель парожидкостной пузырьковой среды.	8	2	0	4	0
15.	Истечение вскипающей жидкости.	8	2	0	2	0
16.	Уравнения гидромеханики газозвесей.	8	2	0	2	0
17.	Модель неравновесной насыщенной пористой среды.	8	2	0	2	0
18.	Акустика пористой среды.	8	2	0	4	0
19.	Консультации по дисциплине	18	0	0	0	18
20.	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	180	34	0	68	20

4.2. Содержание дисциплины по темам

Тема 1. Основные гипотезы МСС.

- Евклидовость пространства, абсолютность времени и массы, постулат Галилея.
- Определение сплошной среды, материальной точки, гипотеза индивидуализации.
- Эйлерово и лагранжево описания движения сплошной среды. Переход между ними.

- Материальная производная.

Тема 2. Линии тока и траектории.

- Траектории и линии тока, поверхность (трубка) тока, особые точки.
- Поступательное движение.
- Установившееся и неустойчивое течение.
- Потенциальное и безвихревое течения.

Тема 3. Тензор 2-го ранга. Операции с тензорами.

- Ортогональные преобразования координат, тензор n -го ранга, операции, выполняемые над тензорами.

- Главные значения и главные оси симметричного тензора второго ранга.

- Применение оператора Гамильтона к скалярным, векторным и тензорным величинам.

- Определение тензора деформаций. Перемещения.

Тема 4. Вектор перемещения материальной частицы.

- Лагранжев тензор деформаций (Грина).
- Эйлеров тензор деформаций (Альманси).
- Выражение через перемещения.
- Вычисление тензоров Грина и Альманси.

Тема 5. Уравнение неразрывности.

- Механический смысл диагональных и недиагональных компонент тензора деформаций, его первого инварианта.

- Тензор скоростей деформаций, механический смысл.
- Поверхностные и объёмные силы.

Тема 6. Вектор напряжений. Тензор напряжений.

- Вектор напряжений, нормальное и касательное напряжения.
- Тензор напряжений, физический смысл его компонент.
- Вычисление вектора напряжений.

Тема 7. Уравнение импульсов. Уравнения кинетической и внутренней энергий.

- Формулы дифференцирования интеграла по времени.
- Давление.
- Разложение тензора напряжений на сумму шаровой части и девиатора.
- Интегральная и дифференциальная формы записи уравнений сохранения массы, импульса, момента количества движения, энергии.
- Уравнения сохранения массы, импульса, полной энергии на поверхности сильного разрыва.

Тема 8. Идеальная жидкость.

- Одномерное движение идеальной несжимаемой жидкости.
- Потенциальное течение идеальной несжимаемой жидкости.
- Идеальная, вязкая, ньютоновская жидкости.
- Уравнение Навье-Стокса.
- Ламинарное и турбулентное течения.
- Течения Куэтта и Пуазейля.

Тема 9. Упругое тело.

- Упругое и линейно-упругое изотропное тела.
- Закон Гука.
- Уравнение Ляме.
- Решение контрольной работы № 1.

Пример задания варианта контрольной работы № 1

$$\text{Дано: } v_1 = \frac{x_1}{t+a}, \quad v_2 = \frac{2tx_2}{t^2+a^2}, \quad v_3 = \frac{3t^2x_3}{t^3+a^3}, \quad a = \text{const} > 0.$$

Дать определение и найти: якобиан, лагранжево описание движения, скорость и ускорение в лагранжевых переменных, лагранжев тензор деформаций, линии тока.

Тема 10. Понятие многофазной среды. Виды дисперсных смесей. Размеры неоднородностей. Пространственное осреднение в механике гетерогенных смесей.

- Виды дисперсных смесей: суспензии, эмульсии, газовзвеси, пузырьковые среды.
- Дисперсные частицы и дисперсионная фаза.
- Размеры частиц и способы их измерения.
- Основные допущения механики многофазных систем.
- Пространственное осреднение в механике гетерогенных смесей.

Тема 11. Феноменологическая теория многоскоростного континуума.

- Понятие многоскоростного континуума.
- Диффузионные скорости, субстанциональные производные.
- Уравнения сохранения для составляющих континуума и всей смеси в целом.
- Особенности математического описания многофазных сред.

Тема 12. Уравнения динамики пузырьковой жидкости в термодинамически равновесном приближении.

- Вывод уравнения состояния пузырьковой жидкости в термодинамически равновесном приближении.

Тема 13. Уравнения пузырьковой жидкости с учетом неравновесности по давлению и температуре.

- Вывод уравнения состояния пузырьковой жидкости с учетом неравновесности по давлению и температуре.

Тема 14. Модель парожидкостной пузырьковой среды.

- Вывод уравнений, описывающих парожидкостную пузырьковую среду.
- Решение контрольной работы № 2.

Пример задания варианта контрольной работы № 2

Двухфазная смесь течет по гладкой горизонтальной трубе ($d = 20$ мм), $m^0 = 1800$ кг/(м²·с), расходное массовое газосодержание $x = 0,001$. Коэффициент скорости $K = \sqrt{\rho_l^0 / \rho_{\text{hom}}}$, $\rho_g^0 = 1,2$ кг/м³, $\rho_l^0 = 1000$ кг/м³. Найти коэффициент скорости K ; приведенные скорости фаз W_l и W_g ; плотность гомогенной среды ρ_{hom} ; объемное содержание газа $\alpha_g = \alpha$ и жидкости $\alpha_l = 1 - \alpha$; объемное расходное содержание газа $\beta_g = \beta$ и жидкости $\beta_l = 1 - \beta$; скорости фаз v_l и v_g и гомогенную скорость v_{hom} ; относительную скорость фаз v_{rel} и скорость дрейфа v_d ; плотность смеси ρ и объемный расход смеси Q .

Тема 15. Истечение вскипающей жидкости.

- Решение задачи об истечении пузырьковой жидкости в равновесном приближении.
- Численное решение задачи об истечении вскипающей жидкости.

Тема 16. Уравнения гидромеханики газовзвесей.

- Вывод уравнений двухскоростных течений дисперсных сред (газовзвесей).

Тема 17. Модель неравновесной насыщенной пористой среды.

- Вывод уравнений, описывающих неравновесную насыщенную пористую среду.

Тема 18. Акустика пористой среды.

- Вывод уравнений состояния пористой среды при воздействии в акустических полях.
- Решение контрольной работы № 3.

Пример задания варианта контрольной работы № 3

Найти параметры состояния (p , ρ , T , u , i , s) в крайних точках цикла газотурбиной установки простейшей схемы, работающей при следующих исходных данных: начальное давление $p_1 = 0,1$ МПа, начальная температура $T_1 = 10$ °С, конечное давление сжатия $p_2 = 0,6$ МПа, конечная температура расширения $T_4 = 270$ °С, газовая постоянная $R_g = 287$ Дж/(кг·К), удельная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 1000$ Дж/(кг·К). Внутреннюю энергию u , энтальпию i определить относительно 0 К; энтропию s — относительно состояния $p_0 = 0,101$ МПа, $T_0 = 273$ К. Вычислить для каждого процесса цикла удельную термодинамическую работу A_V , удельную потенциальную работу A_p , количество подведенной или отведенной теплоты, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Определить удельную термодинамическую работу цикла, удельную потенциальную работу цикла, количество теплоты, КПД цикла.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1.	Основные гипотезы МСС.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
2.	Линии тока и траектории.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
3.	Тензор 2-го ранга. Операции с тензорами.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
4.	Вектор перемещения материальной частицы.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
5.	Уравнение неразрывности.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
6.	Вектор напряжений. Тензор напряжений.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
7.	Уравнение импульсов. Уравнение кинетической и внутренней энергии.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
8.	Идеальная жидкость.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
9.	Упругое тело.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
10.	Понятие многофазной среды. Виды дисперсных смесей. Размеры неоднородностей. Пространственное осреднение в механике гетерогенных смесей.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
11.	Феноменологическая теория многоскоростного континуума.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
12.	Уравнения динамики пузырьковой жидкости в термодинамически равновесном приближении.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
13.	Уравнения пузырьковой жидкости с учетом неравновесности по давлению и температуре.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
14.	Модель парожидкостной пузырьковой среды.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
15.	Истечение вскипающей жидкости.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
16.	Уравнения гидромеханики газовзвесей.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
17.	Модель неравновесной насыщенной пористой среды.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.
18.	Акустика пористой среды.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Решение задач.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устно-письменной форме. Экзамен включает письменную часть — ответ по экзаменационному билету. Устная часть экзамена оценивает знания по дисциплине путём собеседования с преподавателем.

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Главные значения и главные оси тензора. Характеристическое уравнение. Собственные значения симметричного тензора.
 2. Ортогональность главных осей, диагональность матрицы тензора в главных осях.
 3. Линии тока и траектории. Установившиеся и неустановившиеся движения. Потенциальные и вихревые движения.
 4. Дифференцирование по времени при лагранжевом и эйлеровом описании. Материальная производная.
 5. Лагранжев тензор деформаций (Грина). Выражение через перемещения.
 6. Эйлеров тензор деформаций (Альманси). Выражение через перемещения.
 7. Тензор малых деформаций. Относительное изменение длины отрезка.
 8. Механический смысл тензора малых деформаций. Условия совместности деформаций.
 9. Распределение скоростей в бесконечно малой частице. Теорема Коши-Гельмгольца.
 10. Три теоремы об интегралах.
 11. Уравнение неразрывности при эйлеровом описании.
 12. Уравнение неразрывности при лагранжевом описании.
 13. Тензор напряжений. Механический смысл тензора напряжений. Нахождение вектора напряжений.
 14. Уравнение импульсов. Система уравнений сохранения массы и импульса. Дивергентная форма и форма Громеки-Лэмба ускорения материальной частицы.
 15. Уравнение момента количества движения. Симметричность тензора напряжений.
 16. Главные оси и главные напряжения тензора напряжений. Вектор напряжений.
- Давление. Поверхность напряжений Коши.
17. Закон сохранения энергии.
 18. Уравнения сохранения кинетической энергии и внутренней энергии.
 19. Уравнение теплопроводности для неподвижной и подвижной среды.
 20. Идеальная жидкость. Одномерное движение идеальной несжимаемой жидкости.
 21. Потенциальное течение идеальной несжимаемой жидкости. Задача Неймана.
 22. Интеграл Коши-Лагранжа.
 23. Интеграл Бернулли.
 24. Вязкая, линейно-вязкая, линейно-вязкая изотропная жидкость.
 25. Главные оси тензоров напряжений и скоростей деформаций ньютоновской жидкости. Свойство диссипации механической энергии. Граничные условия.
 26. Уравнение Навье-Стокса.
 27. Течение Куэтта.
 28. Течение Пуазейля.
 29. Упругое, линейно-упругое, линейно-упругое изотропное тело.
 30. Уравнение Ляме.
 31. Растяжение стержня. Всестороннее сжатие. Сдвиг.
 32. Привести основные допущения механики многофазных систем. Дать определение многоскоростного континуума. Записать уравнения сохранения масс для составляющих континуума и всей смеси в целом.

33. Записать уравнения сохранения импульсов каждой составляющей континуума и всей смеси в целом.
34. Записать уравнения сохранения энергии для составляющих континуума и всей смеси в целом.
35. Обобщение понятия субстанциональной производной для величин, характеризующих гетерогенную смесь в целом и аддитивных по массам входящих в смесь составляющих.
36. Выделить области распространения многофазных потоков. Основные определения: массовый и объемный расходы, скорость, плотности фаз, объемное и объемнорасходное газосодержания, гомогенные скорость и плотность. Унос жидкости газом.
37. Дать определение политропного процесса. Для этого процесса записать выражения для удельной термодинамической работы, удельной потенциальной работы, количества подведенной или отведенной теплоты (для реальных и калорически совершенных газов).
38. Записать уравнения состояния для двухпараметрических флюидов (удельная внутренняя энергия и энтальпия).
39. Записать уравнения состояния для двухпараметрических флюидов (удельная свободная энергия и удельный химический потенциал Гиббса).
40. Получить термодинамические тождества для уравнений состояния для двухпараметрических флюидов.
41. Записать выражения для расчета теплоемкостей и коэффициентов измерения объема и давления для двухпараметрических флюидов.
42. Записать уравнения состояния для квазисовершенного газа.
43. Записать уравнения состояния для газа Ван-дер-Ваальса. Найти параметры критического состояния для газа Ван-дер-Ваальса.
44. Записать расчетные соотношения при истечении газов через суживающиеся сопла и для газотурбинных установок (для простейшей схемы).
45. Теорема для набора величин с независимой размерностью. Теорема о наибольшем числе величин в наборе величин с независимыми размерностями.
46. Теорема о преобразовании единиц измерения в пределах выбранного класса. Теорема о независимости безразмерной величины от совокупности размерных переменных.
47. Теорема о размерности определяемой величины. Переход к безразмерным параметрам (П-теорема).
48. Применение метода теории размерностей к анализу задачи о силе, действующей на сферу, поступательно движущуюся в вязкой жидкости.
49. Применение метода теории размерностей к анализу задачи о силе, действующей на сферу, поступательно движущуюся в газе со сверхзвуковой скоростью.
50. Применение метода теории размерностей к анализу задачи о свободной конвекции.
51. Применение метода теории размерностей к анализу задачи о гидравлическом сопротивлении при течении жидкости в горизонтальной трубе.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ПК-2: способен организовывать выполнение научно-исследовательских работ по закрепленной тематике	<p>Пороговый уровень (удовл.): <i>Знает:</i> основную терминологию механики сплошных сред и многофазных систем, операции над тензорами, источники литературы по тематике дисциплины. <i>Умеет:</i> интерпретировать физические явления, собирать и обрабатывать информацию.</p> <p>Базовый уровень (хор.): <i>Знает:</i> основную терминологию механики сплошных сред и многофазных систем, операции над тензорами, источники литературы по тематике дисциплины, вывод основных уравнений механики сплошных сред. <i>Умеет:</i> интерпретировать физические явления, собирать и обрабатывать информацию, пользоваться сформированным математическим аппаратом механики сплошных сред, её аксиоматикой и методами решения классических задач.</p> <p>Повышенный уровень (отл.): <i>Знает:</i> основную терминологию механики сплошных сред и многофазных систем, операции над тензорами, источники литературы по тематике дисциплины, вывод основных уравнений механики сплошных сред и механики многофазных систем. <i>Умеет:</i> интерпретировать физические явления, собирать и обрабатывать информацию, пользоваться сформированным математическим аппаратом механики сплошных сред, её аксиоматикой и методами решения задач повышенной сложности.</p>	Решение задач на практических занятиях, контрольные работы, вопросы к экзамену	При решении задач на практических занятиях и в ходе контрольных работ оценивается правильность полученного ответа, правильность вывода необходимых уравнений, дополнительные рисунки и пояснения. Экзамен: полнота и правильность ответов на вопросы, правильность вывода необходимых уравнений, ссылки на дополнительные источники при ответе.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

1. Губайдуллин, А.А. Механика сплошной среды: лекции и задачи / А.А. Губайдуллин; Тюм. гос. ун-т. — Тюмень: изд-во Тюм. гос. ун-та, 2008. — 172 с.
2. Нигматулин Р.И. Механика сплошной среды: кинематика, динамика, термодинамика, статистическая динамика: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности 010701 «Фундаментальная математика и механика» и направлению подготовки 010800 «Механика и математическое моделирование» / Р.И. Нигматулин. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. — 640 с.

7.2. Дополнительная литература:

1. Черный, Г.Г. Газовая динамика: учебник для вузов / Г.Г. Черный. — М.: Наука, 1988. — 424 с.
2. Димитриенко, Ю.И. Нелинейная механика сплошной среды [Электронный ресурс] / Ю.И. Димитриенко. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 624 с. — ISBN 978-5-9221-1110-2. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/544776> (дата обращения: 16.06.2021). — Режим доступа: по подписке.
3. Победря, Б.Е. Основы механики сплошной среды. Курс лекций / Победря Б.Е., Георгиевский Д.В. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 272 с.: ISBN 5-9221-0649-X. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/544635> (дата обращения: 16.06.2021). — Режим доступа: по подписке.
4. Тепломассоперенос в нефтегазовых и строительных технологиях: учебное пособие / А.Б. Шабаров [и др.]; ред.: А.Б. Шабаров, А.А. Кислицын; рец.: В.Н. Антипов, Ю.В. Пахаруков; Тюменский государственный университет. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2014. — 2-Лицензионный договор №223/2016-03-02. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). — URL: [https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Kislitsina_223_223\(1\)_Teplomassoperenos_UP_2014.pdf](https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Kislitsina_223_223(1)_Teplomassoperenos_UP_2014.pdf). (дата обращения: 16.06.2021).

7.3. Интернет-ресурсы:

—

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

eLIBRARY – научная библиотека. — <http://elibrary.ru>

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:
платформа для электронного обучения Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций требуется мультимедийная учебная аудитория, оснащенная учебной мебелью, доской аудиторной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием, персональным компьютером.

Для проведения практических занятий требуется учебная аудитория, оснащенная учебной мебелью и аудиторной меловой или интерактивной доской.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе



23.06.2021 С.А. Креков

ТЕПЛОФИЗИКА

Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль: Фундаментальная физика
форма обучения очная

Шастунова Ульяна Юрьевна. Теплофизика. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Шастунова У.Ю., 2021.

1. Пояснительная записка

Цель дисциплины «Теплофизика» заключается в том, чтобы познакомить студентов с основными проблемами современной теплофизики, с теплофизическими процессами спецпроизводств и подготовить студентов к изучению спецкурсов, расчету проектов и выполнению индивидуального спецпрактикума.

Основные задачи дисциплины:

- овладение студентами аналитических методов решения задач теплопроводности при различных граничных условиях, конвективного теплопереноса, по процессам переноса тепла при кипении и конденсации среды;
- познакомить студентов с основными положениями теории конвективного теплопереноса, дать представления для решения задач по свободной и вынужденной конвекции, рассмотреть особенности процессов переноса в турбулентном потоке;
- познакомить студентов с уравнениями пограничного слоя (гидродинамического, теплового, диффузионного);
- познакомить студентов с основными понятиями и модельными представлениями о кипении и конденсации среды.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в вариативную часть блока Б1 Дисциплины (модули), часть, формируемая участниками образовательных отношений, и относится к дисциплинам по выбору.

При изучении курса используются знания и умения, полученные студентами в курсах: «Молекулярная физика», «Математический анализ», «Механика».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевые/функциональные)
ПК-2: способен организовать выполнение научно-исследовательских работ по закрепленной тематике	–	Знает избранные области экспериментальных и теоретических физических исследований; современную приборную базу; современные информационно-коммуникационные технологии; отечественный и зарубежный опыт в области физики, на которой специализируется образовательная программа; фундаментальные разделы общей и теоретической физики; методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах.
		Умеет под руководством или самостоятельно проводить научно-исследовательские работы; выделять и ставить задачи, решаемые в рамках доступных приближений и ресурсов; создавать новые или работать с готовыми физическими моделями изучаемых объектов; учитывать влияние внешних параметров, начальных и граничных условий на поведение моделей; работать с современной приборной базой; решать и анализировать экспериментальные и теоретические задачи с помощью специализированных пакетов прикладных программ.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			5 семестр
Общий объем	зач. ед.	5	5
	час	180	180
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		122	122
Лекции		34	34
Практические занятия		-	-
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		58	58
Вид промежуточной аттестации			экзамен

3. Система оценивания

3.1. На учебных занятиях оценивается работа студентов на лекциях (0–1 балл за занятие) и работа в аудитории на лабораторных занятиях (0–5 баллов за решение практических задач и 0–16 баллов за лабораторную работу).

При выполнении контрольных точек (контрольные работы) студенту предоставляется вариант с задачами (от 2 до 6 задач в зависимости от темы, а также в зависимости от уровня группы). Работа оформляется на отдельных листах, выданные преподавателем, и должна содержать подробное решение всех заданий. Преподаватель имеет право заменить тексты задач, предложенные в Оценочных материалах по дисциплине, в связи с неактуальностью формулировок.

В течение семестра студентам необходимо выполнить 6 лабораторных работ. Для каждой выполняемой лабораторной работы оценивается:

- сдача допуска обязательного допуска к выполнению практической части лабораторной работы (0–4 балла),
- выполнение лабораторной работы, обработка полученных результатов, оформление отчета (0–6 баллов),
- защита выполненной лабораторной работы в формате собеседования с преподавателем по контрольным и дополнительным вопросам (0–6 баллов).

Форма промежуточной аттестации по дисциплине — экзамен. Экзамен возможно получить автоматически, при усвоении:

65% материала — "удовлетворительно" (количество баллов, полученных при усвоении дисциплины на учебных встречах в семестре — 65);

80% материала — "хорошо" (количество баллов, полученных при усвоении дисциплины на учебных встречах в семестре — 80).

Если студент претендует на отметку "отлично", то он сдает экзамен в устной форме.

Обязательным условием сдачи экзамена на "отлично" — это сдача всех лабораторных работ.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Физические аспекты процессов теплообмена	10	2	0	4	1
2.	Основные законы теплопроводности. Начальные и граничные условия для уравнения теплопроводности	12	2	0	4	1
3.	Стационарные задачи теплопроводности	10	2	0	4	1
4.	Нестационарные задачи теплопроводности (аналитические методы решения)	10	2	0	4	1
5.	Нестационарные задачи теплопроводности (численные методы решения)	10	2	0	4	1
6.	Безразмерные параметры тепломассопереноса	10	2	0	4	1
7.	Конвективный теплообмен	10	2	0	4	1
8.	Теплообмен излучением	10	2	0	4	1
9.	Теплофизические свойства веществ и методы их измерения	10	2	0	4	1
10.	Основные положения теории конвективного переноса	10	2	0	4	1
11.	Теория подобия. Критериальные уравнения	10	2	0	4	1

12.	Динамический, тепловой и диффузионный пограничные слои. Тепломассообмен при внешнем обтекании тел	14	2	0	4	1
13.	Тепломассообмен при внутреннем течении в трубах и каналах	10	2	0	4	1
14.	Сложный теплообмен	12	2	0	4	2
15.	Тепломассоперенос вблизи поверхности «жидкость-газ»	10	2	0	4	1
16.	Тепломассообмен при конденсации пара	10	2	0	4	1
17.	Тепломассообмен при кипении	10	2	0	4	1
18.	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	180	34	0	68	20

4.2. Содержание дисциплины по темам

Тема 1. Физические аспекты процессов теплообмена

Терминология. Предмет «Теплофизика».

