

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»



УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета радиотехники и электроники

Небольсин В.А.

«31» августа 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

дисциплины

«Физика низких температур»

Направление подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Профиль Техника и физика низких температур

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2021

Автор программы

/Авдеев М.А./

Заведующий кафедрой  
Физики твердого тела

/Калинин Ю.Е./

Руководитель ОПОП

/Калядин О.В./

Воронеж 2021

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цели дисциплины

обеспечение учащихся базовыми знаниями в области физики низких температур, способствующими налаживанию связи между курсами общепрофессиональных дисциплин и специальных технических дисциплин

### 1.2. Задачи освоения дисциплины

- изучение общих вопросов физики конденсированного вещества;
- изучение строения и свойств кристаллических твердых тел с упором на область низких температур;
- ознакомление с особенностями строения и свойств аморфных твердых тел с упором на область низких температур;
- ознакомление с особенностями строения и свойств низкотемпературных жидкостей с упором на квантовые жидкости;
- изучение принципов и методов получения низких и сверхнизких температур

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Физика низких температур» относится к дисциплинам обязательной части блока Б1.

## 3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Физика низких температур» направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-1 - Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ОПК-1	знать современные теоретические представления и подходы к описанию строения и свойств конденсированных веществ и кристаллических твердых тел в частности; внутреннюю структуру твердых тел; свойства твердых тел при низких температурах; особенности строения и свойств низкотемпературных жидкостей и квантовых жидкостей в частности; принципы и методы получения низких и сверхнизких температур
	уметь использовать базовые знания физики низких температур в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
	владеть навыками использования базовых знаний физики

	низких температур в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Физика низких температур» составляет 5 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий  
**очная форма обучения**

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры	
		4	5
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	72	36	36
<b>В том числе:</b>			
Лекции	36	18	18
Практические занятия (ПЗ)	36	18	18
<b>Самостоятельная работа</b>	72	36	36
Часы на контроль	36	-	36
Виды промежуточной аттестации - экзамен, зачет	+	+	+
Общая трудоемкость:			
академические часы	180	72	108
зач.ед.	5	2	3

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

**5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий**  
**очная форма обучения**

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	СРС	Всего, час
1	Общие вопросы физики конденсированного вещества	Основные свойства конденсированного вещества. Процесс зарождения конденсированного вещества. Классификация конденсированных сред. Масштабы и размерность объектов физики конденсированного состояния. Классификация свойств и явлений в конденсированных средах.	2	2	4	8
2	Элементы физической статистики	Основы физики микрочастиц. Способы описания состояния макроскопической системы (коллектива). Невырожденные и вырожденные коллективы. Число состояний для микрочастиц. Функция распределения для невырожденного газа. Функция распределения для вырожденного газа фермионов. Функция распределения для вырожденного газа бозонов. Правила статистического усреднения.	2	2	4	8
3	Взаимодействия микрочастиц в веществе. Силы связи в	Силы Ван-дер-Ваальса. Ионная связь. Ковалентная связь. Металлическая связь. Водородная связь. Сопоставление различных видов связи. Силы	2	2	4	8

	конденсированных веществах	отталкивания.				
4	Элементы кристаллографии и	Кристаллическая решетка. Решетки Бравэ и с базисом. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристаллах (индексы Миллера). Классификация тел по кристаллическим структурам. Элементы симметрии в кристаллах, трансляционная симметрия, ячейка Вигнера–Зейтца. Явление полиморфизма. Классификация твердых тел по кристаллографической симметрии. Периодические функции для трансляционных векторов. Обратная решетка и ее свойства. Дефекты и диффузия в твердых телах.	4	4	8	16
5	Кристаллические твердые тела. Механические свойства твердых тел	Элементарный закон Гука. Тензоры напряжений и деформаций и закон Гука для анизотропных твердых тел. Пластические свойства кристаллов. Деформация скольжением и двойникованием. Хрупкое разрушение. Твердость. Механические свойства твердых тел при низких температурах: Прочность металлов на растяжение при низких температурах. Металлы, которые остаются пластичными при низких температурах. Предел прочности.	2	2	4	8
6	Кристаллические твердые тела. Некоторые вопросы динамики кристаллической решетки	Гармоническое приближение. Понятие о нормальных колебаниях решетки. Колебания атомов трехмерной решетки. Спектр нормальных колебаний решетки. Понятие о фононах. Ангармонизм колебаний атомов.	2	2	4	8
7	Кристаллические твердые тела. Тепловые свойства	Теплоемкость твердого тела. Энергия тепловых колебаний решетки. Теплоемкость электронного газа. Тепловое расширение твердых тел. Теплопроводность твердых тел.	4	4	8	16
8	Кристаллические твердые тела. Электрические свойства	Элементы зонной теории твердых тел. Дрейф электронов под действием внешнего поля. Время релаксации и длина свободного пробега. Удельная электропроводность проводника. Электропроводность невырожденного и вырожденного газов. Закон Видемана — Франца — Лоренца. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры. Влияние температуры на электропроводность чистых металлов. Электропроводность сплавов	4	4	8	16
9	Кристаллические твердые тела. Магнитные свойства	Магнитное поле в твердых телах. Природа диамагнетизма, парамагнетизма, ферромагнетизма. Антиферромагнетизм. Ферримагнетизм. Магнитный резонанс. Ядерное магнитное упорядочивание. Отрицательные спиновые температуры	4	4	8	16
10	Аморфные твердые тела	Структура аморфных твердых тел. Энергетический спектр некристаллических твердых тел. Дефекты в аморфных материалах. Аморфные полупроводники, диэлектрики, металлы. Свойства и применение некоторых аморфных материалов при низких температурах.	2	2	4	8
11	Низкотемперат	Макроструктура и микроструктура	4	4	8	16