Способы переноса тепла: теплопроводность, конвекция, излучение.

Поле температуры, понятие градиента температуры.

Основные понятия и определения теплофизики (терминология): тепловой поток, плотность теплового потока, мощность внутренних источников теплоты, теплоноситель, теплообменник.

Понятия теплоотдачи и теплопередачи: коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, температурный напор, местный температурный напор, средний логарифмический и средний интегральный температурный напоры, внешнее и общее термические сопротивления.

Тема 2. Основные законы теплопроводности

Плотность теплового потока, закон Фурье. Закон Био-Фурье.

Коэффициент теплопроводности. Некоторые теории и экспериментальные данные по определению коэффициента теплопроводности для различных веществ. Коэффициент теплопроводности газов. Коэффициент теплопроводности жидкостей. Коэффициент теплопроводности твердых тел: металлы и сплавы.

Термоупругость.

Краевые условия и типы краевых задач: задача Коши, смешанная задача, стационарная задача. Граничные условия 1, 2, 3, 4-го рода.

Основные методы решения задач теплопроводности: метод разделения переменных однородных задач теплопроводности (метод Фурье).

Тема 3. Стационарные задачи теплопроводности

Решение стационарного дифференциального уравнения теплопроводности без внутренних источников тепла для бесконечной тонкой пластины. Температурное поле в плоской стенке при граничных условиях первого рода. Приведение уравнений к безразмерному виду.

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Теплопроводность через многослойную стенку. Эквивалентный коэффициент теплопроводности плоской стенки. Теплопроводность через плоскую стенку при граничных условиях третьего рода (теплопередача).

Термическое сопротивление теплопроводности, теплоотдачи, теплопередачи. Коэффициент теплопередачи.

Двумерное поле температур. Решение стационарного дифференциального уравнения теплопроводности при наличии внутренних источников тепла для бесконечной тонкой пластины.

Плотность объемного тепловыделения. Температурное поле в плоской стенке при наличии тепловыделений. Симметричные условия отвода теплоты от пластины. Пластина с одной теплоизолированной поверхностью. Пластина с разными (постоянными) температурами поверхностей.

Тема 4. Нестационарные задачи теплопроводности (аналитические методы решения)

Решение уравнения теплопроводности методом функции Грина в нестационарном случае (для трех краевых задач).

Тема 5. Нестационарные задачи теплопроводности (численные методы решения)

Метод прогонки.

Тема 6. Безразмерные параметры тепломассопереноса

Число Фурье. Число Пекле. Число Нуссельта. Число Рейнольдса. Число Прандля. Число Грасгофа и Рэлея.

Тема 7. Конвективный теплообмен

Основные понятия и определения процессов конвективного теплообмена.

Физические свойства жидкостей. Гидродинамический и тепловой пограничные слои.

Тема 8. Теплообмен излучением

Спектры излучения. Описание процесса лучистого теплообмена. Собственное, отраженное, поглощенное, пропущенное, эффективное, результирующее излучение.

Понятие абсолютно черного тела. Излучательные характеристики абсолютно черного тела.

Спектральная плотность потока излучения. Интегральная плотность потока излучения.

Закон Планка. Правило смещения Вина. Закон Стефана Больцмана. Закон Кирхгофа. Закон Ламберта.

Основные положения (определения, степень черноты). Основные закономерности теплового излучения. Определение температуры излучающих тел.

Лучистый теплообмен между твердыми телами. Лучистый теплообмен между телами, образующими замкнутую систему. Экранирование тел.

Лучистый теплообмен в газовых средах. Особенности излучения газов. Теплообмен между газом и оболочкой.

Тема 9. Теплофизические свойства веществ и методы их измерения

Методы измерения теплофизических параметров. Измерения методом температурных волн.

Задача о температурных волнах в полугораниченной среде.

Диаграмма состояния воды и ее теплофизические свойства. Водяной пар, свойства льда и вечномерзлого грунта.

Темы лабораторных работ:

Лабораторная работа № 1. Исследование теплопередачи при вынужденном движении воздуха в трубе.

Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом при имитационном моделировании процесса теплообмена.

Лабораторная работа № 3. Изучение теплоотдачи при естественной конвекции около вертикального цилиндра.

Лабораторная работа № 4. Исследование теплопроводности материалов методом пластины.

Лабораторная работа № 5. Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра методом имитационного моделирования процесса теплообмена.

Лабораторная работа № 6. Исследование работы теплообменного аппарата.

Тема 10. Основные положения теории конвективного переноса

Движение вязкой жидкости. Уравнение Навье-Стокса. Напряжение сдвига.

Режимы течения жидкости. Коэффициент трения, гидравлического сопротивления. Уравнение неразрывности. Вывод. Уравнение расхода.

Особенности процессов переноса в турбулентном потоке. Характер, структура турбулентного движения (масштаб, интенсивность, кинетическая энергия турбулентного движения). Метод Лагранжа, метод Эйлера для определения масштаба турбулентности. Правила осреднения турбулентных величин. Уравнения сохранения для турбулентного движения: уравнение неразрывности, уравнение Навье-Стокса, уравнение теплопроводности, диффузии.

Тема 11. Теория подобия. Критериальные уравнения

Использование теории подобия для расчета процессов переноса теплоты и вещества. Теория подобия. Пи-теорема размерности.

Константы подобия. Основные критерии подобия: критерий гомохронности, Рейнольдса, Грасгофа, Эйлера, Фруда, Галилея, Архимеда, Нуссельта, Прандтля, Пекле, Фурье, Стентона, Био, критерий фазового перехода. Критериальные уравнения свободной и вынужденной конвекции.

Тема 12. Динамический, тепловой и диффузионный пограничные слои. Тепломассообмен при внешнем обтекании тел

Гидродинамический пограничный слой. Уравнение Кармана.

Размеры ламинарного пограничного слоя.

Турбулентный пограничный слой при обтекании плоской поверхности. Профиль скорости. Толщина пограничного слоя.

Ламинарный подслей. Пограничный слой при внутреннем течении. Формула Никурадзе. Тепловой пограничный слой. Аналогия процессов переноса теплоты и количества движения.

Связь между вязкостным трением и теплоотдачей (ламинарный, турбулентный слои). Аналогия Рейнольдса. Приближенное соотношение между гидродинамическим и тепловым пограничными слоями. Диффузионный пограничный слой. Интегральное уравнение энергии в ламинарном пограничном слое.

Теплообмен при обтекании плоской поверхности. Теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра. Теплообмен при внешнем обтекании тел. Обтекание пучка труб. Теплообмен при обтекании шара.

Тема 13. Тепломассообмен при внутреннем течении в трубах и каналах

Теплообмен при ламинарном, турбулентном течениях. Теплообмен при свободной конвекции в ограниченном и неограниченном пространстве. Теплообмен при течении жидкости через пористую стенку.

Тема 14. Теплообмен излучением

Сложный теплообмен. Классические задачи на нахождение коэффициента теплопередачи через ограждающую конструкцию объектов.

Тема 15. Тепломассоперенос вблизи поверхности «жидкость-газ»

Диффузия с поверхности. Вывод исходных соотношений. Диффузионный поток теплоты.

Температура поверхности при испарении. Испарение воды в воздух. Влажный воздух. Испарение воды.

Стационарное испарение капли. Испарение неподвижной капли. Испарение капли при вынужденной конвекции.

Тема 16. Тепломассообмен при конденсации пара

Виды конденсации. Равновесие капли конденсата на поверхности. Режимы течения конденсата при стекании пленки конденсата.

Теплообмен при ламинарном и турбулентном режимах стекания конденсата на вертикальной стенке. Конденсация пара на горизонтальных и наклонных трубах.

Теплообмен при пленочной, капельной конденсации пара в трубах.

Тема 17. Тепломассообмен при кипении

Параметры и структура потока при кипении жидкостей в трубах. Теплоотдача при пузырьковом и пленочном режимах жидкости. Кризисы теплообмена. Испарение.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1.	Физические аспекты процессов теплообмена	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
2.	Основные законы теплопроводности. Начальные и граничные условия для уравнения теплопроводности	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
3.	Стационарные задачи теплопроводности	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
4.	Нестационарные задачи теплопроводности (аналитические методы решения)	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
5.	Нестационарные задачи теплопроводности (численные методы решения)	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
6.	Безразмерные параметры тепломассопереноса	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
7.	Конвективный теплообмен	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.

8.	Теплообмен излучением	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
9.	Теплофизические свойства веществ и методы их измерения	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Подготовка отчетов по лабораторным работам и к их защите.
10.	Основные положения теории конвективного переноса	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
11.	Теория подобия. Критериальные уравнения	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
12.	Динамический, тепловой и диффузионный пограничные слои. Тепло-массообмен при внешнем обтекании тел	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
13.	Тепломассообмен при внутреннем течении в трубах и каналах	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
14.	Сложный теплообмен	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
15.	Тепломассоперенос вблизи поверхности «жидкость-газ»	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
16.	Тепломассообмен при конденсации пара	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.
17.	Тепломассообмен при кипении	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устной форме по следующему алгоритму:

1. решение задачи (10-15 минут); выдается 1 задача из текстов контрольных работ;
2. письменный ответ на билет, содержащий два вопроса (30-40 минут);
3. беседа с преподавателем на письменный ответ на билет (10-15 минут).

Ответы на экзаменационный билет оцениваются по следующим критериям:

"отлично" — студент дал полный ответ на теоретические вопросы, правильно решил задачу, продемонстрировал взаимосвязь теоретических основ теплофизики и практики;

"хорошо" — студент показал систематические знания по дисциплине, способность применять их для решения практических задач, но имеются недочеты в ответах и решениях;

"удовлетворительно" — студент имеет представления о теплофизической теории и применении их в практике, недостаточно владеет теоретическими основами, в ответах и решениях допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;

"неудовлетворительно" — студент не имеет систематических знаний в области теплофизики, слабо разбирается в практических вопросах и допускает принципиальные ошибки в ответах и решениях.

На экзамене студент должен сдать задолженность по лабораторным работам при ее наличии.

В случае, если набираемых баллов при защите всех лабораторных работ недостаточно для получения оценки по экзамену, студенту задаётся три вопроса из перечня контрольных вопросов к лабораторным работам.

Примерные вопросы к экзамену

1. Основные понятия и общие закономерности процессов теплообмена. Виды теплообмена. Стационарные и нестационарные температурные поля. Закон Фурье. Коэффициенты тепло- и теплопроводности.
2. Уравнение теплопроводности. Классификация граничных условий.
3. Одномерное уравнение теплопроводности для тонкого стержня или трубы с конвективным переносом тепла и с теплообменом на боковой поверхности.
4. Закон Фика и уравнение диффузии.
5. Закон Дарси и уравнение фильтрации.
6. Стационарные температурные поля в пластине, в цилиндрической и сферической областях, в плоской и цилиндрической стенках при различных граничных условиях.
7. Задача о притоке жидкости к скважине.
8. Фундаментальное решение уравнения теплопроводности и его физический смысл.
9. Температурное поле неподвижного непрерывного источника. Функция ошибок Гаусса.
10. Нестационарное одномерное температурное поле в неограниченной, полуограниченной и ограниченной среде.
11. Температурное поле линейного неподвижного источника. Интегральная показательная функция.
12. Нагрев и охлаждение плоской пластины (плоской стенки), сплошного и полого цилиндров (цилиндрической стенки), шара при различных граничных условиях. Примеры.
13. Температурные волны.
14. Задача с фазовыми переходами (задача Стефана). Условие Стефана.
15. Приближенные методы решения задачи Стефана. Метод Лейбензона.
16. Задача о промерзании трубопровода.
17. Задачи промерзания-протаивания во влажных грунтах с учетом неполного замерзания воды.
18. Основные положения теории конвективного переноса. Движение вязкой жидкости: уравнение Навье-Стокса, уравнение неразрывности.
19. Уравнение Навье-Стокса. Режимы течения жидкости. Коэффициент трения.
20. Уравнение неразрывности. Вывод. Уравнение расхода.
21. Особенности процессов переноса в турбулентном потоке. Характер, структура турбулентного движения.
22. Правила осреднения турбулентных величин. Уравнения сохранения для турбулентного движения: уравнение неразрывности, уравнение Навье-Стокса (уравнение движения), уравнение теплопроводности, диффузии.
23. Использование теории подобия для расчета процессов переноса теплоты и вещества.
24. Критериальные уравнения.
25. Теория подобия. Числа Фурье, Пекле, Нуссельта, Био, Рейнольдса, Прандтля. Их физический смысл.
26. Теория подобия. Числа Грасгофа, Рэлея, Фруда, Струхала, Якоба, Стефана. Их физический смысл.
27. Динамический, тепловой и диффузионный пограничные слои. Система уравнений динамического и теплового пограничного слоя. Граничные условия при расчете пристенных течений с теплообменом.
28. Диффузионный пограничный слой. Аналогия Рейнольдса. Тройная аналогия.
29. Теплообмен в ламинарном пограничном слое.
30. Теплообмен в турбулентном пограничном слое.
31. Теплообмен при внешнем обтекании тел. Теплообмен при обтекании плоской поверхности. Теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра.

32. Теплообмен при внешнем обтекании тел. Обтекание пучка труб. Теплообмен при обтекании шара.
33. Теплообмен при внутреннем течении в трубах и каналах. Теплообмен при ламинарном, турбулентном течениях.
34. Теплообмен при свободной конвекции в ограниченном и неограниченном пространстве.
35. Теплообмен при течении жидкости через пористую стенку. Тепловой поток и температурное поле в жидкости, движущейся через пористую стенку.
36. Теплообмен при течении жидкости через пористую стенку. Тепловой поток и температурное поле в жидкости, движущейся между двумя пористыми поверхностями.
37. Теплообмен излучением. Основные положения (определения, степень черноты). Основные законы теплового излучения (закон Планка, закон смещения Вина, Стефана-Больцмана, Ламберта, Кирхгофа). Определение температуры излучающих тел.
38. Лучистый теплообмен между твердыми телами. Лучистый теплообмен между телами, образующими замкнутую систему. Экранирование тел.
39. Лучистый теплообмен в газовых средах. Особенности излучения газов. Теплообмен между газом и оболочкой.
40. Сложный теплообмен.
41. Диффузия с поверхности. Вывод исходных соотношений. Диффузионный поток теплоты.
42. Температура поверхности при испарении.
43. Испарение воды в воздух. Влажный воздух. Испарение воды. Стационарное испарение капли.
44. Испарение неподвижной капли. Испарение капли при вынужденной конвекции.
45. Тепломассообмен при конденсации пара. Виды конденсации. Равновесие капли конденсата на поверхности.
46. Режимы течения конденсата при стекании пленки конденсата. Теплообмен при ламинарном и турбулентном режимах стекания конденсата на вертикальной стенке.
47. Конденсация пара на горизонтальных и наклонных трубах.
48. Теплообмен при пленочной, капельной конденсации пара в трубах.
49. Тепломассообмен при кипении. Параметры и структура потока при кипении жидкостей в трубах.
50. Теплоотдача при пузырьковом и пленочном режимах жидкости. Кризисы теплообмена.

Контрольные вопросы к лабораторным работам для экзамена

Лабораторная работа № 1 «Исследование теплопередачи при вынужденном движении воздуха в трубе»

1. Метод измерения температуры поверхности, используемый в данной работе.
2. Назовите признаки наступления стационарного режима теплообмена с окружающей средой.
3. Назовите методы и приборы для измерения температуры, давления и расхода жидкости и газов.
4. Методы определения плотности воздуха в условиях лабораторных исследований.
5. Определите понятия локального и среднего коэффициентов теплоотдачи.

Лабораторная работа № 2 «Определение коэффициента излучения электропроводящих материалов калориметрическим методом при имитационном моделировании процесса теплообмена»

1. Назовите основные элементы экспериментальной установки и укажите их назначение.
2. Дайте определение понятию «тепловое излучение».

3. Что такое коэффициент излучения электропроводящего материала?
4. Сформулируйте закон Планка для абсолютно черного тела.
5. Определите понятие «степень черноты».
6. Сформулируйте закон Кирхгофа.
7. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана.

Лабораторная работа № 3 «Изучение теплоотдачи при естественной конвекции около вертикального цилиндра»

1. Какие методы измерения температуры используются в данной работе?
2. Назовите признаки наступления стационарного и нестационарного режимов теплообмена с окружающей средой.
3. Дайте определения плотности теплового потока, удельной плотности теплового потока и линейной плотности теплового потока.
4. Какие виды конвекции существуют? В чем их различие?
5. Дайте формулировку и математическое выражение уравнения конвективного теплообмена (закон Ньютона-Рихмана), используемого в данном опыте.

Лабораторная работа № 4 «Исследование теплопроводности материалов методом пластины»

1. Дайте определение теплопроводности.
2. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
3. Почему используемый метод измерения теплопроводности называется стационарным?
4. От каких факторов зависит коэффициент теплопроводности материала?
5. Как коэффициент теплопроводности зависит от температуры?
6. Какие методы определения коэффициента теплопроводности Вы знаете?
7. Дайте общую характеристику используемого метода определения теплопроводности.

Лабораторная работа № 5 «Исследование теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра методом имитационного моделирования процесса теплообмена»

1. Дайте определение конвективного теплообмена.
2. Понятие плотности теплового потока.
3. Охарактеризуйте теорию свободной и вынужденной конвекции.
4. Перечислите методы определения коэффициента теплоотдачи.
5. Основные особенности конвективного метода теплообмена.
6. Закон Стефана-Больцмана.
7. Охарактеризуйте критерии подобия: Nu_f , Gr_f , Pr_f .

Лабораторная работа № 6 «Исследование работы теплообменного аппарата»

1. Дайте определение понятию «теплообменные аппараты».
2. Классификация теплообменных аппаратов.
3. Какие величины характеризуют качество тепловой работы теплообменного аппарата?
4. Дайте определение понятию «температурный напор».
5. Назовите методы вычисления коэффициента теплопередачи.
6. Дайте определение понятию «коэффициент тепловой эффективности».
7. Физический смысл понятия «число единиц переноса теплоты».
8. Назовите схемы включения теплообменных аппаратов по направлению движения теплоносителей.
9. В чем преимущества и недостатки прямоточной схемы включения по сравнению с противоточной?

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ПК-2: способен организовывать выполнение научно-исследовательских работ по закрепленной тематике	<p>Пороговый уровень (удовл.): <i>Знает:</i> физические основы тепло-массопереноса. <i>Умеет:</i> применять инженерные формулы при решении задач стационарного теплообмена.</p> <p>Базовый уровень (хор.): <i>Знает:</i> физические основы тепло-массопереноса; основные положения конвективного, лучистого переноса; теплообмен при конденсации и кипении. <i>Умеет:</i> самостоятельно решать задачи стационарного и нестационарного теплообмена.</p> <p>Повышенный уровень (отл.): <i>Знает:</i> основные методы дифференциального и интегрального исчислений, применяемые при решении задач теплообмена; физические основы теплообмена; элементы математической теории нестационарного теплообмена и теории фильтрации; решение важнейших стационарных задач теплообмена, методы измерения теплофизических параметров вещества; основные положения конвективного, лучистого переноса; теплообмен при конденсации и кипении. <i>Умеет:</i> самостоятельно ставить и решать задачи стационарного и нестационарного теплообмена, применяя методы дифференциального и интегрального исчислений; получать расчетные формулы для различных процессов движения жидкости и газов в пористой среде; применять методы решения задач с фазовыми переходами.</p>	Отчеты по лабораторным работам, контрольные вопросы к лабораторным работам, вопросы к экзамену	Правильность и полнота выполнения лабораторных работ. Экзамен: правильность ответов на вопросы, ссылки на дополнительные источники при ответе. Правильность ответа на контрольные вопросы лабораторных работ.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

Тепломассоперенос в нефтегазовых и строительных технологиях: учебное пособие / А.Б. Шабаров, А.А. Кислицын, Б.В. Григорьев [и др.]; под ред. А.Б. Шабарова, А.А. Кислицына. — Тюмень: ТюмГУ, 2014. — 332 с. — ISBN 978-5-400-00979-2. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/109978> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.2. Дополнительная литература:

1. Шабаров, А.Б. Гидрогазодинамика: учебное пособие / А.Б. Шабаров. — 2-е, перераб. — Тюмень: ТюмГУ, 2013. — 460 с. — ISBN 978-5-400-00795-8. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/109977> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Теплофизика. Тепломассоперенос и теплотехника. Расчетно-экспериментальное исследование тепломассопереноса при нестационарных условиях: методические указания / У.Ю. Шастунова, М.В. Берляков, А.С. Димитриев [и др.]. — Тюмень: ТюмГУ, 2016. — 48 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/109984> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.3. Интернет-ресурсы:

—

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

eLIBRARY— научная библиотека (г. Москва). — <http://elibrary.ru> (дата обращения: 05.05.2021).

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:

Microsoft Office, Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций требуется мультимедийная аудитория, оснащенная учебной мебелью, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием, ПК и аудиторной доской.

Для проведения лабораторных занятий требуется учебная лаборатория, оснащенная стендом изучения процессов конвекции, теплопроводности изучения методом имитационного моделирования, ПК.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


_____ С.А. Креков
23.06.2021

ТЕПЛООБМЕН СЛОЖНЫХ СИСТЕМ
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль: Фундаментальная физика
форма обучения очная

Шастунова Ульяна Юрьевна. Теплообмен сложных систем. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Шастунова У.Ю., 2021.

1. Пояснительная записка

Цель дисциплины «Теплообмен сложных систем» заключается в том, чтобы научить студентов квалифицированно решать различные задачи, связанные с теплофизикой в нефтяной и газовой отраслях, жилищно-коммунальном хозяйстве, экспериментальной теплофизикой. Эти задачи будут возникать в его дальнейшей работе, как в процессе обучения, при выполнении квалификационной выпускной работы, так и при работе по специальности после окончания вуза.

Задачи дисциплины:

- изучение нестационарных задач сложных систем, например, резервуарного комплекса, жилого дома и т.д.;
- изучение системы сбора, подготовки и транспортировки жидких углеводородов;
- изучение системы сбора, подготовки и транспортировки газа;
- изучение технологических схем и оборудования, применяемое в нефтяной и газовой промышленности

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в блок Б1 Дисциплины (модули), часть, формируемая участниками образовательных отношений, и относится к дисциплинам по выбору.

При изучении дисциплины используются знания и умения, полученные студентами в предшествующих курсах: «Молекулярная физика», «Математический анализ», «Механика», «Теплофизика».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевые/функциональные)
ПК-3: способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок.	–	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> – методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах; – основы нестационарного теплообмена; – начальные и граничные условия и безразмерные комплексы подобия для задач нестационарной теплопроводности; – явную и неявную схему численного решения задач нестационарной теплопроводности; – основы теплофизики, воздухообмена, влагообмена в строительных технологиях; – конструктивные схемы и основы методов гидравлического и теплотехнического расчёта магистральных нефтепроводов, метод расстановки насосных станций; – конструктивные схемы и основы методов гидравлического и теплотехнического расчёта резервуаров нефтебаз; – конструктивные схемы и основы методов гидравлического и теплотехнического расчёта магистральных газопроводов, метод расстановки компрессорных станций и аппаратов воздушного охлаждения; – конструктивные схемы подземных хранилищ газа.

		<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – пользоваться прикладными методами расчета физико-математических моделей; – решать задачи нестационарной теплопроводности с разными начальными и граничными условиями; – проводить теплотехнические расчёты отдельных частей наружных помещений при работе в стационарном и нестационарном тепловых режимах; – давать рекомендации по изменению ограждающих конструкций с целью уменьшения теплотерь зданий, нормализации воздухообмена и влагообмена внутри них; – выполнять гидравлический и теплоотехнический расчёт магистральных нефтепроводов, выполнять расстановку насосных станций; – выполнять гидравлический и теплоотехнический расчёт магистральных газопроводов, выполнять расстановку компрессорных станций и аппаратов воздушного охлаждения; – выполнять расчёт теплового режима резервуара с нефтепродуктами.
--	--	--

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы	Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
		6 семестр
Общий объем зач. ед. час	5	5
	180	180
Из них:		
Часы контактной работы (всего):	122	122
Лекции	34	34
Практические занятия	-	-
Лабораторные / практические занятия по подгруппам	68	68
Консультации и иная контактная работа	20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося	58	58
Вид промежуточной аттестации		экзамен

3. Система оценивания

3.1. На учебных занятиях оценивается работа студентов на лекциях (0-1 балл за занятие) и работа в аудитории на практических занятиях (0-5 баллов за занятие), проектные задания (0-15 баллов), коллоквиум (0-10 баллов).

В рамках дисциплины необходимо выполнить проект. Под проектными заданиями необходимо понимать выполнение студентов заданий по следующим темам:

1. разработка компьютерной программы по расчету теплового поля;
2. тепловой расчет жилого дома;
3. расчет падения температуры в трубопроводе (газо- или нефтепровода) или падение температуры в резервуаре.

Проект является заданием практической направленности и выполняется студентом самостоятельно, согласно методическим рекомендациям. Сданным проектом является отчет, оформленный согласно правилам технической документации (СНиП).

Проект оценивается в 15 баллов.

Вопросы к коллоквиуму составляется из пройденных лекционных тем. В билете содержится 2 вопроса. После получения билета в течение 30-40 минут студенты пишут письменный ответ на билет. Отметка выставляется после личной беседы с преподавателем.

Коллоквиум оценивается в 10 баллов.

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – экзамен. Обязательным условием сдачи экзамена является сдача всех проектов, запланированных в учебной дисциплине.

Предусматривается выставление положительной оценки за экзамен автоматом при наборе определенного количества баллов:

"удовлетворительно" – не менее 65 баллов;

"хорошо" – не менее 81 балла.

Отметка "отлично" может выставляться только по итогам экзамена.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Нестационарная теплопроводность	16	4	–	8	1
2.	Численные методы нестационарной теплопроводности	10	6	–	–	1
3.	Физико-математическое моделирование уравнения теплопроводности	14	–	–	8	2
4.	Теплообмен жилого дома	16	12	–	–	1
5.	Теплопередача и тепловой баланс в помещении	14	–	–	8	2
6.	Нестационарные тепловые режимы	14	–	–	8	2
7.	Расчёт теплового режима жилого здания	14	–	–	8	2
8.	Теплообмен в системах подготовки, транспорта и хранения нефти и газа	18	12	–	–	1

9.	Сбор и подготовка нефти	10	–	–	4	1
10.	Сбор и подготовка газа	10	–	–	4	1
11.	Магистральные нефтепроводы	10	–	–	6	1
12.	Магистральные газопроводы	10	–	–	6	1
13.	Режимы работы магистральных газопроводов	10	–	–	4	1
14.	Расчёт теплового режима резервуара	12	–	–	4	1
15.	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	180	34	0	68	20

4.2. Содержание дисциплины по темам

Тема 1. Нестационарная теплопроводность

Нестационарные задачи теплопроводности. Решение уравнения теплопроводности в нестационарном случае (для трех краевых задач). Полубесконечное пространство с заданными начальной температурой и температурой поверхности.

Начальные и граничные условия для уравнения теплопроводности.

Краевые условия и типы краевых задач: задача Коши, смешанная задача, стационарная задача. Граничные условия 1, 2, 3, 4-го рода. Основные методы решения задач теплопроводности: метод разделения переменных однородных задач теплопроводности (метод Фурье).

Безразмерные параметры теплопереноса. Число Фурье. Число Пекле. Число Нуссельта. Число Рейнольдса. Число Прандтля. Число Грасгофа и Рэлея.

Решение задач по нестационарной теплопроводности (теория подобия).

Тема 2. Численные методы нестационарной теплопроводности

На лекции будет произведен разбор основных методов (например, прогонки и др.) при решении уравнения теплопроводности при нестационарном режиме.

Введено понятие явной и неявной схемы.

Рассмотрено как дифференциальное уравнение преобразуется в алгебраическое для удобства моделировать изучаемый процесс.

Тема 3. Физико-математическое моделирование уравнения теплопроводности

Физико-математическое моделирование уравнения теплопроводности (по вариантам):

- плоский объект;
- цилиндрическая стенка;
- сферическая стенка;
- сложные формы.

Тема 4. Теплообмен жилого дома

Предмет строительной теплофизики. Теплофизика в строительных технологиях. Понятие теплового, воздушного и влажностного режима здания. Процессы тепло-, воздухо- и влагообмена. Климатические условия. Энергосбережение. Строительные нормы и правила, строительная теплотехника.

Теплотехнические свойства строительных материалов, измерительные устройства.

Пористость, плотность, влажность, теплопроводность, теплоемкость, тепловое излучение. Фильтрационные характеристики материалов. Датчики, измерительные

устройства, приборы, применяемые для измерения характеристик теплового, воздушного и влажностного режима.

Теплопередача и тепловой баланс в помещении при стационарном тепловом потоке.

Стационарная теплопередача через ограждение. Одномерное, двумерное и трехмерное температурные поля. Теплопередача через ограждение с герметичной и вентилируемой прослойкой.

Конвективный теплообмен в помещении. Лучистый теплообмен в помещении. Струйный теплообмен в помещении.

Уравнение теплового баланса в помещении. Микроклимат помещения. Условия и степень комфортности в помещении.

Нестационарные тепловые режимы. Нестационарная теплопередача через ограждения. Численные методы расчета нестационарных температурных полей в ограждающих конструкциях и помещениях.

Теплоустойчивость ограждения. Затухание температурных колебаний в ограждении. Теплоустойчивость помещения. Уравнение энергии при нестационарном режиме в помещении.

Воздушный режим здания. Воздухопроницаемость конструкций зданий. Уравнения и характеристики процесса воздухопроницаемости. Теплопередача через ограждение при фильтрации воздуха. Теплопередача при фильтрации воздуха через массив и стык конструкций.

Теплотехнические особенности отдельных частей наружных помещений.

Наружные углы стен. Карнизные углы. Цокольные углы. Стыки наружных стеновых панелей. Теплопроводные включения. Оконные проемы.

Нестационарные тепловые режимы. Нестационарная теплопередача через ограждения. Численные методы расчета нестационарных температурных полей в ограждающих конструкциях и помещениях.

Теплоустойчивость ограждения. Затухание температурных колебаний в ограждении. Теплоустойчивость помещения. Уравнение энергии при нестационарном режиме в помещении.

Воздушный режим здания. Воздухопроницаемость конструкций зданий. Уравнения и характеристики процесса воздухопроницаемости. Теплопередача через ограждение при фильтрации воздуха. Теплопередача при фильтрации воздуха через массив и стык конструкций.

Теплотехнические особенности отдельных частей наружных помещений. Наружные углы стен. Карнизные углы. Цокольные углы. Стыки наружных стеновых панелей. Теплопроводные включения. Оконные проемы.

Тема 5. Теплопередача и тепловой баланс в помещении

Теплотехнические свойства строительных материалов, измерительные устройства.

Определение теплового баланса в помещении.

Теплопередача и тепловой баланс в помещении при стационарном тепловом потоке.

Расчет стационарного теплового потока через плоское, цилиндрическое ограждение, ограждение с воздушной прослойкой.

Тема 6. Нестационарные тепловые режимы

Нестационарные тепловые режимы. Расчет нестационарного теплового потока через ограждения.

Воздушный режим здания. Определение показателей теплоусвоения и теплопоглощения помещения

Теплотехнические особенности отдельных частей наружных помещений. Теплотехнический расчет отдельных частей наружных помещений

Тема 7. Расчет теплового режима жилого здания

Расчет жилого дома.

Тема 8. Теплообмен в системах подготовки, транспорта и хранения нефти и газа

Общие сведения о газонефтепроводах. Конструктивные схемы их прокладки. Современное состояние и перспективы развития нефтяной промышленности в мире и в России. Современное состояние и перспективы развития газовой промышленности в мире и в России. Магистральные нефтепроводы. Основные объекты нефтепровода и их назначение. Магистральные газопроводы. Основные объекты газопровода и их назначение. Общие сведения о магистральных трубопроводах (классификация, конструктивные схемы, категорийность). Конструктивные схемы прокладки трубопроводов и области их применения.

Магистральные нефтепроводы (МН). Состав сооружений МН, технологическая схема нефтеперекачивающей станции (НПС), определение числа НПС по трассе МН и их расстановка. Совместная работа НПС и линейной части МН.

Магистральные газопроводы (МГ). Состав сооружений МГ, технологическая схема компрессорной станции (КС), определение числа КС и расстановка их по трассе МГ, регулирование работы МГ и КС.

Режимы работы МГ. Влияние внешних факторов (грунт, окружающая среда, режим работы силового и охлаждающего оборудования). Необходимость охлаждения газа, оптимизация работы аппаратов воздушного охлаждения. Неравномерность режима работы, сглаживание неравномерности.

Нефтебазы. Классификация нефтебаз. Состав основных сооружений, основное оборудование, технологическая схема и генеральный план. Виды операций с жидкими углеводородами. Большие и малые «дыхания» резервуаров.

Хранение и распределение газа. Виды газохранилищ, понятие о подземных хранилищах (ПХГ), хранение газа в жидком и твердом состояниях. Транспорт сжиженных газов и газогидратов. Газораспределительные сети, станции и пункты. Оборудование для газораспределительных систем.

Оборудование насосных станций. Насосные станции магистральных нефтепроводов. Классификация нефтеперекачивающих станций магистральных нефтепроводов, их назначение, состав основных технологических объектов. Основные образования НС магистральных нефтепроводов. Технологические схемы ГНПС и промежуточных нефтеперекачивающих станций.

Оборудование резервуарных парков.

Тема 9. Сбор и подготовка нефти

Изучить технологическую схему и основные параметры работы установки подготовки нефти, систему контроля и регулирования параметров работы. Просмотреть видеофильм о системе сбора нефти.

Тема 10. Сбор и подготовка газа

Изучить технологическую схему и основные параметры работы установки комплексной подготовки газа, изучить чертежи комплектующего оборудования.

Тема 11. Магистральные нефтепроводы

Изучить порядок технологического расчета МН, выполнить расчет с подбором насосных агрегатов. Выбрать профиль трассы и произвести расстановку НПС. Просмотреть видеофильм о работе нефтепровода.

Тема 12. Магистральные газопроводы

Изучить порядок технологического расчета МГ, выполнить расчет с подбором газотурбинных агрегатов и нагнетателей, произвести проверку расчета с помощью имеющейся компьютерной программы. Произвести оценку загрузки вспомогательного оборудования.

Тема 13. Режимы работы магистральных газопроводов

Произвести расчет температурного режима газопровода на участке между КС, рассчитать необходимое количество АВО, произвести оптимизационный расчет числа включенных вентиляторов.

Тема 14. Расчет теплового режима резервуара

Изучение методики расчета теплового режима резервуарного парка.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1	Нестационарная теплопроводность	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
2	Численные методы нестационарной теплопроводности	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания.
3	Физико-математическое моделирование уравнения теплопроводности	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
4	Теплообмен жилого дома	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания.
5	Теплопередача и тепловой баланс в помещении	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
6	Нестационарные тепловые режимы	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
7	Расчёт теплового режима жилого здания	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
8	Теплообмен в системах подготовки, транспорта и хранения нефти и газа	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания.
9	Сбор и подготовка нефти	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
10	Сбор и подготовка газа	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
11	Магистральные нефтепроводы	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.

12	Магистральные газопроводы	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
13	Режимы работы магистральных газопроводов	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.
14	Расчёт теплового режима резервуара	1. Работа с основной и дополнительной литературой. 2. Выполнение проектного задания. 3. Проработка лекций.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устной форме. Обязательным условием сдачи экзамена является сдача всех проектов, запланированных в учебной дисциплине, а именно:

1. разработка компьютерной программы по расчету теплового поля;
2. тепловой расчет жилого дома;
3. расчет падения температуры в трубопроводе (газо- или нефтепровода) или падение температуры в резервуаре.

Экзаменационный билет состоит из двух вопросов, по одному из каждого модуля («Строительная теплофизика», «Техника и технологии добычи, подготовки, транспортировки углеводородов»).

Отметка выставляется после беседы с преподавателем, в которой преподаватель уточняет полноту знаний учащегося.

Студент, не посещавший 50% практических занятий, к экзамену не допускается. В ведомость автоматически проставляется "неудовлетворительно".

Примерные вопросы для самостоятельной подготовки к экзамену по дисциплине:

Модуль 1 «Строительная теплофизика»:

1. Теплотехнические свойства строительных материалов.
2. Уравнения стационарной теплопередачи через ограждения.
3. Граничные условия тепломассопередачи в ограждениях.
4. Температурные поля в ограждающих конструкциях.
5. Теплопередача через ограждения с вентилируемой прослойкой.
6. Конвективный теплообмен в помещении.
7. Лучистый теплообмен в помещении.
8. Струйный теплообмен в помещении.
9. Уравнение теплового баланса в помещении.
10. Микроклимат помещения.
11. Условия и степень комфортности в помещении.
12. Нестационарная теплопередача через ограждения.
13. Численные методы расчета стационарных температурных полей в ограждениях.
14. Численные методы расчета температурных полей в помещениях.
15. Теплоустойчивость ограждения.
16. Затухание температурных колебаний в ограждении.
17. Теплоустойчивость помещения.
18. Воздухопроницаемость ограждений.
19. Теплопередача через ограждения при фильтрации воздуха.
20. Теплотехнические особенности частей наружных ограждений зданий.
21. Влажный воздух.
22. Конденсация влаги на поверхности ограждения.

23. Сорбция. Изотерма сорбции строительных материалов.
24. Десорбция. Изотерма десорбции строительных материалов.
25. Паропроницаемость.
26. Расчет влажностного режима при диффузии пара.
27. Перемещение жидкой влаги в ограждении.
28. Сверхсорбционное увлажнение.
29. Сорбционное увлажнение при наличии фильтрации воздуха.
30. Нестационарная влагопередача при наличии фильтрации воздуха.
31. Стабилизация влажностного процесса в ограждающих конструкциях.

Модуль 2 «Техника и технологии добычи, подготовки, транспортировки углеводородов»:

1. Состав сооружений магистрального нефтепровода.
2. Состав сооружений магистрального газопровода.
3. Образование и разрушение нефтяных эмульсий.
4. Пропускная способность участка магистрального газопровода.
5. Построение плана и профиля трассы МН, гидравлический уклон.
6. Определение мощности ГПА.
7. Методы разрушения нефтяных эмульсий.
8. Среднее давление на участке газопровода.
9. Схема установки подготовки нефти к транспортировке.
10. Изменение температуры на участке газопровода.
11. Методика расчета магистрального нефтепровода.
12. Состав сооружений магистрального газопровода.
13. Последовательное и параллельное соединение насосов.
14. Степень сжатия компрессорной станции.
15. Методы регулирования производительности насосов.
16. Коэффициент гидравлического сопротивления газопровода.
17. Совмещенная характеристика НПС и МН.
18. Подготовка газа к транспортировке.
19. Расстановка НПС по трассе МН.
20. Нефтебазы: генеральный план, виды проводимых операций.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ПК-3: способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.):</p> <p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> – методы измерений и исследований, основанные на различных физических эффектах; – основы нестационарного теплообмена; – основы теплофизики, воздухообмена, влагообмена в строительных технологиях. 	Работа на контактных занятиях, выполнение проектов, коллоквиум, экзамен	Правильность решения практических заданий (задач), заданных на дом и индивидуально. Правильность решения практических заданий (задач) на промежуточных

		<p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> – пользоваться прикладными методами расчета физико-математических моделей. – решать задачи нестационарной теплопроводности с разными начальными и граничными условиями; – проводить теплотехнические расчёты отдельных частей наружных помещений при работе в стационарном и нестационарном тепловых режимах. <p style="text-align: center;">Базовый уровень (хор.):</p> <p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> – начальные и граничные условия и безразмерные комплексы подобия для задач нестационарной теплопроводности; – давать рекомендации по изменению ограждающих конструкций с целью уменьшения теплотерь зданий, нормализации воздухообмена и влагообмена внутри них; – конструктивные схемы и основы методов гидравлического и теплотехнического расчёта магистральных нефтепроводов, метод расстановки насосных станций; – конструктивные схемы и основы методов гидравлического и теплотехнического расчёта резервуаров нефтебаз. <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> – давать рекомендации по изменению ограждающих конструкций с целью уменьшения теплотерь зданий, нормализации воздухообмена и влагообмена внутри них; – выполнять гидравлический и теплоотехнический расчёт магистральных нефтепроводов, выполнять расстановку насосных станций. <p style="text-align: center;">Повышенный уровень (отл.):</p> <p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> – явную и неявную схему численного решения задач нестационарной теплопроводности; – конструктивные схемы и основы методов гидравлического и теплотехнического расчёта магистраль- 	<p>аттестациях</p> <p>Проекты:</p> <p>интенсивность и авторитетность использования дополнительных источников при подготовке, полнота и правильность проведения расчётов, ответов на дополнительные вопросы одногруппников и преподавателя.</p> <p>Экзамен: правильность ответов на вопросы, ссылки на дополнительные источники при ответе.</p>
--	--	---	--

		<p>ных газопроводов, метод расстановки компрессорных станций и аппаратов воздушного охлаждения;</p> <p>– конструктивные схемы подземных хранилищ газа.</p> <p>Умеет:</p> <p>– выполнять гидравлический и теплоотехнический расчёт магистральных газопроводов, выполнять расстановку компрессорных станций и аппаратов воздушного охлаждения;</p> <p>– выполнять расчёт теплового режима резервуара с нефтепродуктами.</p>		
--	--	--	--	--

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

Кудинов, А.А. Строительная теплофизика: учебное пособие / А.А. Кудинов. — Москва: ИНФРА-М, 2019. — 262 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — ISBN 978-5-16-005158-1. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/1002061> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: по подписке.

7.2. Дополнительная литература:

Линник, Ю.Н. Технологические основы добычи и переработки топливно-энергетических ресурсов: учебник / Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник, В.Б. Воронцов; под общ. ред. Ю.Н. Линника. — Москва: ИНФРА-М, 2020. — 457 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — ISBN 978-5-16-015474-9. — Текст: электронный. — URL: <https://znanium.com/catalog/product/1035676> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: по подписке.

7.3. Интернет-ресурсы:

—

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

eLIBRARY – научная библиотека (г. Москва). – <http://elibrary.ru>

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:

платформа для электронного обучения Microsoft Teams, офисный пакет Microsoft Office.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекционных занятий необходима мультимедийная учебная аудитория, оснащенная учебной мебелью, доской аудиторной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием и персональным компьютером с проводным подключением к локальной сети и сети Интернет.

Для проведения практических занятий по подгруппам необходима учебная аудитория, оснащенная учебной мебелью и большой аудиторной доской (маркерной или меловой).

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора ФТИ

С.А. Креков
23.06.2021

ФИЗИКА НЕФТЯНОГО И ГАЗОВОГО ПЛАСТА 1
Рабочая программа
для обучающихся по направлению подготовки (специальности)
03.03.02 Физика
Направленность (профиль): Фундаментальная физика
очная форма обучения

Кадочникова Л. М., Вольф А. А. Физика нефтяного и газового пласта 1. Рабочая программа для обучающихся по направлению подготовки (специальности) 03.03.02 Физика: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины (модуля) опубликована на сайте ТюмГУ: Физика нефтяного и газового пласта 1 [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

Рабочая программа дисциплины (модуля) включает следующие разделы:

1. Пояснительная записка

Актуальность: Для решения задач эффективной разработки месторождений УВ необходимы знания свойств горных пород, их взаимодействия с углеводородами различного фазового состояния, процессов фильтрации углеводородов и воды в пористых средах, оптимальных условий извлечения углеводородов. Дисциплина «Физика нефтяного и газового пласта 1» помогает ориентироваться в закономерностях поведения системы порода–углеводороды, предвидеть возможные отклонения ее поведения в реальной природной обстановке и предлагать оптимальные решения для повышения эффективности разработки месторождений.

Цель: дать представление о физической основе нефтяных газовых и газоконденсатных резервуаров и о закономерностях вытеснения углеводородных жидкостей при разработке месторождений, о нефтеотдаче пластов.

Задачи: изучить вопросы, касающиеся физики процессов движения флюидов в пластах коллекторах и принципов вытеснения нефти и газа на основе естественных и искусственных систем поддержания пластового давления. изучить молекулярно-поверхностные явления в пластах - коллекторах, закономерности проявления поверхностных сил при взаимодействии закачиваемых агентов (воды, газа) для вытеснения нефти и газа.

Результатом обучения является формирование у студентов представлений о физике нефтяного и газового пластов.

Курс состоит из трех частей:

1. Основы петрофизики. Лабораторные исследования керна и флюидов
2. Гидродинамические исследования скважин
3. Моделирование процессов фильтрации в пористых средах. Система уравнений фильтрации. Уравнения материального баланса.

Дисциплина «Физика нефтяного и газового пласта 1» формирует у студентов представление о круге современных задач, решаемых при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, а также о методах их решения. Сложность математических моделей фильтрации нефти в неоднородных пластах, а также значительный объем геологической и промысловой информации предопределяет использование современных вычислительных методов и информационных технологий при решении поставленных задач. При изучении дисциплины студент знакомится с этапами построения гидродинамической модели месторождения и практическим моделированием процессов фильтрации в нефтяном пласте на современных гидродинамических симуляторах.

Решение практических задач формирует у студентов навыки построения математических моделей месторождений и анализа полученных решений. При этом непосредственно используются современные технологии трехмерной визуализации строения пласта и потоков жидкости. Чтение курса предполагает использование мультимедийных средств обучения для демонстрации геологических карт, диаграмм состояния флюидов, перетоков жидкости. Особенно эффективны средства мультимедиа для демонстрации потоков в режиме анимации. Обучение на практических занятиях строится на основе использования специализированных программ гидродинамического моделирования (Eclips, More и т.п.). Практические задания представляют собой мини-проекты, требующие той или иной корректировки, либо создаваемые студентом самостоятельно.

1.1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в блок Б1 Дисциплины, дисциплина по выбору, изучается в 6 семестре.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины «Физика нефтяного и газового пласта 1» необходимы для подготовки и написания выпускной квалификационной работы.

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины (модуля)

В результате освоения дисциплины обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения: (знаниевые/функциональные)
ПК-3. Способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок.	-	Знает – специализированные разделы физики; – проблематику отрасли, на которой специализируется образовательная программа.
		Умеет – выделять и ставить задачи, решаемые в рамках доступных приближений и ресурсов; – пользоваться прикладными методами расчета физико-математических моделей.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 1

Вид учебной работы		Всего часов	Часов в семестре
			6
Общая трудоемкость	зач. ед.	5	5
	час	180	180
Из них:			
Часы аудиторной работы (всего):		180	180
Лекции		34	34
Практические занятия		0	0
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		58	58
Вид промежуточной аттестации (зачет, диф. зачет, экзамен)			Экзамен

3. Система оценивания

6 семестр:

Экзамен по дисциплине.

Экзамен проводится в устно-письменной форме. Экзамен включает письменную часть – ответ по экзаменационному билету. В билете 2 вопроса и задача. При получении в ходе текущего контроля среднего балла больше или равного 61 студент освобождается от решения задачи. Устная часть экзамена оценивает полученные знания по дисциплине путем собеседования с преподавателем.

При текущем контроле учитывается несколько видов деятельности обучающихся:

- активность на семинарах (0 – 30 баллов);
- выполнение домашних заданий (0 – 35 балл);
- контрольные работы (0 – 35 балла);

Активность на семинаре включает в себя решение задач у доски, участие в решении задачи «с места», решение задач опережающими темпами и т.д.

Выполнение домашних заданий подразумевает проверку в начале занятия наличия выполненных заданий.

В случае, если сумма баллов составляет не менее 61, и студент согласен с итоговой оценкой, ему выставляется оценка согласно шкале перевода:

- от 61 до 75 баллов – «удовлетворительно»;
- от 76 до 90 баллов – «хорошо»;
- от 91 до 100 баллов – «отлично».

В случае, если студент набрал менее 61 балла или не согласен с итоговой оценкой, ему предоставляется право сдавать экзамен, и оценка выставляется непосредственно по результатам экзамена.

4. Содержание дисциплины**4.1. Тематический план дисциплины**

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины (модуля), час.				Консультации и иная контактная работа
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1	Введение в ФНГП. Основные понятия и определения.	8	2	0	0	0
2	Фильтрационно-емкостные свойства горных пород 1	10	2	0	4	2

3	Фильтрационно-емкостные свойства горных пород	8	0	0	4	0
4	Фильтрационно-емкостные свойства горных пород 2	10	4	0	4	2
5	Анализ лабораторных исследований по определению проницаемости	8	0	0	4	0
6	Упругие свойства горных пород	10	4	0	4	2
7	Анализ лабораторных исследований по определению сжимаемости	8	0	0	4	0
8	Физико-химические свойства флюидов	10	4	0	4	2
9	Анализ свойств флюидов	10	0	0	4	0
10	Капиллярное давление. Насыщенность пористой среды	10	4	0	4	2
11	Анализ капилляриметрических исследований	10	0	0	4	0
12	Гидродинамические исследования скважин	10	4	0	4	2
13	Гидродинамические	8	0	0	4	0

	исследования скважин					
14	Система уравнений фильтрации.	10	4	0	4	2
15	Система уравнений фильтрации.	10	4	0	4	0
16	Система уравнений фильтрации	10	0	0	4	2
17	Система уравнений фильтрации	8	0	0	4	0
18	Уравнение материального баланса	10	2	0	2	2
19	Уравнение материального баланса	10	0	0	2	0
	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	180	34	0	68	20

4.2. Содержание дисциплины (модуля) по темам **Семестр 6**

1. Введение в ФНГП. Основные понятия и определения.
Понятие о залежах нефти и газа. Основные свойства пористой среды. Свойства пластовых флюидов.
2. Фильтрационно-емкостные свойства горных пород 1
Определение пористости горных пород. Лабораторные эксперименты по определению пористости. Погрешности определений.
3. Фильтрационно-емкостные свойства горных пород
Анализ лабораторных исследований по определению пористости.
4. Фильтрационно-емкостные свойства горных пород 2
Проницаемость горных пород. Абсолютная, фазовая, эффективная, относительная фазовая проницаемость. Методы определения проницаемости.
5. Анализ лабораторных исследований по определению проницаемости
Методики обработки результатов лабораторных экспериментов.
6. Упругие свойства горных пород
Сжимаемость горных пород. Методы определения сжимаемости.
7. Анализ лабораторных исследований по определению сжимаемости
Анализ результатов лабораторных исследований по определению сжимаемости горных пород

8. Физико-химические свойства флюидов

Виды пластовых флюидов. Физические свойства нефтей. Свойства природных газов. Физические свойства пластовых вод.

9. Анализ свойств флюидов

Методики обработки лабораторных исследований физико-химических свойств пластовых флюидов.

10. Капиллярное давление. Насыщенность пористой среды

Определение капиллярного давления. Методы определения капиллярного давления. Определение насыщенности пористой среды. Понятие о водонефтяном, газонефтяном контактах, зеркале чистой воды.

11. Анализ капилляриметрических исследований

Методики анализа результатов лабораторных исследований кривых капиллярного давления.

12. Гидродинамические исследования скважин

Виды ГДИ. Методики интерпретации промысловых исследований.

13. Гидродинамические исследования скважин

Интерпретация результатов КВД методами касательных и Хорнера.

14. Система уравнений фильтрации.

Основные уравнения фильтрации флюидов в пористой среде. Однофазный и многофазный случаи.

15. Система уравнений фильтрации.

Начальные и граничные условия.

16. Система уравнений фильтрации.

Методы решения системы уравнений фильтрации.

17. Система уравнений фильтрации

Решение для скважины, работающей с постоянным дебитом в бесконечном пласте, в случае плоскорадиального притока.

18. Уравнение материального баланса

Уравнение материального баланса в общей постановке. Понятие акьюфера.

19. Уравнение материального баланса

Практические примеры использования уравнения материального баланса

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ Темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
	6 семестр	
1	Введение в ФНПП. Основные понятия и определения.	Чтение обязательной и дополнительной литературы
2	Фильтрационно-емкостные свойства горных пород 1	Чтение обязательной и дополнительной литературы
3	Фильтрационно-емкостные свойства горных пород	Проработка лекций
4	Фильтрационно-емкостные свойства горных пород 2	Чтение обязательной и дополнительной литературы
5	Анализ лабораторных исследований по определению проницаемости	Проработка лекций
6	Упругие свойства горных пород	Чтение обязательной и дополнительной литературы
7	Анализ лабораторных исследований по определению сжимаемости	Проработка лекций

8	Физико-химические свойства флюидов	Чтение обязательной и дополнительной литературы
9	Анализ свойств флюидов	Проработка лекций
10	Капиллярное давление. Насыщенность пористой среды	Чтение обязательной и дополнительной литературы
11	Анализ капилляриметрических исследований	Проработка лекций
12	Гидродинамические исследования скважин	Чтение обязательной и дополнительной литературы
13	Гидродинамические исследования скважин	Проработка лекций
14	Система уравнений фильтрации.	Чтение обязательной и дополнительной литературы
15	Система уравнений фильтрации.	Чтение обязательной и дополнительной литературы
16	Система уравнений фильтрации	Проработка лекций
17	Система уравнений фильтрации	Проработка лекций
18	Уравнение материального баланса	Чтение обязательной и дополнительной литературы
19	Уравнение материального баланса	Проработка лекций

6. Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю)

6 семестр:

Экзаменационную оценку возможно получить автоматически, при условии, что:

- количество баллов, полученных в течение семестра, составляет 61% от максимально возможного при усвоении дисциплины – оценка "удовлетворительно";
- количество баллов, полученных в течение семестра, составляет 76% от максимально возможного при усвоении дисциплины – оценка "хорошо".

Если студент желает повысить оценку или претендует на оценку "отлично", то он сдает экзамен в устной форме.

Экзаменационный билет, содержит 2 теоретических вопроса и задачу.

Ответы на экзаменационный билет оцениваются по следующим критериям:

- "отлично" - студент дал полный ответ на теоретические вопросы, правильно решил задачу, продемонстрировал взаимосвязь теоретических основ оптических явлений и практики;
- "хорошо" - студент показал систематические знания по дисциплине, способность применять их для решения практических задач, но имеются недочеты в ответах и решениях;
- "удовлетворительно" - студент имеет представления об основных оптических явлениях и законах, однако недостаточно владеет теоретическим материалом, в ответах и решениях допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;
- "неудовлетворительно" - студент не имеет систематических знаний в области оптики, слабо разбирается в теоретических и практических вопросах, допускает принципиальные ошибки в ответах и решениях.

Обязательным условием сдачи экзамена на "отлично" является написание контрольных работ по дисциплине на 90% (или более) баллов.

6.1 Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

6 семестр

Примерные вопросы к экзамену

1. Как определяются параметр пористости в лабораторных условиях?
2. Как определяется относительная фазовая проницаемость?
3. Как по графику определить концевые точки ОФП?
4. Зачем проводится нормирование ОФП?
5. Как перевести результаты лабораторных исследований капиллярного давления к условиям пласта?
6. Зачем используется J-функция?
7. Как через капиллярное давление пересчитать насыщенность пласта?
8. Чем отличаются глубинные и поверхностные пробы флюидов?
9. Что такое давление насыщения?
10. Как по фазовым диаграммам определить тип пластового флюида?
11. Чем отличается водонефтяной контакт от зеркала чистой воды?
12. В чем отличие капиллярной и электрической модели насыщенности?
13. Каковы основные цели проведения гидродинамических исследований скважин?
14. Как по ГДИС определить свойства пласта?
15. Как приближенно оценить сжимаемость газа c_g в газовых скважинах?
16. Для каких задач используется метод материального баланса?
17. Какие уравнения и законы включает основная система уравнений фильтрации?

Примерные задачи для контрольной работы/экзамена

1. Вычислите абсолютную пористость образца массой 5,467г. Известно, что масса запарафинизированного образца на воздухе составляет 5,9354 г, а в воде 3,004 г. Плотность парафина составляет 0,91г/см³. Исследование пористости велось при температуре 200С. Плотность минеральных зерен, определенная пикнометром, составляет 2,702г/см³.
2. Вычислите коэффициент нефтенасыщенности образца горной породы массой 100г по результатам экстрагирования и исследования в приборе Дина и Старка. Известно, что масса образца после экстрагирования составила 92г, а объем выделившийся из образца массой 50 г в ловушку АКОВ воды составил 2 см³. Плотность нефти при температуре исследования составляет 0,9, а воды 1 г/см³. Плотность породы с учетом пористости составляет 2 г/см³. Абсолютная пористость образца составляет 25%. Объемный коэффициент нефти принять 1,2.
3. Рассчитайте коэффициент нефте-, водо - и газонасыщенности образца керна весом 97,33 г по результатам исследования его в приборе ЗАКСА, если из него было получено 1,66 см³ воды, плотность породы составляет 2,4 г/см³, пористость 0,21. Масса экстрагированного образца составила 94 г. Объемный коэффициент нефти составляет 1,3, а воды 1,07. Плотность нефти принять 0,910, а плотность воды 1 г/см³.
4. Рассчитайте абсолютную проницаемость образца керна цилиндрической формы длиной 2,8 и диаметром 2,55 см. Исследование проводилось без противодействия на выходе образца, избыточное давление на входе в образец 103 мм рт. ст. Атмосферное давление составляет 756 мм .рт. ст. Объем воздуха, прошедшего за 3 мин через образец, составил 3,6 л по показаниям газового счетчика. Исследования проводились при температуре 20 0С, при которой вязкость воздуха составляет 0,0181 СПЗ.
5. Вычислите динамическую и кинематическую вязкость нефти, зная, что время ее истечения в вискозиметре ВПЖ-2 (диаметр капилляра 1,77 мм) составляет 25 с. Плотность нефти принять 0,820 г/см³. Постоянная вискозиметра составляет 0,9273.

6.2 Критерии оценивания компетенций:

Таблица 4

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1	ПК-3 Способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок.	<p>Пороговый (удовл.) Знает: основные понятия и законы, описывающие фазовое поведение индивидуальных веществ и многокомпонентных природных углеводородных систем; Умеет: разбираться в технологиях добычи нефти и газа</p> <p>Базовый (хор.) Знает: специализированные разделы физики; Умеет: пользоваться прикладными методами расчета физико-математических моделей.</p> <p>Повышенный (отл.) Знает: проблематику отрасли, на которой специализируется образовательная программа Умеет: выделять и ставить задачи, решаемые в рамках доступных приближений и ресурсов</p>	Контрольная работа	Полнота и правильность решения задач контрольной работ

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

7.1 Основная литература:

1. Физико-математическое моделирование: учебное пособие / А. Б. Шабаров [и др.]; рец.: В. Н. Антипов, Ю. Д. Земенков; Тюм. гос. ун-т, Ин-т физики и химии. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2014. — 2-Лицензионный договор №222/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/1/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/2/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/3/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/4/2016-03-02. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). — <URL:

[https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222\(1\)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf](https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222(1)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf)> (дата обращения: 29.05.2020).

2. Шадрина, А. В. Основы нефтегазового дела / А. В. Шадрина, В. Г. Крец. — 3-е изд. — Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Эр Медиа, 2019. — 213 с. — ISBN 978-5-4486-0516-1. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/79709.html> (дата обращения: 29.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7.2 Дополнительная литература:

1. Каневская, Р. Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов / Р. Д. Каневская. — Москва, Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. — 128 с. — ISBN 978-5-4344-0797-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/92049.html> (дата обращения: 29.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, Н. М. Дмитриев, Р. Д. Каневская, В. М. Максимов. — 2-е изд. — Москва, Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. — 488 с. — ISBN 978-5-4344-0605-5. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91980.html> (дата обращения: 29.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
3. Федоров, Константин Михайлович. Фильтрационные течения с физико-химическими превращениями в задачах нефтегазовой механики: учебное пособие / К. М. Федоров, Н. Г. Мусакаев, Татьяна Анатольевна Кремлева. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2017. — 2-Лицензионный договор № 572/2017-12-01. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). — <URL:https://library.utmn.ru/dl/PPS/Fedorov_Musakaev_Kremleva_572_UP_2017.pdf> (дата обращения: 29.05.2020).
4. Физико-математическое моделирование: учебное пособие / А. Б. Шабаров [и др.]; рец.: В. Н. Антипов, Ю. Д. Земенков; Тюм. гос. ун-т, Ин-т физики и химии. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2014. — 2-Лицензионный договор №222/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/1/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/2/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/3/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/4/2016-03-02. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). — <URL:[https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222\(1\)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf](https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222(1)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf)> (дата обращения: 29.05.2020).

7.3 Интернет-ресурсы:

1. Электронная библиотека Попечительского совета механико-математического факультета Московского государственного университета <http://lib.mexmat.ru>
2. eLIBRARY – Научная электронная библиотека (Москва) <http://elibrary.ru/>

7.4 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Не предусмотрено использование в данной дисциплине.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю):

Лицензионное ПО: необходим пакет программ Microsoft Office, необходимо наличие программного обеспечения tNavigator, в случае дистанционной формы обучения – Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

(указывается в соответствии с ФГОС ВО)

Лекционная аудитория с мультимедийным оборудованием, компьютерный класс для практических занятий.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


_____ С.А. Креков
23.06.2021

ФИЗИКА КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика
профиль: Фундаментальная физика
форма обучения очная

Шастунова У. Ю. Физика криогенных процессов. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Шастунова У.Ю., 2021.

1. Пояснительная записка

Целью дисциплины «Физика криогенных процессов» является формирование у студентов знаний по основам геокриологии, методам и средствам геокриологических исследований.

Задачи учебного курса:

- познакомить студентов со структурой и научными направлениями геокриологии;
- познакомить студентов с термодинамическими условиями развития мерзлых пород;
- познакомить студентов с теплофизическими процессами в промерзающих и оттаивающих породах;
- познакомить студентов с физическими и механическими свойствами мерзлых пород;
- познакомить студентов с проблемами освоения криолитозоны в связи с возможным глобальным потеплением климата.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в блок Б1 Дисциплины (модули), часть, формируемая участниками образовательных отношений, и относится к дисциплинам по выбору

Для успешного изучения дисциплины необходимы знания и умения, приобретенные в ходе изучения дисциплин «Молекулярная физика», «Математический анализ», «Механика», «Теплофизика»

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевые/функциональные)
ПК-3: способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок	—	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> – термодинамические условия развития мерзлых пород, – физические, теплофизические и механические процессы в мерзлых породах, – теплофизические и механические свойства мерзлых пород, – теплофизические закономерности сезонного и многолетнего промерзания и протаивания мерзлых пород с учетом геологических и географических условий
		<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – составить региональные и локальные тепловые балансы, – поставить и решить задачи о промерзании (протаивании) грунта, – определить теплообороты и глубину сезонного промерзания (протаивания) пород, – оценить пучение промерзающих и оттаивающих дисперсных пород

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы	Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
		7 семестр
Общий объем	зач. ед.	5
	час	180
Из них:		
Часы контактной работы (всего):	122	122
Лекции	34	34
Практические занятия	0	0
Лабораторные / практические занятия по подгруппам	68	68
Консультации и иная контактная работа	20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося	58	58
Вид промежуточной аттестации		Экзамен

3. Система оценивания

3.1. На учебных занятиях оценивается работа студентов в аудитории на практических занятиях (0-10 баллов за занятие). Под работой на практических занятиях подразумевается активная беседа с преподавателем, самостоятельное выполнение заданий, выданных преподавателем.

На одном учебном семинаре проходит защита рефератов (0-5 баллов). Студенты предлагается самостоятельно изучить одну из предложенных преподавателем тем и подготовить доклад с презентацией по изученной теме.

На заключительном практическом занятии проводится защита проекта (0-25 баллов). Студенту предлагается самостоятельно разработать компьютерную программу, с помощью которой изучается нестационарное температурное поле грунтов (мерзлого грунта, вечномерзлого грунта, грунта сезонного замерзания и протаивания и др.). На семинаре проходит демонстрация компьютерной программы и ее тестирование, определение ее возможностей.

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – экзамен. Предусматривается выставление экзамена автоматом при наборе определенного количества баллов:

"неудовлетворительно" – 50% пропусков учащегося на практических и лекционных занятиях;

"удовлетворительно" – не менее 65 баллов;

"хорошо" – не менее 81 балл.

Студентам, претендующим на отметку «отлично», необходимо обязательно сдавать экзамен.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Понятие о геокриологии	8	4	0	0	1
2.	Термодинамические условия развития мёрзлых пород	10	8	0	0	1
3.	Термодинамика и механика равновесия фаз воды в дисперсных системах	16	0	0	8	2
4.	Процессы режеляции	16	0	0	8	2
5.	Тепло- и массообмен в промерзающих и протаивающих горных породах	12	8	0	0	1
6.	Задача Стефана	16	0	0	8	2
7.	Миграционные процессы и теоретические модели льдонакопления в промерзающих дисперсных породах	22	0	0	14	2
8.	Физические и механические процессы в промерзающих, мёрзлых и протаивающих породах	12	6	0	0	1
9.	Баротермический эффект в мёрзлых дисперсных породах и температурный режим мёрзлых толщин	16	0	0	8	2
10.	Сезонное промерзание и протаивание горных пород. Основы рационального освоения территорий криолитозоны	12	8	0	0	1

11.	Обобщённая модель теплопереноса и деформирования промерзающих и оттаивающих пород при действии нагружения	22	0	0	14	2
12.	Механические свойства мёрзлых грунтов	16	0	0	8	1
13.	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	180	34	0	68	20

4.2. Содержание дисциплины по темам

Тема 1. Понятие о геокриологии

- Проблемная лекция.

Введение. Место геокриологии среди других наук. Краткий очерк истории изучения криолитозоны и слагающих ее пород. Подразделение мерзлых пород по продолжительности их существования. Глубина и сплошность промерзания пород по вертикали. Распространение мерзлых пород по площади. Южная и высотная границы распространения мерзлых толщ. Мерзлые горные породы – естественно-исторические геологические образования.

Тема 2. Термодинамические условия развития мерзлых пород

- Проблемная лекция.

Источники энергии, определяющие тепловое состояние земли. Излучение, поглощение и отражение лучистой энергии. Энергетический (тепловой) баланс Земли. Изменение прихода и расхода энергии в тепловом балансе земли и их влияние на климат. Региональные и локальные тепловые балансы. Температурное поле горных пород и его характеристика. Теплообмен и теплообороты.

Тема 3. Термодинамика и механика равновесия фаз воды в дисперсных системах

- Исследовательский семинар.

Краткий исторический очерк. Условия равновесия влаги в мёрзлых породах как результат искривления межфазной поверхности. Расклинивающее давление между поверхностями, разделенными жидкой прослойкой. Влияние поверхностных сил на растворимость веществ в жидкой прослойке. Общие условия равновесия фаз при действии расклинивающего давления. Равновесие фаз между плоскими поверхностями. Равновесие сферического зародыша льда в переохлажденной жидкости. Равновесие фаз вблизи искривленных поверхностей. Функция расклинивающего давления льда и плавление малых частиц. Функция расклинивающего давления минеральной поверхности. Вычисления кривой незамерзшей воды реальных пород. Условия фазового равновесия лед-пленка-пар. Баланс напряжений в компонентах дисперсной породы.

Тема 4. Процессы режеляции

- Исследовательский семинар.

Режеляционное движение твердых тел элементарной формы. Режеляционное движение льда сквозь модельный грунт. Эволюция жидких включений при учете деформаций льда. Замерзание пресного включения. Движение пресного включения в жестком льду. Замерзание и движение пресного включения. Перемещение соленого включения в жестком льду. Замерзание (плавление) на границах соленого включения. Замерзание (плавление) на границах и движение солёного включения. Изменение формы включения. О причинах блуждания

криопэггов. О способе получения пресной воды из больших массивов льда. Об изменении размеров воздушных включений по глубине Антарктического льда.

Тема 5. Тепло- и массообмен в промерзающих и протаивающих горных породах

- Проблемная лекция.

Теплофизические процессы в промерзающих и протаивающих породах. Законы Фурье. Постановка задачи о промерзании (протаивании) однородного грунта с образованием границы раздела фаз (задача Стефана). Постановка задачи о промерзании и протаивании пород в спектре температур (с образованием зоны промерзания). Решение классической задачи Стефана. Формула Стефана для определения глубины сезонного и многолетнего промерзания. Определение глубин сезонного и многолетнего промерзания (протаивания) пород по методу Л.С. Лейбензона. Приближенные формулы В.А. Кудрявцева для определения теплооборотов и глубин сезонного промерзания (протаивания) пород.

Тема 6. Задача Стефана

- Исследовательский семинар.

Расчет температурного поля грунта. Создание компьютерной программы.

Тема 7. Миграционные процессы и теоретические модели льдонакопления в промерзающих дисперсных породах

- Исследовательский семинар.

Развитие представлений о миграционных процессах и схемах их теоретического описания. Качественная картина и движущий механизм миграции. Теоретическое описание стационарного процесса миграции. Текстурирование в промерзающих грунтах. Качественная картина. Теоретическая модель образования слоистой текстуры в квазистационарной постановке. Процедура расчета. Экспериментальное определение параметров слоистой текстуры. Сравнение с результатами расчетов. Полная схема О'Нейла-Миллера. Сравнение результатов расчета с квазистационарным аналогом. Моделирование промерзания массива породы и общие закономерности льдонакопления.

- Защита рефератов в виде доклада с презентацией.

Примерные темы рефератов:

1. История изучения криолитозоны в Тюмени.
2. Южная граница распространения мерзлых толщ в УрФО.
3. Теплообмен и теплообороты на севере Тюменской области.
4. Методы решения задачи о промерзании и протаивании пород в спектре температур (с образованием зоны промерзания).
5. Методы решения задачи о промерзании и протаивании пород в спектре температур с миграцией влаги.
6. Опыт применения приближенных формул В.А. Кудрявцева для определения теплооборотов и глубин сезонного промерзания (протаивания) пород.
7. Теплофизические свойства горных пород Западной Сибири.
8. Механические свойства мерзлых пород Западной Сибири.
9. Типы сезонного промерзания и протаивания горных пород Тюменской области.
10. Рациональное использование мерзлых пород при освоении криолитозоны Западной Сибири.
11. Региональные преобразования природной среды при освоении крупных территорий криолитозоны севера Тюменской области.
12. Проблемы освоения криолитозоны в связи с возможным глобальным потеплением климата применительно к Тюменской области.

Тема 8. Физические и механические процессы в промерзающих, мерзлых и протаивающих породах

- Проблемная лекция.

Температурные деформации льда и дисперсных мерзлых пород. Теплофизические свойства горных пород. Механические свойства мерзлых пород.

Тема 9. Баротермический эффект в мерзлых дисперсных породах и температурный режим мерзлой толщи

- Исследовательский семинар.

Методика и результаты эксперимента. Объяснение результатов эксперимента и анализ влияющих факторов. Уравнения переноса тепла и массы в мерзлой зоне. Аналитические оценки качественного поведения. Нижний горизонт избыточной льдистости. Аномальное распределение температуры в реликтовом слое.

Тема 10. Сезонное промерзание и протаивание горных пород. Основы рационального освоения территорий криолитозоны

- Проблемная лекция.

Формирование слоя сезонного промерзания и протаивания пород. Типы сезонного промерзания и протаивания горных пород. Влияние ландшафтно-климатических факторов на температурный режим и глубины сезонного промерзания и протаивания пород. Общие положения по рациональному использованию мерзлых пород при освоении криолитозоны. Региональные преобразования природной среды при освоении крупных территорий криолитозоны. Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований инженерных сооружений. Принципы расчета оснований и выбор конструкций фундаментов, сооружаемых на мерзлых грунтах. Рациональное использование криолитозоны для целей горнодобывающей промышленности и подземного строительства. Проблемы освоения криолитозоны в связи с возможным глобальным потеплением климата.

Тема 11. Обобщенная модель теплопереноса и деформирования промерзающих и оттаивающих пород при действии нагружения

- Исследовательский семинар.

Уравнения обобщенной модели. Комментарии к уравнениям. Текстурирование в условиях несвязности порового льда с телом линзы. Влияние граничного давления в жидкой фазе на процессы в мерзлом образце. Консолидируемые среды.

Тема 12. Механические свойства мерзлых грунтов

- Исследовательский семинар.

Исследование механических и физических свойств грунтов на лабораторном оборудовании. Экспериментальное определение влажности грунта. Изучение температурное поля грунта. Выполнение лабораторной работы по определению теплового поля оттаявшего грунта.

- На заключительном семинаре проводится защита проекта в виде демонстрации разработанной компьютерной программы и ее тестирования, определения ее возможностей.

Темы проектов:

1. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле мерзлого грунта.
2. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле грунта сезонного оттаивания и промерзания.
3. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле вечномерзлого грунта.

4. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле глинистых грунтов.

5. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле песчаника.

6. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле горной породы.

7. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле грунта морских отложений

8. Самостоятельно разработать компьютерную программу, благодаря которой можно изучать нестационарное температурное поле грунта, состоящего из нескольких пород (породы выбрать самостоятельно).

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ Темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1.	Понятие о геокриологии	Чтение основной и дополнительной литературы. Подготовка доклада с презентацией.
2.	Термодинамические условия развития мёрзлых пород	Чтение основной и дополнительной литературы. Подготовка доклада с презентацией.
3.	Термодинамика и механика равновесия фаз воды в дисперсных системах	Проработка лекций. Подготовка доклада с презентацией. Подготовка проекта.
4.	Процессы режеляции	Проработка лекций. Подготовка доклада с презентацией. Подготовка проекта.
5.	Тепло- и массообмен в промерзающих и протаивающих горных породах	Чтение основной и дополнительной литературы. Подготовка доклада с презентацией.
6.	Задача Стефана	Проработка лекций. Подготовка доклада с презентацией. Подготовка проекта.
7.	Миграционные процессы и теоретические модели льдонакопления в промерзающих дисперсных породах	Проработка лекций. Подготовка доклада с презентацией. Подготовка проекта.
8.	Физические и механические процессы в промерзающих, мёрзлых и протаивающих породах	Чтение основной и дополнительной литературы.
9.	Баротермический эффект в мёрзлых дисперсных породах и температурный режим мёрзлых толщин	Проработка лекций. Подготовка проекта.
10.	Сезонное промерзание и протаивание горных пород. Основы рационального освоения территорий криолитозоны	Чтение основной и дополнительной литературы.
11.	Обобщённая модель теплопереноса и деформирования промерзающих и оттаивающих пород при действии нагружения	Проработка лекций. Подготовка проекта.
12.	Механические свойства мёрзлых грунтов	Проработка лекций. Подготовка проекта.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устной форме.

Обязательным условием сдачи экзамена является сдача проекта и защита реферата, запланированных в учебной дисциплине.

Экзаменационный билет состоит из двух вопросов. Отметка выставляется после беседы с преподавателем, в которой преподаватель уточняет полноту знаний учащегося.

Примерные вопросы для подготовки к экзамену:

1. Понятие о геокриологии. Место геокриологии среди других наук.
2. Краткий очерк истории изучения криолитозоны и слагающих ее пород.
3. Подразделение мерзлых пород по продолжительности их существования. Глубина и сплошность промерзания пород по вертикали. Распространение мерзлых пород по площади. Южная и высотная границы распространения мерзлых толщ.
4. Мерзлые горные породы – естественно-исторические геологические образования.
5. Термодинамические условия развития мерзлых пород. Источники энергии, определяющие тепловое состояние земли.
6. Излучение, поглощение и отражение лучистой энергии.
7. Энергетический (тепловой) баланс Земли. Изменение прихода и расхода энергии в тепловом балансе земли и их влияние на климат.
8. Региональные и локальные тепловые балансы.
9. Температурное поле горных пород и его характеристика. Теплообмен и теплообороты.
10. Теплофизические процессы в промерзающих и протаивающих породах.
11. Законы Фурье.
12. Постановка задачи о промерзании (протаивании) однородного грунта с образованием границы раздела фаз (задача Стефана).
13. Постановка задачи о промерзании и протаивании пород в спектре температур (с образованием зоны промерзания).
14. Решение классической задачи Стефана.
15. Формула Стефана для определения глубины сезонного и многолетнего промерзания. Определение глубин сезонного и многолетнего промерзания (протаивания) пород по методу Л.С. Лейбензона.
16. Приближенные формулы В.А. Кудрявцева для определения теплооборотов и глубин сезонного промерзания (протаивания) пород.
17. Природа и механизм миграции влаги и дисперсных пород.
18. Влагоперенос и льдовыделение в мерзлых породах. Влагоперенос и льдовыделение в мерзлых породах под действием градиента температуры.
19. Влагоперенос в мерзлых породах при их взаимодействии с воздушной средой. Особенности влагопереноса и льдообразования в мерзлых породах под действием градиента механических напряжений, электрического поля и других внешних сил. Миграция влаги и льдообразование в мерзлых породах под и именем градиента электрического поля.
20. Влагоперенос и льдовыделение в промерзающих и протаивающих породах.
21. Пучение промерзающих и оттаивающих дисперсных пород.
22. Температурные деформации льда и мерзлых дисперсных пород.
23. Теплофизические свойства мерзлых пород.
24. Влагопроводность дисперсных пород.
25. Упругие свойства мерзлых пород.
26. Формирование слоя сезонного промерзания и протаивания пород.
27. Типы сезонного промерзания и протаивания горных пород.

28. Влияние ландшафтно-климатических факторов на температурный режим и глубины сезонного промерзания и протаивания пород.

29. Общие положения по рациональному использованию мерзлых пород при освоении криолитозоны.

30. Проблемы освоения криолитозоны в связи с возможным глобальным потеплением климата.

31. Региональные преобразования природной среды при освоении крупных территорий криолитозоны.

32. Рациональное использование криолитозоны при различных видах строительства. Дорожное строительство. Магистральные трубопроводы.

33. Особенности строительства в криолитозоне водопроводных и канализационных трубопроводов, аэродромных покрытий. Гидротехнических сооружений.

34. Лед как строительный материал. Рациональное использование криолитозоны для целей горнодобывающей промышленности и подземного строительства.

35. Принципы использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований инженерных сооружений. Способ обеспечения устойчивости сооружения путем сохранения мерзлого состояния грунтов основания (или его ужесточения). Способ обеспечения устойчивости сооружений ограничением оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ПК-3: способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.):</p> <p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физические, теплофизические и механические процессы в мерзлых породах, свойства мерзлых пород; – математические основы теплофизических расчетов теплофизических процессов в горных породах. <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> – самостоятельно проводить исследовательскую деятельность; – поставить и решить задачи о промерзании (протаивании) грунта, определить теплообороты и глубину сезонного промерзания (протаивания) пород. <p>Базовый уровень (хор.):</p> <p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> – термодинамические условия развития мерзлых пород; 	Выполнение реферата, защита компьютерной программы, экзамен.	Интенсивность использования дополнительных источников при подготовке реферата, авторитетность используемых источников, полнота раскрытия темы в реферате. Корректность уравнений и конечно-разностной схемы, используемой в программе, адекватность результатов работы программы.

		<p>– приемы решения конкретных задач из разных областей геокриологии, помогающих в дальнейшем решать инженерные задачи.</p> <p>Умеет:</p> <p>– создавать физико-математические модели объектов;</p> <p>– оценить пучение промерзающих и оттаивающих дисперсных пород.</p> <p>Повышенный уровень (отл.):</p> <p>Знает:</p> <p>– теплофизические закономерности сезонного и многолетнего промерзания и протаивания мерзлых пород с учетом геологических и географических условий;</p> <p>– компьютерные программы, применяемые при расчетах и прогнозировании состояния грунтов и горных пород.</p> <p>Умеет:</p> <p>– интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей;</p> <p>– составить региональные и локальные тепловые балансы.</p>		<p>Экзамен: правильность ответов на вопросы, ссылки на дополнительные источники при ответе.</p>
--	--	---	--	---

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

Пендин, В.В. Мерзлотоведение: учебное пособие / В.В. Пендин, В.О. Подборская, Т.П. Дубина. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 172 с. — ISBN 978-5-8114-2433-7. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/92655> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.2. Дополнительная литература:

Вакулин, А.А. Основы геокриологии: учебное пособие / А.А. Вакулин. — 2-е изд. — Тюмень: ТюмГУ, 2011. — 220 с. — ISBN 978-5-400-00460-5. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/110033> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.3. Интернет-ресурсы:

1. Образовательные ресурсы «Единое окно» <http://window.edu.ru/window/library>
2. Справочники и энциклопедии по физике <http://www.all-fizika.com/>

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

1. <https://e.lanbook.com>
2. <https://znanium.com>
3. http://www.trmost.ru/lib-main.shtml?all_books
4. <http://biblioclub.ru>

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

- **Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:**
платформа для электронного обучения Microsoft Teams, офисный пакет Microsoft Office, интегрированная среда разработки Microsoft Visual Studio.

По желанию студента (в зависимости от предпочитаемого языка программирования) возможно использование следующих IDE:

- **ПО, находящееся в свободном доступе, в том числе отечественного производства:**

JetBrains PyCharm Edu, Java JDK 8.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций требуется мультимедийная аудитория, оснащенная учебной мебелью, доской аудиторной меловой или маркерной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием и персональным компьютером с выходом в сеть Интернет.

Для проведения практических занятий требуется компьютерный класс, оснащенный учебной мебелью, доской аудиторной меловой или маркерной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием, персональными компьютерами, объединенными локальной сетью и подключенными к сети Интернет.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора ФТИ

 С.А. Креков

23.06.2021

ФИЗИКА НЕФТЯНОГО И ГАЗОВОГО ПЛАСТА 2

Рабочая программа

для обучающихся по направлению подготовки (специальности)

03.03.02 Физика

Направленность (профиль): Фундаментальная физика

очная форма обучения

Кадочникова Л. М., Вольф А. А. Физика нефтяного и газового пласта 2. Рабочая программа для обучающихся по направлению подготовки (специальности) 03.03.02 Физика: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины (модуля) опубликована на сайте ТюмГУ: Физика нефтяного и газового пласта 2 [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Кадочникова Л. М., Вольф А. А., 2021.

Рабочая программа дисциплины (модуля) включает следующие разделы:

1. Пояснительная записка

Актуальность: Для решения задач эффективной разработки месторождений УВ необходимы знания свойств горных пород, их взаимодействия с углеводородами различного фазового состояния, процессов фильтрации углеводородов и воды в пористых средах, оптимальных условий извлечения углеводородов. Дисциплина «Физика нефтяного и газового пласта 2» помогает ориентироваться в закономерностях поведения системы порода–углеводороды, предвидеть возможные отклонения ее поведения в реальной природной обстановке и предлагать оптимальные решения для повышения эффективности разработки месторождений.

Цель: дать представление о физической основе нефтяных газовых и газоконденсатных резервуаров и о закономерностях вытеснения углеводородных жидкостей при разработке месторождений, о нефтеотдаче пластов.

Задачи: изучить вопросы, касающиеся физики процессов движения флюидов в пластах коллекторах и принципов вытеснения нефти и газа на основе естественных и искусственных систем поддержания пластового давления. изучить молекулярно-поверхностные явления в пластах - коллекторах, закономерности проявления поверхностных сил при взаимодействии закачиваемых агентов (воды, газа) для вытеснения нефти и газа.

Результатом обучения является формирование у студентов представлений о физике нефтяного и газового пластов.

Курс состоит из трех частей:

1. Основы петрофизики. Лабораторные исследования керна и флюидов
2. Гидродинамические исследования скважин
3. Моделирование процессов фильтрации в пористых средах. Система уравнений фильтрации. Уравнения материального баланса.

Дисциплина «Физика нефтяного и газового пласта» формирует у студентов представление о круге современных задач, решаемых при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, а также о методах их решения. Сложность математических моделей фильтрации нефти в неоднородных пластах, а также значительный объем геологической и промысловой информации предопределяет использование современных вычислительных методов и информационных технологий при решении поставленных задач. При изучении дисциплины студент знакомится с этапами построения гидродинамической модели месторождения и практическим моделированием процессов фильтрации в нефтяном пласте на современных гидродинамических симуляторах.

Решение практических задач формирует у студентов навыки построения математических моделей месторождений и анализа полученных решений. При этом непосредственно используются современные технологии трехмерной визуализации строения пласта и потоков жидкости. Чтение курса предполагает использование мультимедийных средств обучения для демонстрации геологических карт, диаграмм состояния флюидов, перетоков жидкости. Особенно эффективны средства мультимедиа для демонстрации потоков в режиме анимации. Обучение на практических занятиях строится на основе использования специализированных программ гидродинамического моделирования (Eclips, More и т.п.). Практические задания представляют собой мини-проекты, требующие той или иной корректировки, либо создаваемые студентом самостоятельно.

1.1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в блок Б1 Дисциплины, дисциплина по выбору, изучается в 7 семестре.

Знания, полученные в ходе изучения дисциплины «Физика нефтяного и газового пласта 2» необходимы для подготовки и написания выпускной квалификационной работы.

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины (модуля)

В результате освоения дисциплины обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения: (знаниевые/функциональные)
Способность формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок (ПК-3)	-	Знает – специализированные разделы физики; – проблематику отрасли, на которой специализируется образовательная программа.
		Умеет – выделять и ставить задачи, решаемые в рамках доступных приближений и ресурсов; – пользоваться прикладными методами расчета физико-математических моделей.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 1

Вид учебной работы		Всего часов	Часов в семестре
			7
Общая трудоемкость	зач. ед.	5	5
	час	180	180
Из них:			
Часы аудиторной работы (всего):		180	180
Лекции		34	34
Практические занятия		0	0
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		58	58
Вид промежуточной аттестации (зачет, диф. зачет, экзамен)			Экзамен

3. Система оценивания

7 семестр:

Экзамен по дисциплине.

Экзамен проводится в устно-письменной форме. Экзамен включает письменную часть – ответ по экзаменационному билету. В билете 2 вопроса и задача. При получении в ходе текущего контроля среднего балла больше или равного 61 студент освобождается от решения задачи. Устная часть экзамена оценивает полученные знания по дисциплине путем собеседования с преподавателем.

При текущем контроле учитывается несколько видов деятельности обучающихся:

- активность на семинарах (0 – 30 баллов);
- выполнение домашних заданий (0 – 35 балл);
- контрольные работы (0 – 35 балла);

Активность на семинаре включает в себя решение задач у доски, участие в решении задачи «с места», решение задач опережающими темпами и т.д.

Выполнение домашних заданий подразумевает проверку в начале занятия наличия выполненных заданий.

В случае, если сумма баллов составляет не менее 61, и студент согласен с итоговой оценкой, ему выставляется оценка согласно шкале перевода:

- от 61 до 75 баллов – «удовлетворительно»;
- от 76 до 90 баллов – «хорошо»;
- от 91 до 100 баллов – «отлично».

В случае, если студент набрал менее 61 балла или не согласен с итоговой оценкой, ему предоставляется право сдавать экзамен, и оценка выставляется непосредственно по результатам экзамена.

4. Содержание дисциплины**4.1. Тематический план дисциплины**

Таблица 2

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины (модуля), час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1	Методы решения системы уравнений фильтрации	10	0	0	4	0
2	Численные методы	12	4	0	4	2
3	Специализированные	10	0	0	2	0

	программы для гидродинамического моделирования					
4	Специализированные программы для гидродинамического моделирования	12	4	0	4	2
5	Задание входных параметров	10	0	0	4	0
6	Задание входных параметров	12	4	0	4	2
7	Задание начальных условий	10	0	0	4	0
8	Задание начальных условий	12	4	0	4	2
9	Граничные условия	10	0	0	4	0
10	Граничные условия	12	4	0	4	2
11	Решение обратных задач	10	0	0	4	0
12	Адаптация на историю разработки	12	8	0	8	2
13	Основы разработки	12	0	0	4	0
14	Основы разработки газовых месторождений	12	0	0	4	2
15	Расчеты прогнозных вариантов	10	6	0	6	2

16	Прогнозные расчеты	12	0	0	4	2
	Экзамен	8	0	0	0	2
	Итого (часов)	180	34	0	68	20

4.2. Содержание дисциплины (модуля) по темам

Семестр 7

1. Методы решения системы уравнений фильтрации

Аналитические и численные методы решения системы уравнений фильтрации. Основные решения.

2. Численные методы

Представление уравнений фильтрации в разностном виде. Численные методы решения системы уравнений фильтрации. Явные и неявные схемы. Условия устойчивости численной схемы.

3. Специализированные программы для гидродинамического моделирования

Программы геологического и гидродинамического моделирования. Перечень ПО, их сравнение.

4. Специализированные программы для гидродинамического моделирования

Интерфейс программ гидродинамического моделирования. Вспомогательные программы для подготовки исходных данных.

5. Задание входных параметров

Подготовка данных для моделирования. Перевод данных из лабораторных условий в условия пласта. Особенности задания в модели ФЕС, свойств флюидов

6. Задание входных параметров

Особенности задания ОФП, сжимаемости породы.

7. Задание начальных условий

Начальные условия задачи. Особенности задания начальных условий. Задание начального распределения давления и насыщенности. Равновесное распределение насыщенности. Капиллярное давление. Перевод данных из лабораторных условий в условия пласта. Понятие водонефтяного контакта, газонефтяного контакта.

8. Задание начальных условий

Неравновесное распределение насыщенности. Условие фиксации капиллярных давлений. J – функция.

9. Граничные условия

Особенности задания граничных условий. Внешние граничные условия. Понятие акьюфера. Способы задания акьюфера в модели.

10. Граничные условия

Граничные условия на скважинах. Формула Писмана. Модель скважины.

11. Решение обратных задач

Решение обратных задач. Неопределенности задания входных данных. Процедура адаптации модели на историю разработки.

12. Адаптация на историю разработки

Адаптируемые параметры модели. Качество адаптации. Способы проверки качества адаптации.

13. Основы разработки

Основы разработки нефтяных месторождений. Стадии разработки. Эффективность ППД. Использование МУН

14. Основы разработки газовых месторождений

Основы разработки газовых месторождений. Режимы газовых залежей. Метод материального баланса.

15. Расчеты прогнозных вариантов

Особенности формирования прогнозных расчетов. Виды прогнозных расчетов. Групповой контроль. Контроль качества прогнозных расчетов.

16. Прогнозные расчеты

Использование экономических ограничений. Анализ неопределенностей и рисков.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 3

№ Темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1	Методы решения системы уравнений фильтрации	Чтение обязательной и дополнительной литературы
2	Численные методы	Проработка лекций
3	Специализированные программы для гидродинамического моделирования	Чтение обязательной и дополнительной литературы
4	Специализированные программы для гидродинамического моделирования	Проработка лекций
5	Задание входных параметров	Чтение обязательной и дополнительной литературы
6	Задание входных параметров	Проработка лекций
7	Задание начальных условий	Чтение обязательной и дополнительной литературы
8	Задание начальных условий	Проработка лекций
9	Граничные условия	Чтение обязательной и дополнительной литературы
10	Граничные условия	Проработка лекций
11	Решение обратных задач	Чтение обязательной и дополнительной литературы
12	Адаптация на историю разработки	Проработка лекций
13	Основы разработки	Чтение обязательной и дополнительной литературы
14	Основы разработки газовых месторождений	Чтение обязательной и дополнительной литературы
15	Расчеты прогнозных вариантов	Проработка лекций
16	Прогнозные расчеты	Чтение обязательной и дополнительной литературы

6. Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю)

Экзаменационную оценку возможно получить автоматически, при условии, что:

- количество баллов, полученных в течение семестра, составляет 61% от максимально возможного при усвоении дисциплины – оценка "удовлетворительно";
- количество баллов, полученных в течение семестра, составляет 76% от максимально возможного при усвоении дисциплины – оценка "хорошо".

Если студент желает повысить оценку или претендует на оценку "отлично", то он сдает экзамен в устной форме.

Экзаменационный билет, содержит 2 теоретических вопроса и задачу.

Ответы на экзаменационный билет оцениваются по следующим критериям:

- "отлично" - студент дал полный ответ на теоретические вопросы, правильно решил задачу, продемонстрировал взаимосвязь теоретических основ оптических явлений и практики;
- "хорошо" - студент показал систематические знания по дисциплине, способность применять их для решения практических задач, но имеются недочеты в ответах и решениях;
- "удовлетворительно" - студент имеет представления об основных оптических явлениях и законах, однако недостаточно владеет теоретическим материалом, в ответах и решениях допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;
- "неудовлетворительно" - студент не имеет систематических знаний в области оптики, слабо разбирается в теоретических и практических вопросах, допускает принципиальные ошибки в ответах и решениях.

Обязательным условием сдачи экзамена на "отлично" является написание контрольных работ по дисциплине на 90% (или более) баллов.

6.1 Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

Примерные вопросы к экзамену

1. Поверхностное натяжение на границах разделов сред. Смачиваемость горных пород-коллекторов нефти и газа. Гидрофильные и гидрофобные горные породы.
2. Источники пластовой энергии. Физические основы вытеснения нефти и газа из пористых сред.
3. Силы, действующие в пласте в процессе вытеснения нефти и газа водой.
4. Применение ПАВ для повышения нефтеотдачи. Поверхностно-активные вещества (ПАВ).
5. Физико-химические основы повышения нефтеотдачи коллекторов. Экспериментальные исследования процессов вытеснения нефти и газа водой.
6. Коэффициент вытеснения. Методы определения коэффициента вытеснения.
7. Модели процесса вытеснения нефти водой. Функция Бакли Леверетта.
8. Расчет непоршневого вытеснения нефти водой.
9. Модели продуктивных пластов для технологических расчетов.
10. Учет неоднородности продуктивных пластов по проницаемости.
11. Прогнозирование показателей разработки по фактическим данным с помощью характеристик вытеснения. Виды характеристик, условия и область их применения.
12. Метод материального баланса, его суть и возможности при решении задач разработки нефтяных и газовых месторождений.
13. Особенности разработки нефтяных месторождений с трещинно-поровыми коллекторами.
14. Применение горизонтальных скважин при разработке нефтяных месторождений. Особенности моделирования горизонтальных скважин.

Примерные задачи для контрольной работы/экзамена

1. Нефтяная залежь имеет газовую шапку, окружена активной пластовой водой и характеризуется сложным проявлением различных режимов работы продуктивного пласта. Начальное пластовое давление равно давлению насыщения. Начальная доля объема газовой шапки по отношению ко

всему объему залежи 0,25. Начальное газосодержание – 150 м³/м³, объемный коэффициент газа – 0,006, объемный коэффициент нефти – 1,475. Остаточная водонасыщенность – 0,12.

В процессе эксплуатации газосодержание снизилось до 125 м³/м³, объемный коэффициент газа – 0,0063, объемный коэффициент нефти – 1,415, объемный коэффициент воды – 1,028. За период эксплуатации добыто нефти 1,06*10⁶ м³, газа – 175*10⁶ м³, воды – 5*10⁴ м³. Количество внедренной законтурной воды – 1,2*10⁶ м³.

Определить на основе метода материального баланса: начальные геологические запасы нефти; текущую нефтеотдачу и текущую нефтенасыщенность нефтяной залежи.

- Описать свойства флюидов для 3-х фазной системы фильтрации в ключевых словах Eclipse. Пластовое давление - 120 атм, давление насыщения -105 атм, плотность воды - 1001 кг/м³, вязкость воды -0,35 сПз, плотность нефти - 812 кг/м³, вязкость нефти в пл. усл 0,6 сПз, вязкость нефти в поверх. усл – 1,8 сПз, газосодержание - 132 м³/м³, объёмный коэффициент нефти -1,1 м³/м³, плотность газа – 0,75 кг/м³, вязкость газа – 0,022 сПз, объёмный коэффициент газа – 0,005 м³/м³.

6.2 Критерии оценивания компетенций:

Таблица 4

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1	ПК-3	<p>Пороговый (удовл.) Знает: основные понятия и законы, описывающие фазовое поведение индивидуальных веществ и многокомпонентных природных углеводородных систем; Умеет: разбираться в технологиях добычи нефти и газа</p> <p>Базовый (хор.) Знает: специализированные разделы физики; Умеет: выделять и ставить задачи, решаемые в рамках доступных приближений и ресурсов;</p> <p>Повышенный (отл.) Знает: проблематику отрасли, на которой специализируется образовательная программа. Умеет: пользоваться прикладными методами расчета физико-математических моделей.</p>	Контрольная работа	Полнота и правильность решения задач контрольной работ

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

7.1 Основная литература:

1. Физико-математическое моделирование: учебное пособие / А. Б. Шабаров [и др.]; рец.: В. Н. Антипов, Ю. Д. Земенков; Тюм. гос. ун-т, Ин-т физики и химии. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2014. — 2-Лицензионный договор №222/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/1/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/2/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/3/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/4/2016-03-02. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). — <URL:

[https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222\(1\)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf](https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222(1)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf)> (дата обращения: 29.05.2020).

2. Шадрина, А. В. Основы нефтегазового дела / А. В. Шадрина, В. Г. Крец. — 3-е изд. — Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), Ай Пи Эр Медиа, 2019. — 213 с. — ISBN 978-5-4486-0516-1. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/79709.html> (дата обращения: 29.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7.2 Дополнительная литература:

1. Каневская, Р. Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов / Р. Д. Каневская. — Москва, Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. — 128 с. — ISBN 978-5-4344-0797-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/92049.html> (дата обращения: 29.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, Н. М. Дмитриев, Р. Д. Каневская, В. М. Максимов. — 2-е изд. — Москва, Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. — 488 с. — ISBN 978-5-4344-0605-5. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91980.html> (дата обращения: 29.05.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
3. Федоров, Константин Михайлович. Фильтрационные течения с физико-химическими превращениями в задачах нефтегазовой механики: учебное пособие / К. М. Федоров, Н. Г. Мусакаев, Татьяна Анатольевна Кремлева. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2017. — 2-Лицензионный договор № 572/2017-12-01. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). — <URL:https://library.utmn.ru/dl/PPS/Fedorov_Musakaev_Kremleva_572_UP_2017.pdf> (дата обращения: 29.05.2020).
4. Физико-математическое моделирование: учебное пособие / А. Б. Шабаров [и др.]; рец.: В. Н. Антипов, Ю. Д. Земенков; Тюм. гос. ун-т, Ин-т физики и химии. — Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2014. — 2-Лицензионный договор №222/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/1/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/2/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/3/2016-03-02; 2-Лицензионный договор №222/4/2016-03-02. — Доступ по паролю из сети Интернет (чтение). — <URL:[https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222\(1\)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf](https://library.utmn.ru/dl/PPS/Shabarov_Primakov_222_222(1)_Fiziko_matemat_model_UP_2014.pdf)> (дата обращения: 29.05.2020).

7.3 Интернет-ресурсы:

1. Электронная библиотека Попечительского совета механико-математического факультета Московского государственного университета <http://lib.mexmat.ru>
2. eLIBRARY – Научная электронная библиотека (Москва) <http://elibrary.ru/>

7.4 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Не предусмотрено использование в данной дисциплине.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю):

Лицензионное ПО: необходим пакет программ Microsoft Office, необходимо наличие программного обеспечения tNavigator, в случае дистанционной формы обучения – Microsoft Teams.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)
(указывается в соответствии с ФГОС ВО)

Лекционная аудитория с мультимедийным оборудованием, компьютерный класс для практических занятий.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


_____ С.А. Креков
23.06.2021

СВОЙСТВА ТЕПЛОБМЕННЫХ СРЕД
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль: Фундаментальная физика
форма обучения очная

Шастунова Ульяна Юрьевна. Свойства теплообменных сред. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Шастунова У.Ю., 2021.

1. Пояснительная записка

Цель дисциплины – ознакомить студентов с методами расчета теплофизических свойств теплообменных сред, а также углеводородов в жидком и газообразном состояниях.

Задачи дисциплины:

- сформировать у студентов представления о методах расчета теплофизических свойств влажного пара, грунта и углеводородов, области их применения и погрешности;
- дать студентам необходимые для их будущей профессиональной деятельности практические навыки проведения расчетов теплофизических свойств сред.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит в блок Б1 Дисциплины (модули), части, формируемой участниками образовательных отношений, и относится к дисциплинам по выбору

При изучении курса используются знания, полученные студентами в курсах: «Молекулярная физика», «Математический анализ», «Механика», «Теплофизика».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения (знаниевые/функциональные)
ПК-1: способен осуществлять выполнение экспериментов и оформление результатов исследований и разработок	–	Знает – избранные области экспериментальных и теоретических физических исследований; – современную приборную базу; – современные информационно-коммуникационные технологии; – отечественный и зарубежный опыт в области физики, на которой специализируется образовательная программа.
		Умеет – под руководством/самостоятельно проводить научно-исследовательские работы; – работать с современной приборной базой; – решать/анализировать экспериментальные и теоретические задачи с помощью специализированных пакетов прикладных программ.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			7 семестр
Общий объем	зач. ед.	4	4
	час	144	144
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		122	122
Лекции		34	34
Практические занятия		–	–
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		68	68
Консультации и иная контактная работа		20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		22	22
Вид промежуточной аттестации			экзамен

3. Система оценивания

3.1. На учебных занятиях оценивается работа студентов в аудитории на практических занятиях (0 – 5 баллов за занятие). Под работой на практических занятиях подразумевается активная беседа с преподавателем, самостоятельное выполнение заданий, выданных преподавателем.

Проводится 1 коллоквиум (0-16 баллов) по экзаменационным вопросам. Этот вид занятия позволяет студенту заранее подготовиться к экзамену и устранить в беседе с преподавателем все неточности знаний. Количество баллов выставляется после обсуждения с преподавателем.

Также в семестре проводится 3 контрольные работы (0-12 баллов за каждую работу) по темам «Мерзлый грунт», «Газ», «Жидкость». Студенту необходимо будет самостоятельно рассчитать теплофизические свойства (теплопроводность, плотность, теплоемкость и др.) по зависимостям, которые предложены авторами учебных пособий, построить закономерности изменения физических свойств от температуры. Для выполнения задания необходимо использовать Microsoft Excel.

Преподаватель может использовать систему штрафов, уменьшая набранные баллы за пропуски занятий без уважительных причин, за нарушение сроков выполнения учебных заданий, за систематический отказ отвечать на занятиях и т.д. Возможно также начисление премиальных баллов за работы, выполненные студентом на высоком уровне.

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – экзамен. Экзамен возможно получить автоматически, при усвоении:

65% материала – "удовлетворительно" (65 баллов, полученных при усвоении дисциплины на учебных встречах в семестре);

80% материала – "хорошо" (80 баллов, полученных при усвоении дисциплины на учебных встречах в семестре).

Если студент претендует на отметку "отлично", то он сдает экзамен.

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Мёрзлый грунт. Классификация. Особенности расче- та.	20	6	–	10	2
2.	Аналитические уравнения состояния веществ в газообраз- ном состоянии.	20	6	–	10	2
3.	Термодинамический метод в теории теп- лофизических свойств веществ.	20	4	–	10	2
4.	Закон соответствен- ных состояний и его применение для рас- чёта теплофизиче- ских свойств ве- ществ в газообраз- ном и жидком состо- яниях.	20	4	–	10	2
5.	Явления переноса в веществах в газооб- разном и жидком состояниях.	20	4	–	8	4
6.	Равновесие фаз жид- кость пар и критиче- ские явления в одно- компонентных веще- ствах и их смесях. Теплофизические свойства веществ в газоконденсатном состоянии.	22	6	–	10	2
7.	Теплофизические свойства нефтей, га- зовых конденсатов и их фракций.	20	4	–	10	4
8.	Экзамен	2	–	–	–	2
Итого (часов)		144	34	0	68	20

4.2. Содержание дисциплины по темам

Тема 1. Мерзлый грунт. Классификация. Особенности расчета

- Мерзлый грунт. Классификации. Теплофизические характеристики. Особенности расчета.
- Расчет теплофизических свойств мерзлого грунта. Изучение зависимостей и особенностей расчета.

Тема 2. Аналитические уравнения состояния веществ в газообразном состоянии

- Двухпараметрические аналитические уравнения состояния реальных газов и их применимость для углеводородов. Уравнение Ван-дер-Ваальса, Редлиха-Квонга. Вириальное уравнение.
- Расчет температурной зависимости плотности паров углеводородов при различных давлениях по аналитическим уравнениям состояния газов (Клапейрона-Менделеева, Ван-дер-Ваальса, Редлиха-Квонга, вириальному уравнению).
- Проведение контрольной работы № 1.

Примеры заданий для контрольной работы № 1:

1. Рассчитать давление насыщенного пара жидкости при заданной температуре.
2. Рассчитать плотность газа при заданном давлении P и температуре T по вириальному уравнению.
3. Рассчитать плотность газа при заданном давлении P и температуре T по уравнению Редлиха-Квонга.
4. Рассчитать идеальную газовую теплоемкость заданного вещества.
5. Рассчитать теплоемкость газа при заданной температуре и давлении.
6. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость) природного газа. Построить закономерности указанных физ. свойств от температуры.
7. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость, удельный объем, давление и температура насыщения) водяного пара. Построить закономерности указанных физ. свойств от температуры.

Тема 3. Термодинамический метод в теории теплофизических свойств веществ

- Функции отклонения термодинамических потенциалов реальных газов от идеального состояния и их расчет по уравнениям состояния газов на примере уравнений Ван-дер-Ваальса, Редлиха-Квонга, вириального уравнения. Расчет термодинамических свойств углеводородов по их термодинамическим потенциалам.
- Вывод аналитического уравнения для расчета температурной зависимости теплоемкости паров углеводородов при повышенных давлениях на основе различных уравнений состояний и проведение по нему расчетов для предложенного углеводорода.

Тема 4. Закон соответственных состояний и его применение для расчета теплофизических свойств веществ в газообразном и жидком состояниях

- Описание свойств реальных газов в рамках обобщенных законов соответственных состояний. Введение критериев подобия веществ по температурной зависимости давления их насыщенных паров. Соотношения между различными критериями подобия, их достоинства и недостатки. Метод Риделя описания температурной зависимости давления насыщенных паров углеводородов $p_n(T)$. Методы расчета теплофизических свойств углеводородов в жидком состоянии (плотности, теплоемкости, вязкости, поверхностного натяжения) на основе уравнений соответственных состояний.
- Расчет температурной зависимости давления насыщенных паров жидкостей по методу Риделя при различном способе определения критерия подобия. Расчет температурной

зависимости плотности, поверхностного натяжения и теплоемкости углеводородов в жидком состоянии.

- Проведение контрольной работы № 2.

Примеры заданий для контрольной работы № 2:

1. Рассчитать плотность углеводорода в жидком и парообразном состоянии на линии насыщения.
2. Рассчитать теплоту испарения жидкости при температуре кипения.
3. Рассчитать теплоту испарения жидкости по температурной зависимости давления ее насыщенных паров.
4. Рассчитать теплоемкость жидкости при заданной температуре.
5. Рассчитать вязкость жидкости при низкой температуре.
6. Рассчитать поверхностное натяжение жидкости.
7. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость) нефти. Построить закономерности указанных физ. свойств от температуры.

Тема 5. Явления переноса в веществах в газообразном и жидком состояниях

- Молекулярно-кинетическая теория коэффициентов переноса в идеальных газах. Расчет коэффициентов вязкого трения и теплопроводности реальных газов по эмпирическим и полуэмпирическим соотношениям, полученным в рамках обобщенных законов соответственных состояний. Аналитическое однопараметрическое уравнение для коэффициента температуропроводности и кинематической вязкости реальных газов. Расчет коэффициентов вязкости и теплопроводности жидкостей при низких и высоких температурах.

- Расчет температурной зависимости вязкости и теплопроводности углеводородов в газообразном и жидком состоянии.

Тема 6. Равновесие фаз жидкость пар и критические явления в однокомпонентных веществах и их смесях. Теплофизические свойства веществ в газоконденсатном состоянии

- Теплофизические свойства газовых смесей. Уравнение Редлиха-Квонга и вириальное уравнение для смесей газов. Псевдокритические и истинные критические параметры газовых смесей. Уравнения бинодали и спинодали. Условия равновесия фаз и фазовые переходы I рода. Фазовые диаграммы. Методы расчета критических параметров и параметров фазовых переходов веществ; свойств веществ при критической температуре и температуре кипения. Методы расчета свойств веществ на линии насыщения. Явление обратной конденсации первого и второго рода в многокомпонентных смесях углеводородов.

- Расчет температурной зависимости плотности жидкости и газа на линии насыщения. Расчет псевдокритических и критических параметров многокомпонентных смесей углеводородов. Расчет параметров фазового равновесия жидкость-пар.

- Проведение контрольной работы № 3.

Примеры заданий для контрольной работы № 3:

1. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) мерзлого грунта.
2. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) грунта сезонного оттаивания и промерзания.
3. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) вечномерзлого грунта.
4. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) глинистых грунтов.

5. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) песчаника.
6. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) горной породы.
7. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) грунта морских отложений.

Тема 7. Теплофизические свойства нефтей, газовых конденсатов и их фракций

- Состав, физико-химические свойства, характеристические параметры и критерии подобия нефти, газовых конденсатов и их фракций. Калорические свойства, вязкость и теплопроводность нефти и газовых конденсатов.
- Расчет калорических свойств, вязкости и теплопроводности нефти и газовых конденсатов по их характеристическим параметрам и критериям подобия.
- Проведение коллоквиума по пройденным лекционным темам на последнем практическом занятии.

Примерные вопросы на коллоквиум:

1. Аналитические уравнения состояния газов и их применимость для расчета плотности паров углеводородов.
2. Функции отклонения термодинамических потенциалов реальных газов от идеального состояния и их расчет по уравнениям состояния газов на примере уравнений Ван-дер-Ваальса, Редлиха-Квонга, вириального уравнения.
3. Вывод аналитического уравнения для теплоемкости паров углеводородов на основании двухпараметрических аналитических уравнений состояния реальных газов.
4. Описание свойств реальных газов и паров в рамках обобщенных законов соответственных состояний. Соотношения между различными критериями подобия, их достоинства и недостатки.
5. Метод Риделя описания температурной зависимости давления насыщенных паров углеводородов.
6. Молекулярно-кинетическая теория коэффициентов переноса в идеальных газах.
7. Расчет коэффициентов вязкого трения и теплопроводности реальных газов по эмпирическим и полуэмпирическим соотношениям, полученным в рамках обобщенных законов соответственных состояний.
8. Аналитическое однопараметрическое уравнение для коэффициента температуропроводности и кинематической вязкости гомологического ряда предельных углеводородов.
9. Методы расчета плотности, теплоемкости и поверхностного натяжения углеводородов в жидком состоянии на основе уравнений соответственных состояний.
10. Методы расчета коэффициентов вязкости и теплопроводности жидкостей при низких и высоких температурах.
11. Фазовое равновесие жидкость-пар. Уравнения бинодали и спинодали. Расчет плотности углеводородов на линии насыщения.
12. Критическая температура и критические параметры веществ. Особые свойства веществ при критической температуре. Методы расчета критических параметров углеводородов.
13. Теплофизические свойства газовых смесей. Псевдокритические и истинные критические параметры газовых смесей.
14. Газоконденсатное состояние углеводородов. Явление обратной конденсации первого и второго рода в многокомпонентных смесях углеводородов.
15. Состав, физико-химические свойства, характеристические параметры и критерии подобия нефти и газовых конденсатов, которые используются при расчете их теплофизических параметров.

16. Расчет калорических свойств нефти и газовых конденсатов.
17. Расчет вязкости нефти и газовых конденсатов.
18. Расчет теплопроводности нефти и газовых конденсатов.
19. Расчет поверхностного натяжения нефти и газовых конденсатов.
20. Классификация мерзлых грунтов.
21. Теплофизические свойства мерзлых грунтов.
22. Особенности расчета мерзлой породы в разных координатах: декартовых, цилиндрических, сферических.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1	Мёрзлый грунт. Классификация. Особенности расчета.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций.
2	Аналитические уравнения состояния веществ в газообразном состоянии.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Поиск справочных данных и научной литературы в Интернете.
3	Термодинамический метод в теории теплофизических свойств веществ.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций.
4	Закон соответственных состояний и его применение для расчёта теплофизических свойств веществ в газообразном и жидком состояниях.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Поиск справочных данных и научной литературы в Интернете.
5	Явления переноса в веществах в газообразном и жидком состояниях.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций.
6	Равновесие фаз жидкость пар и критические явления в однокомпонентных веществах и их смесях. Теплофизические свойства веществ в газоконденсатном состоянии.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций. Поиск справочных данных и научной литературы в Интернете.
7	Теплофизические свойства нефтей, газовых конденсатов и их фракций.	Чтение основной и дополнительной литературы. Проработка лекций.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устной форме по следующему алгоритму:

1. решение задачи (расчет теплофизических свойств или газа, или жидкости, или твердого тела);
2. письменный ответ на билет, содержащий два вопроса;
3. беседа с преподавателем на письменный ответ на билет (10-15 минут).

В экзаменационный билет входит 2 теоретических вопроса и практическое задание, по которому студент должен рассчитать на персональном компьютере тот или иной теплофизический параметр для определенного вещества при конкретных условиях. Оценка за этот расчет определяется не только его правильностью, но и затраченным временем, поскольку оно характеризует приобретенные студентами навыки на практических занятиях.

Ответы на экзаменационный билет оцениваются по следующим критериям:

"отлично" – студент дал полный ответ на теоретические вопросы, правильно решил задачу, продемонстрировал знания расчетов теплофизических свойств;

"хорошо" – студент показал систематические знания по дисциплине, способность применять их для решения практических задач, но имеются недочеты в ответах и решениях;

"удовлетворительно" – студент имеет представления о теории теплофизических свойств и применении их в практике, но недостаточно владеет теоретическими основами, в ответах и решениях допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;

"неудовлетворительно" – студент не имеет систематических знаний в области изучаемого предмета, слабо разбирается в практических вопросах, допускает принципиальные ошибки в ответах и решениях.

Перечень теоретических вопросов для подготовки к экзамену:

1. Аналитические уравнения состояния газов и их применимость для расчета плотности паров углеводородов.
2. Функции отклонения термодинамических потенциалов реальных газов от идеального состояния и их расчет по уравнениям состояния газов на примере уравнений Ван-дер-Ваальса, Редлиха-Квонга, вириального уравнения.
3. Вывод аналитического уравнения для теплоемкости паров углеводородов на основании двухпараметрических аналитических уравнений состояния реальных газов.
4. Описание свойств реальных газов и паров в рамках обобщенных законов соответственных состояний. Соотношения между различными критериями подобия, их достоинства и недостатки.
5. Метод Риделя описания температурной зависимости давления насыщенных паров углеводородов.
6. Молекулярно-кинетическая теория коэффициентов переноса в идеальных газах.
7. Расчет коэффициентов вязкого трения и теплопроводности реальных газов по эмпирическим и полуэмпирическим соотношениям, полученным в рамках обобщенных законов соответственных состояний.
8. Аналитическое однопараметрическое уравнение для коэффициента температуропроводности и кинематической вязкости гомологического ряда предельных углеводородов.
9. Методы расчета плотности, теплоемкости и поверхностного натяжения углеводородов в жидком состоянии на основе уравнений соответственных состояний.
10. Методы расчета коэффициентов вязкости и теплопроводности жидкостей при низких и высоких температурах.
11. Фазовое равновесие жидкость-пар. Уравнения бинодали и спинодали. Расчет плотности углеводородов на линии насыщения.
12. Критическая температура и критические параметры веществ. Особые свойства веществ при критической температуре. Методы расчета критических параметров углеводородов.
13. Теплофизические свойства газовых смесей. Псевдокритические и истинные критические параметры газовых смесей.
14. Газоконденсатное состояние углеводородов. Явление обратной конденсации первого и второго рода в многокомпонентных смесях углеводородов.
15. Состав, физико-химические свойства, характеристические параметры и критерии подобия нефти и газовых конденсатов, которые используются при расчете их теплофизических параметров.
16. Расчет калорических свойств нефти и газовых конденсатов.
17. Расчет вязкости нефти и газовых конденсатов.
18. Расчет теплопроводности нефти и газовых конденсатов.
19. Расчет поверхностного натяжения нефти и газовых конденсатов.
20. Классификация мерзлых грунтов.
21. Теплофизические свойства мерзлых грунтов.

22. Особенности расчета мерзлой породы в разных координатах: декартовых, цилиндрических, сферических.

Перечень практических заданий для подготовки к экзамену:

1. Рассчитать давление насыщенного пара жидкости при заданной температуре.
2. Рассчитать плотность жидкости при температуре ниже ее нормальной температуры кипения.
3. Рассчитать плотность газа при заданном давлении P и температуре T по вириальному уравнению.
4. Рассчитать плотность газа при заданном давлении P и температуре T по уравнению Редлиха-Квонга.
5. Рассчитать критические параметры веществ.
6. Рассчитать теплоту испарения жидкости при температуре кипения.
7. Рассчитать теплоту испарения жидкости по температурной зависимости давления ее насыщенных паров.
8. Рассчитать идеальную газовую теплоемкость заданного вещества.
9. Рассчитать теплоемкость жидкости при заданной температуре.
10. Рассчитать теплоемкость газа при заданной температуре и давлении.
11. Рассчитать вязкость газа при заданном давлении P и температуре T .
12. Рассчитать вязкость жидкости при низкой температуре.
13. Рассчитать вязкость жидкости при температуре близкой к критической.
14. Рассчитать поверхностное натяжение жидкости.
15. Рассчитать псевдокритические параметры смеси углеводородов.
16. Рассчитать вязкость смеси углеводородов заданного состава.
17. Рассчитать теплоемкость смеси углеводородов заданного состава.
18. Рассчитать плотность смеси углеводородов заданного состава.
19. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость) нефти. Построить закономерности указанных физ. свойств от температуры.
20. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость) природного газа. Построить закономерности указанных физ. свойств от температуры.
21. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость, удельный объем, давление и температура насыщения) водяного пара. Построить закономерности указанных физ. свойств от температуры.
22. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) мерзлого грунта.
23. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) грунта сезонного оттаивания и промерзания.
24. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) вечномерзлого грунта.
25. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) глинистых грунтов.
26. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) песчаника.
27. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) горной породы.
28. Рассчитать теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость) грунта морских отложений.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ПК-1: способен осуществлять выполнение экспериментов и оформление результатов исследований и разработок	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.):</p> <p><i>Знает:</i> особенности теплофизических свойств углеводородов и способы их расчета.</p> <p><i>Умеет:</i> с помощью заданных теоретических уравнений рассчитывать теплофизические свойства чистых углеводородов.</p> <p>Базовый уровень (хор.):</p> <p><i>Знает:</i> основные уравнения, по которым можно рассчитать теплофизические свойства углеводородов и их смесей в широком диапазоне температур и давлений.</p> <p><i>Умеет:</i> находить в литературе теоретические уравнения, с помощью которых можно рассчитывать теплофизические свойства чистых углеводородов, оценивать их точность, выявлять наиболее точные и рассчитывать по ним свойства конкретных углеводородов.</p> <p>Повышенный уровень (отл.):</p> <p><i>Знает:</i> физическую природу всех теплофизических свойств чистых углеводородов и их смесей, особенности их изменения в зависимости от температуры и давления, методы их теоретического и экспериментального расчетов.</p> <p><i>Умеет:</i> находить в литературе теоретические уравнения, с помощью которых можно рассчитывать теплофизические свойства не только чистых углеводородов, но и их смесей, оценивать их точность, выявлять наиболее точные и рассчитывать по ним свойства конкретных углеводородных систем.</p>	Лекции, практические задания, решение индивидуальных заданий	Правильность решения практических заданий (задач), заданных на дом и индивидуально. Правильность решения практических заданий (задач) на промежуточных аттестациях. Экзамен: правильность ответов на вопросы, ссылки на дополнительные источники при ответе. Правильность решения задачи.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

Тепломассоперенос в нефтегазовых и строительных технологиях: учебное пособие / А.Б. Шабаров, А.А. Кислицын, Б.В. Григорьев [и др.]; под ред. А.Б. Шабарова, А.А. Кислицына. — Тюмень: ТюмГУ, 2014. — 332 с. — ISBN 978-5-400-00979-2. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/109978> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.2. Дополнительная литература:

Моргунов, К.П. Механика жидкости и газа: учебное пособие / К.П. Моргунов. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 208 с. — ISBN 978-5-8114-3278-3. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/109512> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.3. Интернет-ресурсы:

Образовательные ресурсы «Единое окно»: <http://window.edu.ru/window/library>

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

1. eLIBRARY — научная библиотека (г. Москва). — <http://e-library.ru>
2. <https://znanium.com>
3. <http://www.trmost.ru>
4. <http://biblioclub.ru>

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства: платформа для электронного обучения Microsoft Teams, офисный пакет Microsoft Office.

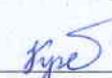
9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций требуется мультимедийная аудитория, оснащенная учебной мебелью, доской аудиторной меловой или маркерной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием и персональным компьютером с выходом в сеть Интернет.

Для проведения практических занятий требуется компьютерный класс, оснащенный учебной мебелью, доской аудиторной меловой или маркерной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием, персональными компьютерами, объединенными локальной сетью и подключенными к сети Интернет.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
Физико-технического института
по учебной работе


С.А. Креков
« 23 » 06 2021 г.

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ
Рабочая программа дисциплины
для обучающихся по направлению подготовки
03.03.02 Физика
Профиль: Фундаментальная физика
форма обучения: очная

Шастунова Ульяна Юрьевна. Тепловые двигатели. Рабочая программа дисциплины для обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика, профиль: Фундаментальная физика, форма обучения очная. Тюмень, 2021.

Рабочая программа дисциплины опубликована на сайте ТюмГУ:
<https://www.utmn.ru/sveden/education/#>.

© Тюменский государственный университет, 2021.

© Шастунова У.Ю., 2021.

1. Пояснительная записка

Дисциплина «Тепловые двигатели» состоит из 3 модулей: «Поршневые двигатели внутреннего сгорания» (модуль 1), «Теплообменные аппараты» (модуль 2), «Газотурбинные и комбинированные установки» (модуль 3).

Модуль 1. Поршневые двигатели внутреннего сгорания.

Цель модуля 1 заключается в том, чтобы вспомнить и научить решать различные теплофизические задачи, которые неизбежно будут возникать в его дальнейшей работе по специальности после окончания вуза.

Основные задачи модуля 1:

- 1) овладение студентами аналитических методов решения задач по расчетам циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания;
- 2) ознакомление студентов с особенностью термодинамики двухфазных систем (водяного пара и влажного воздуха), а также циклами паросиловых установок.

Модуль 2. Теплообменные аппараты.

Цель модуля 2 заключается в том, чтобы дать студентам необходимые знания и умения по вопросам применения основных законов распространения теплоты в пространстве для анализа и инженерного расчета процессов в современных теплообменных и теплопередающих устройствах.

Основные задачи модуля 2:

- 1) изучение студентами конструкций наиболее распространенных теплообменных аппаратов, методов их расчета и применения совместно с другими технологическими аппаратами и оборудованием;
- 2) изучение студентами конструкций и методов расчета котельного оборудования;
- 3) изучение студентами особенностей применения теплофизических уравнений в инженерной практике.

Модуль 3. Газотурбинные и комбинированные установки.

Цель освоения модуля 3 – дать студентам знания и умения моделирования, проектирования, совершенствования и эксплуатации газотурбинных и комбинированных установок (ГТиКУ) на различных этапах жизненного цикла.

Задачи освоения модуля 3:

- 1) освоение студентами современных методов проектирования;
- 2) освоение студентами методов выбора схем, циклов и параметров ГТиКУ;
- 3) изучение и приобретение умений проектирования на современном уровне компрессоров, турбин, камер сгорания, теплообменных аппаратов с применением компьютерного моделирования;
- 4) изучение студентами методов совершенствования диагностики и эксплуатации ГТиКУ;
- 5) формирование профессиональных компетенций по анализу технического состояния и методов модернизации ГТиКУ;
- 6) обеспечение потребностей рынка труда в высококвалифицированных специалистах по проектированию, исследованию и эксплуатации ГТиКУ при транспорте природного газа, в энергетике и других отраслях.

1.1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Данная дисциплина входит блок Б1 Дисциплины (модули), часть, формируемая участниками образовательных отношений.

При изучении курса используются знания, полученные студентами в курсах: «Математический анализ», «Дополнительные главы математики для физиков», «Теплообмен сложных систем», «Теплофизика», «Свойства теплообменных сред».

1.2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения данной дисциплины

Таблица 1

Код и наименование компетенции (из ФГОС ВО)	Код и наименование части компетенции	Планируемые результаты обучения: (знаниевые/функциональные)
ПК-3: способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок	–	<p>Знает</p> <ul style="list-style-type: none"> – основные понятия, определения, принципы и законы термодинамики; – классификацию теплообменных аппаратов и их конструктивные особенности; – физико-математическое описание процессов в теплообменных аппаратах; – методики инженерного расчета аппаратов различного типа и назначения; – классификацию, устройство и особенности применения котельных агрегатов, характеристики, состав и особенности применения наиболее распространенных видов органического топлива, – методы расчета основных показателей работы котлоагрегатов; – физические принципы и теплофизические процессы в ГТКУ; – современные методы термогазодинамического и прочностного расчета ГТКУ, – конструктивные особенности и режимные характеристики ГТКУ.
		<p>Умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> – правильно применять понятия, определения, принципы и законы термодинамики при анализе различных термодинамических процессов и циклов; – проводить расчет и анализ работы теплообменных аппаратов; – производить подбор необходимого типа аппарата для конкретной области применения и стыковку работы аппарата с другими звеньями технологической цепочки; – анализировать режим работы аппаратов по объективным показателям и управлять этими режимами; – производить подбор необходимого котельного оборудования и расчет основных параметров его работы, – обоснованно выбирать типы и схемы ГТКУ для различных условий применения; – разрабатывать и использовать методики термогазодинамического и прочностного расчета ГТКУ; – разрабатывать новые и использовать существующие программы автоматизированного расчета ГТКУ; – выбирать оптимальные основные параметры ГТУ по данным аналитических исследований.

2. Структура и объем дисциплины

Таблица 2

Вид учебной работы		Всего часов (академические часы)	Часов в семестре (академические часы)
			8 семестр
Общий объем	зач. ед.	4	4
	час	144	144
Из них:			
Часы контактной работы (всего):		92	92
Лекции		24	24
Практические занятия		0	0
Лабораторные / практические занятия по подгруппам		48	48
Консультации и иная контактная работа		20	20
Часы внеаудиторной работы, включая самостоятельную работу обучающегося		52	52
Вид промежуточной аттестации			экзамен

3. Система оценивания

3.1. На учебных занятиях оценивается работа студентов следующим образом:

- 3 контрольные (творческие) работы (0-12 баллов) по темам «Сдача расчета ДВС, паросиловой или холодильной установки по вариантам», «Сдача расчета "Аппарат воздушного охлаждения" (вариантная работа)», «Сдача расчетов ГТУ (по вариантам)». Студенту необходимо будет самостоятельно сделать технологический расчет теплообменных устройств. Для выполнения задания можно использовать ПО Microsoft Excel.

- Семинар по решению задач на тему «Газотурбинные комбинированные установки» (0-16 баллов).

- 3 расчетных семинара по модулю «Газотурбинные установки» (0-16 баллов каждый):

- расчет, проектирование и характеристики камер сгорания;
- расчет напряжений в лопатках, дисках, трубопроводах, корпусных деталях;
- расчет на прочность при переменных по времени напряжениях.

Преподаватель может использовать систему штрафов, уменьшая набранные баллы за пропуски занятий без уважительных причин, за нарушение сроков выполнения учебных заданий, за систематический отказ отвечать на занятиях и т.д. Возможно также начисление премиальных баллов за работы, выполненные студентом на высоком уровне.

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – экзамен. Экзамен возможно получить автоматически, при наборе:

65 баллов – оценка "удовлетворительно";

80 баллов – оценка "хорошо".

Если студент претендует на отметку "отлично", то он сдает экзамен в устной форме. Обязательным условием сдачи экзамена на "отлично" – это сдача трех творческих работ по курсу.

Студент, не посещавший 50% практических занятий, к экзамену не допускается. В ведомость автоматически проставляется "неудовлетворительно".

4. Содержание дисциплины

4.1. Тематический план дисциплины

Таблица 3

№ п/п	Наименование тем и/или разделов	Объем дисциплины, час.				
		Всего	Виды аудиторной работы (академические часы)			Консультации и иная контактная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные/ практические занятия по подгруппам	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Основные термины и понятия, параметры состояния термодинамических систем. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.	6	2	0	2	0
2.	Водяной пар.	6	2	0	2	1
3.	Паросиловые установки.	8	2	0	4	1
4.	Циклы холодильных установок.	8	0	0	4	2
5.	Теоретические основы расчета теплообменных аппаратов.	10	2	0	4	1
6.	Характеристики аппаратов воздушного охлаждения, области и особенности их применения в газовой промышленности.	10	2	0	4	2
7.	Испарители и конденсаторы. Особенности расчета теплообмена в многофазных средах.	10	2	0	4	1
8.	Классификация и назначение котельных агрегатов, их конструкции.	10	2	0	4	1
9.	Современный уровень развития и перспективные типы ГТКУ. Направления развития ГТУ.	6	2	0	0	1

10.	Расчет, проектирование и характеристики теплообменных аппаратов ГТиКУ.	10	0	0	4	1
11.	Системы охлаждения ГТУ.	8	2	0	0	1
12.	Расчет, проектирование и характеристики камер сгорания.	10	0	0	4	1
13.	Режимные параметры и характеристики ГТиКУ.	10	2	0	4	1
14.	Автоматизированное проектирование ГТУ.	10	0	0	4	1
15.	Прочность турбомашин.	6	2	0	0	1
16.	Эксплуатация ГТиКУ. Ремонт и модернизация ГТУ.	8	0	0	4	1
17.	Диагностика ГТУ.	6	2	0	0	1
18.	Экзамен	2	0	0	0	2
	Итого (часов)	144	24	0	48	20

4.2. Содержание дисциплины по темам

Тема 1. Основные термины и понятия, параметры состояния термодинамических систем. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Первое начало (первый закон) термодинамики. Принцип построения термодинамики. Термодинамическая система и рабочее тело. Параметры состояния. Уравнения состояния. PV-диаграмма. Первое начало (первый закон) термодинамики. Внутренняя энергия и внешняя работа. Энтальпия. Техническая работа при движении потока газа (уравнение первого закона термодинамики для потока).

Понятие политропного процесса, как наиболее общего вида процессов. Частные случаи: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный процесс. Круговые процессы.

Индикаторные диаграммы и циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Понятие термического КПД. Источники тепла. Холодильный коэффициент. Цикл и теорема Карно. Цикл Отто. Цикл Дизеля. Цикл Тринклера. Сравнение термического КПД циклов Отто, Дизеля и Тринклера.

Тема 2. Водяной пар.

Общие положения. Сухой насыщенный пар. Влажный насыщенный пар. Перегретый пар. Энтропия. Энтропийные диаграммы для влажного пара. Процессы изменения состояния водяного пара.

Тема 3. Паросиловые установки.

Циклы паросиловых установок. Теплофикационный цикл. Регенеративный цикл. Бинарный цикл.

Расчеты газовых циклов поршневых ДВС. Определение термодинамических параметров в основных и промежуточных точках цикла, определение средних теплоемкостей, работы, теплоты и изменения функций состояния в процессах, расчет КПД цикла, построение изображения цикла.

Тема 4. Циклы холодильных установок.

Цикл воздушной холодильной установки. Цикл паровой компрессорной установки.

Проведение на практическом занятии контрольной работы № 1. Выполняется самостоятельно и индивидуально с использованием методических указаний.

Примерные задания для контрольной работы № 1:

1. Провести расчет термодинамического цикла ДВС;
2. Провести расчет паросиловой установки;
3. Провести расчет холодильной установки.

Тема 5. Теоретические основы расчета теплообменных аппаратов.

Уравнение теплопередачи и теплового баланса. Конвективный теплообмен, критерии подобия, критериальные уравнения, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, водяные эквиваленты поверхности теплопередачи и теплоносителя.

Особенности теплообмена ребристых поверхностей. Уравнение теплопроводности стержня бесконечной и конечной длины, избыточная температура, избыточная безразмерная температура, параметр ребра (стержня).

Классификация теплообменных аппаратов. Аппараты объемные и поверхностные, регенераторы и рекуператоры, типы поверхностей по наличию или отсутствию оребрения. Схемы течения теплоносителей в аппаратах. Аппараты кожухотрубчатые и «труба в трубе». Аппараты воздушного охлаждения горизонтальные, вертикальные и зигзагообразные.

Тема 6. Характеристики аппаратов воздушного охлаждения, области и особенности их применения в газовой промышленности.

Коэффициенты оребрения поверхности и теплопередачи, площади теплопередающих поверхностей и другие геометрические характеристики. Необходимость применения АВО для охлаждения газа и масла на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Вентиляторы АВО и их характеристики.

Температура газа на выходе из компрессорной станции и ее изменение по длине газопровода, температура наружного воздуха и ее влияние на процесс теплопередачи, влияние расхода газа и температуры грунта на режим работы АВО. Коэффициент энергетической эффективности АВО.

Методика расчета АВО. Исходные данные, свойства теплоносителей, их расходы и температуры, среднелогарифмический температурный напор, индексы противоточности для различных схем течения, последовательность расчета.

Пример расчета АВО. Задание численных значений температур, расходов и теплофизических свойств теплоносителей, выбор конструкции и назначения аппарата, проведение численного расчета.

Оценка влияния температур и расходов теплоносителей на режим работы теплообменника. Глубина охлаждения. Номограмма совместной работы АВО и газопровода.

Проведение контрольной работы № 2 «Расчет аппарата воздушного охлаждения». Выполняется самостоятельно и индивидуально согласно методическим указаниям».

Тема 7. Испарители и конденсаторы. Особенности расчета теплообмена в многофазных средах.

Критериальные уравнения теплообмена с учетом фазовых переходов при испарении и конденсации. Капельная и пленочная конденсация. Механизм кипения на поверхности и в объеме, кризис кипения. Влияние режима стекания пленки конденсата и формы пучка труб на процесс конденсации.

Тема 8. Классификация и назначение котельных агрегатов, их конструкции.

Классификация и назначение котельных агрегатов, их конструкции. Водогрейные и паровые котлы, барабанные, прямоточные и с принудительной многократной циркуляцией,

деление котлов на группы по паропроизводительности и давлению. Особенности конструкций в зависимости от вида топлива.

Виды органических топлив, их характеристики и особенности сжигания. Элементный состав топлив. Формула Менделеева. Твердое, жидкое и газообразное топливо, их влажность, зольность, высшая и низшая теплота сгорания, рабочая, сухая и горючая масса. Вихревые, слоевые, мазутные и газовые топki, горелки и форсунки. Перспективные способы сжигания топлив.

Энтальпия продуктов сгорания, конвективный теплообмен в котлоагрегате. Уравнения для расчета объема продуктов сгорания, теоретически необходимого объема воздуха, теплоемкости и энтальпии продуктов сгорания. Поправочные коэффициенты, учитывающие расположение труб в пучке и его положение в пространстве.

Расчет котельного аппарата.

Тема 9. Современный уровень развития и перспективные типы ГТиКУ. Направления развития ГТУ.

Современные типы, конструктивные схемы, циклы и процессы в нефтегазовом комплексе, энергетике, авиации, на транспорте, в космических системах, жилищно-коммунальном хозяйстве. Параметры современных и перспективных ГТиКУ. Научные исследования в области совершенствования ГТиКУ, их узлов и систем.

Повышение температуры газа перед турбиной – магистральное направление развития ГТУ. Оптимизация степени сжатия в высокотемпературных ГТУ. Аэродинамическое совершенствование проточной части. Анализ перспективных параметров ГТУ усложненного цикла (с промежуточным воздухоохладителем, с камерой сгорания промежуточного подогрева газа, с регенератором). Анализ перспективных параметров паротурбинных, дизельных и комбинированных установок. Парогазовые и газопаровые установки.

Аэродинамические модели квазиодномерной теории турбомашин. Теория плоских решеток. Теория пограничного слоя. Осесимметричные течения в турбомашинах. Вторичные течения в турбомашинах. Трехмерные модели турбулентного течения в турбомашинах (однопараметрические, двухпараметрические, трехпараметрические модели турбулентности).

Тема 10. Расчет, проектирование и характеристики теплообменных аппаратов ГТиКУ.

Современная теория и конструкции теплообменных аппаратов ГТиКУ. Сравнительная эффективность поверхностей теплообмена. Выбор оптимальных скоростей теплоносителей. Методики теплогидравлического расчета теплообменных аппаратов типа «жидкость – газ», «газ-газ». Теплообменные аппараты ГТиКУ с процессами фазового перехода. Техно-экономическая оптимизация теплообменных аппаратов. Проблемы эксплуатации теплообменных аппаратов.

Тема 11. Системы охлаждения ГТУ.

Открытые, замкнутые и полужамкнутые системы охлаждения. Воздушные, паровые, жидкостные системы охлаждения. Комплексная проблема совершенствования систем охлаждения. Охлаждение лопаток, дисков, корпусных деталей. Методики расчета тепломассобмена при внешнем обтекании поверхностей. Теплогидравлический расчет течений охладителя во внутренних каналах. Критерии эффективности охлаждаемых турбин.

Тема 12. Расчет, проектирование и характеристики камер сгорания.

Основные принципы совершенствования камер сгорания. Требования, предъявляемые при проектировании камер сгорания. Основы теории горения в камере сгорания. Системы подачи топлива. Уравнения материального и теплового баланса в камере сгорания. Экспериментальные характеристики камер сгорания. Моделирование трехмерных турбулентных течений в камерах сгорания. Доводка и эксплуатация камер сгорания.

Тема 13. Режимные параметры и характеристики ГТиКУ.

Виды характеристик узлов ГТиКУ. Интегральные характеристики ГТиКУ. Критерии подобия при построении характеристик. Методы расчетно-экспериментального построения характеристик узлов и установок в целом. Построение характеристик узлов по данным испытаний на стендах. Метод построения характеристик узлов по данным диагностики при натурных испытаниях и эксплуатации. Расчет характеристик одновальных, двухвальных и трехвальных ГТУ. Влияние параметров наружного воздуха на характеристики ГТУ.

Тема 14. Автоматизированное проектирование ГТУ.

Инженерные методики расчета напряжений в лопатках, дисках, трубопроводах, корпусных деталях. Расчет на прочность при переменных по времени напряжениях. Долговечность подшипников турбомашин. Резонансные явления в турбомашинах. Современные программные комплексы для расчета напряженно-деформированного состояния лопаток, дисков, корпусов.

Тема 15. Прочность турбомашин.

Теории прочности и надежности. Виды прочностных расчетов лопаток, дисков, корпусных деталей. Математические модели теории упругости, пластичности, усталости. Прочностные свойства конструкционных материалов. Методы нанесения упрочняющих покрытий.

Тема 16. Эксплуатация ГТиКУ. Ремонт и модернизация ГТУ.

Научные основы эксплуатации ГТиКУ. Показатели режима работы ГТУ на примере эксплуатации газоперекачивающих агрегатов. Особенности эксплуатации тепломеханического оборудования. Мониторинг технического состояния установок. Технологические задачи при эксплуатации. Регулирование турбомашин. Эксплуатационные показатели ГТУ. Энергоресурсосбережение при эксплуатации ГТиКУ.

Методы и средства эксплуатационного контроля оборудования. Виды ремонта, методы ремонта. Регламентные работы. Определение графиков ремонта по данным диагностики технического состояния оборудования. Организация ремонта на предприятии. Показатели качества ремонта. Модернизация оборудования в условиях ремонтного предприятия.

Проведение контрольной работы № 3. Выполняется самостоятельно и индивидуально согласно методическим указаниям.

Примерные задания для контрольной работы № 3:

1. Провести расчет термодинамического цикла и выбрать оптимальные параметры ГТУ простейшей тепловой схемы. Изучить конструкцию компрессора низкого давления.
2. Провести расчет термодинамического цикла и выбрать оптимальные параметры ГТУ с промежуточным воздухоохладителем. Изучить конструкцию теплообменного аппарата ГТУ.
3. Провести расчет термодинамического цикла и выбрать оптимальные параметры регенеративной ГТУ. Изучить конструкцию регенератора ГТУ.
4. Провести расчет термодинамического цикла и выбрать оптимальные параметры ГТУ с промежуточным подогревом газа. Изучить конструкцию камеры сгорания ГТУ.
5. Провести расчет термодинамического цикла и выбрать оптимальные параметры ГТУ с промежуточным воздухоохладителем и промежуточной камерой сгорания.
6. Рассчитать и спроектировать узел «Промежуточный воздухоохладитель ГТУ для энергетической ГТУ».
7. Провести расчетный анализ и проработать элементы системы охлаждения турбины высокого давления приводной ГТУ.

Тема 17. Диагностика ГТУ.

Виды диагностики ГТиКУ. Термогазодинамическая диагностика. Расчетные термогазодинамические модели ГТУ, используемые при диагностике. Дифференциальная термогазодинамическая диагностика узлов ГТУ. Вибродиагностика. Трибодиагностика. Диагностика ГТиКУ по комплексу показателей. Особенности автоматизированных диагностических систем при приемо-сдаточных испытаниях и в условиях эксплуатации.

5. Учебно-методическое обеспечение и планирование самостоятельной работы обучающихся

Таблица 4

№ темы	Темы	Формы СРС, включая требования к подготовке к занятиям
1.	Основные термины и понятия, параметры состояния термогазодинамических систем. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
2.	Водяной пар.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
3.	Паросиловые установки.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
4.	Циклы холодильных установок.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
5.	Теоретические основы расчета теплообменных аппаратов.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
6.	Характеристики аппаратов воздушного охлаждения, области и особенности их применения в газовой промышленности.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
7.	Испарители и конденсаторы. Особенности расчета теплообмена в многофазных средах.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
8.	Классификация и назначение котельных агрегатов, их конструкции.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
9.	Современный уровень развития и перспективные типы ГТиКУ. Направления развития ГТУ.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой.
10.	Расчет, проектирование и характеристики теплообменных аппаратов ГТиКУ.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
11.	Системы охлаждения ГТУ.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Подготовка к контрольным (творческим) работам).

12.	Расчет, проектирование и характеристики камер сгорания.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
13.	Режимные параметры и характеристики ГТКУ.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
14.	Автоматизированное проектирование ГТУ.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
15.	Прочность турбомашин.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
16.	Эксплуатация ГТКУ. Ремонт и модернизация ГТУ.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой. Решение задач. Подготовка к контрольным (творческим) работам).
17.	Диагностика ГТУ.	Проработка лекций. Работа с основной и дополнительной литературой.

6. Промежуточная аттестация по дисциплине

6.1. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине

Экзамен проводится в устной форме по следующему алгоритму:

1. письменный ответ на билет, содержащий три вопроса, по одному из каждого модуля;
2. беседа с преподавателем на письменный ответ на билет (10-15 минут).

Ответы на экзаменационный билет оцениваются по следующим критериям:

"отлично" – студент дал полный ответ на теоретические вопросы, продемонстрировал взаимосвязь теоретических основ изучаемой дисциплины и практики;

"хорошо" – студент показал систематические знания по дисциплине, но имеются недочеты в ответах;

"удовлетворительно" – студент имеет представления об основных понятиях изучаемой дисциплины и применении их в практике, недостаточно владеет теоретическими основами, в ответах допускает ошибки, которые может исправить под руководством преподавателя;

"неудовлетворительно" – студент не имеет систематических знаний в области изучаемой дисциплины, слабо разбирается в практических вопросах и др., допускает принципиальные ошибки в ответах.

Примерные вопросы для подготовки к экзамену:

Модуль 1

1. Принцип построения термодинамики. Термодинамическая система и рабочее тело. Параметры состояния. Уравнения состояния. Первое начало (первый закон) термодинамики. Внутренняя энергия и внешняя работа.

2. Энтальпия.

3. Техническая работа при движении потока газа (равнение первого закона термодинамики для потока).

4. Циклы. Понятие термического КПД. Источники тепла. Холодильный коэффициент.

5. Цикл и теорема Карно.

6. Цикл Отто.

7. Цикл Дизеля.

8. Цикл Тринклера. Сравнение термического КПД циклов Отто, Дизеля и Тринклера.

9. Второй закон термодинамики. Принцип существования и принцип возрастания энтропии.

10. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Формулировки второго закона термодинамики.
11. Объединенные уравнения первого и второго законов термодинамики. Третий закон термодинамики.
12. Цикл и схема простейшей ГТУ.
13. Схема и цикл поршневого одноступенчатого компрессора.
14. Схема и цикл многоступенчатого компрессора.
15. Схема и цикл ПГУ.
16. Схема и цикл воздушной холодильной установки.
17. Основные термодинамические процессы.
18. Политропный процесс, понятие показателя политропы.

Модуль 2

1. Составляющие уравнения теплового баланса теплообменного аппарата.
2. Вывод уравнения коэффициента теплопередачи для стенки произвольной формы.
3. Физический смысл членов уравнения теплового баланса теплообменного аппарата.
4. Вывод уравнения теплопроводности стержня (ребра) конечной длины
5. Физический смысл параметра ребра (стержня) и возможности регулирования теплообмена ребренной поверхности
6. Классификация теплообменных аппаратов.
7. Конструкции теплообменных аппаратов.
8. Характеристики АВО.
9. Принцип работы АВО, основные параметры, влияющие на эффективность охлаждения.
10. Задание исходных данных для расчета АВО.
11. Порядок расчета АВО.
12. Совместная работа АВО и газопровода.
13. Оптимизация режимов работы АВО в зависимости от режима работы газопровода.
14. Механизм процесса кипения, теплообмен при кипении.
15. Механизм процесса конденсации, теплообмен при конденсации.
16. Конструкции кожухотрубчатых теплообменных аппаратов.
17. Методы и границы регулирования режимов работы теплообменных аппаратов.
18. Принципы подбора теплообменных аппаратов и их место в технологических цепочках.
19. Классификация котельных агрегатов.
20. Основные показатели работы котельных агрегатов.
21. Устройство водогрейных котлов.
22. Устройство паровых котлов.
23. Твердое топливо и его характеристики.
24. Жидкое топливо и его характеристики.
25. Газообразное топливо и его характеристики.
26. Способы сжигания твердых топлив.
27. Способы сжигания жидких и газообразных топлив.
28. Расчет объема продуктов сгорания топлива.
29. Расчет энтальпии продуктов сгорания топлива.
30. Состав продуктов сгорания топлива, защита окружающей среды.
31. Лучистый теплообмен в газовой среде, средняя длина пути луча.
32. Степень черноты продуктов сгорания топлива, зависимость от давления и температуры.
33. Уравнение теплового баланса котельного агрегата.
34. Физическая и химическая неполнота сгорания топлива.
35. Расчет потерь тепла с продуктами сгорания.

36. Расчет потерь тепла при золо-шлакоудалении.
37. Нетто и брутто КПД котельных агрегатов.
38. Расход топлива котельных агрегатов и влияние на него различных факторов.
39. Принципы подбора котельного оборудования для конкретных потребителей.
40. Методы энергосбережения при эксплуатации котельных агрегатов.

Модуль 3

1. Параметры, циклы и схемы современных ГТКУ.
2. Направление совершенствования ГТКУ.
3. Влияние температуры перед турбиной на КПД и мощность ГТУ.
4. Оптимизация степени сжатия в ГТУ.
5. ГТУ с охлаждением в процессе сжатия.
6. Регенеративные ГТУ.
7. ГТУ с подогревом в процессе расширения.
8. Парогазовые установки.
9. Газопаровые установки.
10. Модели течения в компрессорах.
11. Модели течения в турбинах.
12. Теория плоских решеток.
13. Осесимметричные течения в турбомашин.
14. Квазиодномерная теория турбомашин.
15. Численные методы расчета турбомашин.
16. Теплообменные аппараты ГТКУ.
17. Системы охлаждения ГТКУ.
18. Камеры сгорания ГТКУ.
19. Прочность элементов ГТКУ.
20. Диагностика ГТКУ.
21. Эксплуатация ГТКУ.
22. Вспомогательные системы ГТУ.
23. Ремонт и модернизация ГТУ.
24. Характеристики узлов ГТУ.
25. Характеристики приводных ГТУ.

6.2. Критерии оценивания компетенций:

Таблица 5

Карта критериев оценивания компетенций

№ п/п	Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенций, соотнесенные с планируемыми результатами обучения	Оценочные материалы	Критерии оценивания
1.	ПК-3: способен формировать новые направления научных исследований и опытно-конструкторских разработок	<p>Пороговый уровень освоения ОП (удовл.):</p> <p><i>Знает:</i> основные понятия, определения, принципы и законы термодинамики; классификацию теплообменных аппаратов и их конструктивные особенности; классификацию, устройство и особенности применения котельных агрегатов, характеристики, состав и особенности применения наиболее распространенных видов органического топлива, физические принципы и теплофизические процессы в ГТиКУ.</p> <p><i>Умеет:</i> правильно применять понятия, определения, принципы и законы термодинамики при анализе различных термодинамических процессов и циклов.</p> <p>Базовый уровень (хор.):</p> <p><i>Знает:</i> физико-математическое описание процессов в теплообменных аппаратах; методы расчета основных показателей работы котлоагрегатов; современные методы термогазодинамического и прочностного расчета ГТиКУ.</p> <p><i>Умеет:</i> проводить расчет и анализ работы теплообменных аппаратов; производить подбор необходимого котельного оборудования и расчет основных параметров его работы; обоснованно выбирать типы и схемы ГТиКУ для различных условий применения; использовать методики термогазодинамического и прочностного расчета</p>	Решение задач, контрольные (творческие) работы, экзамен	Правильность расчетов, выполненные в рамках контрольных (творческих) работ; правильность приведенных формул; способность обосновать приведенное решение; демонстрация знаний требований и стандартов при расчете различных устройств; правильность решения задач, инициативность и активность на практических занятиях; способность предлагать нестандартные решения задач; ссылки на источники информации. Экзамен: правильность ответов на вопросы, ссылки на дополнительные источники при ответе. Правильность решения задачи; приведение всех необходимых формул.

		<p>ГТиКУ; использовать существующие программы автоматизированного расчета ГТиКУ.</p> <p>Повышенный уровень (отл.): Знает: методики инженерного расчета аппаратов различного типа и назначения; конструктивные особенности и режимные характеристики ГТиКУ. Умеет: производить подбор необходимого типа аппарата для конкретной области применения и стыковку работы аппарата с другими звеньями технологической цепочки; анализировать режим работы аппаратов по объективным показателям и управлять этими режимами; разрабатывать методики термодинамического и прочностного расчета ГТиКУ; разрабатывать новые программы автоматизированного расчета ГТиКУ; выбирать оптимальные основные параметры ГТУ по данным аналитических исследований.</p>		
--	--	--	--	--

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Основная литература:

Прокопенко, Н.И. Экспериментальные исследования двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие / Н.И. Прокопенко. — Санкт-Петербург: Лань, 2010. — 592 с. — ISBN 978-5-8114-1047-7. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/611> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

7.2. Дополнительная литература:

1. Боруш О.В. Общая энергетика. Энергетические установки: учебное пособие / Боруш О.В., Григорьева О.К. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2017. — 96 с. — ISBN 978-5-7782-3430-7. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91283.html> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

2. Боруш О.В. Парогазовые установки: учебное пособие / Боруш О.В., Григорьева О.К. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3074-3. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91651.html> (дата обращения: 12.05.2021). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

7.3. Интернет-ресурсы:

1. Образовательные ресурсы «Единое окно» <http://window.edu.ru/window/library>
2. Справочники и энциклопедии по физике <http://www.all-fizika.com/>

7.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

1. <https://e.lanbook.com>
2. <https://znanium.com>
3. http://www.trmost.ru/lib-main.shtml?all_books
4. <http://biblioclub.ru>

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

– Лицензионное ПО, в том числе отечественного производства:

платформа для электронного обучения Microsoft Teams, офисный пакет Microsoft Office.

9. Технические средства и материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций требуется мультимедийная аудитория, оснащенная учебной мебелью, доской аудиторной меловой или маркерной, мультимедийным проекционным и акустическим оборудованием и персональным компьютером с выходом в сеть Интернет.

Для проведения практических занятий требуется учебная аудитория, оснащенная учебной мебелью и доской аудиторной меловой или маркерной.