	урные жидкости. Квантовые жидкости	жидкостей. Двухфазное состояние жидкость — газ. Основные низкотемпературные жидкости, их особенности. Квантовые жидкости: Основные свойства гелия. Сверхтекучая жидкость гелия-4. Нормальная жидкость гелия-3. Сверхтекучая жидкость гелия-3. Смешивание гелия-3 и гелия-4.				
12	Получение низких и сверхнизких температур	Термодинамические принципы, лежащие в основе процессов получения низких и сверхнизких температур. Адиабатная откачка паров кипящей жидкости. Адиабатное барботирование ненасыщенных газов через жидкость. Процессы охлаждения, основанные на использовании свойств жидкого гелия: Охлаждение растворением гелия-3 в гелии-4. Охлаждение адиабатной кристаллизацией (метод Померанчука). Процессы охлаждения с использованием рабочей среды в твердом состоянии: Адиабатное размагничивание парамагнитных солей. Адиабатное ядерное размагничивание. Десорбционное охлаждение.	4	4	8	16
<b>Итого</b>			<b>36</b>	<b>36</b>	<b>72</b>	<b>144</b>

## 5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

## 6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

## 7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания**

### 7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ОПК-1	знать современные теоретические представления и подходы к описанию строения и свойств конденсированных веществ и кристаллических	Активная работа на практических занятиях; выполнение заданий текущего контроля успеваемости в тестовой форме	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	твердых тел в частности; внутреннюю структуру твердых тел; свойства твердых тел при низких температурах; особенности строения и свойств низкотемпературных жидкостей и квантовых жидкостей в частности; принципы и методы получения низких и сверхнизких температур			
	уметь использовать базовые знания физики низких температур в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть навыками использования базовых знаний физики низких температур в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

### 7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 4, 5 семестре для очной формы обучения по двух/четырёхбалльной системе:

«зачтено»

«не зачтено»

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Зачтено	Не зачтено
ОПК-1	знать современные теоретические представления и подходы к описанию строения и свойств конденсированных	Устный опрос	Удовлетворительный устный ответ	Неудовлетворительный устный ответ

	веществ и кристаллических твердых тел в частности; внутреннюю структуру твердых тел; свойства твердых тел при низких температурах; особенности строения и свойств низкотемпературных жидкостей и квантовых жидкостей в частности; принципы и методы получения низких и сверхнизких температур			
	уметь использовать базовые знания физики низких температур в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	Решение стандартных практических задач	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками использования базовых знаний физики низких температур в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

ИЛИ

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ОПК-1	знать современные	Устный опрос	Дан отличны	Дан хороший	Дан удовлетворительн	Дан неудовлетворительн

	теоретически е представлени я и подходы к описанию строения и свойств конденсирова нных веществ и кристалличес ких твердых тел в частности; внутреннюю структуру твердых тел; свойства твердых тел при низких температурах ; особенности строения и свойств низкотемпера турных жидкостей и квантовых жидкостей в частности; принципы и методы получения низких и сверхнизких температур		й ответ в рамках устного опроса	ответ в рамках устного опроса	ый ответ в рамках устного опроса	ый ответ в рамках устного опроса
	уметь использовать базовые знания физики низких температур в профессиона льной деятельности, применять методы математическ ого анализа и моделирован ия, теоретическо го и эксперимента льного исследования	Решение стандартны х практическ их задач	Задачи решены в полном объеме и получен ы верные ответы	Продемонст р ирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстр ирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть навыками использовани я базовых знаний физики	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получен ы верные	Продемонст р ирован верный ход решения всех, но не получен	Продемонстр ирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены



	низких температур в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования		ответы	верный ответ во всех задачах		
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--------	------------------------------	--	--

## 7.2 Примерный перечень оценочных средств ( типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

### 7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

#### Вопрос 1

В отсутствие электрического поля вырожденный электронный газ в проводнике находится в равновесном состоянии и описывается равновесной функцией распределения

- а) Максвелла — Больцмана
- б) Бозе — Эйнштейна
- в) Гиббса
- г) Ферми — Дирака

#### Вопрос 2

В отсутствие электрического поля невырожденный электронный газ в проводнике находится в равновесном состоянии и описывается равновесной функцией распределения

- а) Максвелла — Больцмана
- б) Бозе — Эйнштейна
- в) Гиббса
- г) Ферми — Дирака

#### Вопрос 3

Направленное движение электронов в проводнике под действием приложенного к проводнику электрического поля называется

- а) дрейфом
- б) потоком
- в) скольжением
- г) рассеянием

#### Вопрос 4

Подвижность носителей (электронов, дырок) прямо пропорциональна

- а) времени релаксации
- б) эффективной массе
- в) постоянной решетки
- г) среди перечисленных вариантов нет правильных вариантов ответа

### **Вопрос 5**

Переход электронного газа от направленного движения под действием электрического поля к равновесному состоянию после выключения этого поля называется

- а) релаксацией
- б) стабилизацией
- в) упорядочением
- г) дрейфом

### **Вопрос 6**

За время, равное времени релаксации, скорость направленного движения электронов после выключения поля уменьшается

- а) в 2 раза
- б) в  $e$  раз
- в) в  $\pi$  раз
- г) в 10 раз

### **Вопрос 7**

Для невырожденного электронного газа удельная электропроводность определяется

- а) средними величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения
- б) величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения, характерными для электронов, обладающих энергией, практически равной энергии Ферми
- в) максимальными величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения
- г) величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения, характерными для электронов, обладающих наименьшей энергией

### **Вопрос 8**

Для вырожденного электронного газа удельная электропроводность определяется

- а) средними величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения
- б) величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения, характерными для электронов, обладающих энергией, практически равной энергии Ферми
- в) максимальными величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения
- г) величинами длины свободного пробега, числа столкновений и скорости движения, характерными для электронов, обладающих наименьшей энергией

### **Вопрос 9**

Закон Видемана — Франца — Лоренца устанавливает связь между

- а) электропроводностью и электронной теплопроводностью твердых тел
- б) фононной и электронной теплопроводностью твердых тел
- в) электропроводностью твердых тел и концентрацией дефектов решетки
- г) электропроводностью и электрическим сопротивлением твердых тел

## Вопрос 10

Согласно закону Видемана — Франца — Лоренца отношение электронной теплопроводности твердого тела к электропроводности пропорционально

- а)  $T^{-1}$
- б)  $T^{1/2}$
- в)  $T$
- г)  $T^2$

### 7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

#### Задача 1

Оценить максимальную частоту колебаний атомов меди. Дополнительные данные: для Cu характерна решетка ГЦК, модификаций нет; модуль Юнга равен 125 ГПа, плотность  $\rho = 8,96 \text{ г/см}^3$ , атомный металлический радиус составляет 0,128 нм.

#### Задача 2

Молярная теплоемкость титана при комнатной температуре равна 25,1 Дж/(моль·К). Чему равна теплоемкость в расчете на одну частицу?

#### Задача 3

Оцените температуру Кюри ферромагнетика, если магнитный момент атома равен  $2\mu_B$  ( $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ), постоянная Вейсса 1000, число атомов в единице объема  $8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

#### Задача 4

Чему равна удельная намагниченность материала, если намагниченность составляет 400 кА/м, а плотность –  $7,5 \text{ г/см}^3$ ?

#### Задача 5

Каково значение размагничивающего поля, если внешнее магнитное поле напряженностью 10 кА/м, ориентированное перпендикулярно плоскости тонкой ферромагнитной пленки, создает магнитную индукцию 0,4 Тл?

#### Задача 6

Рассчитайте, используя известные закономерности, удельную электропроводность железа, если его теплопроводность при комнатной температуре составляет 67 Вт/(м × К).

#### Задача 7

Удельное электрическое сопротивление металлической нанопроволоки изменилось на 30 % при уменьшении диаметра проволоки от 20 до 15 нм. Оцените длину свободного пробега электрона в массивном материале.

#### Задача 8

Оцените скорость звука в стали, если модуль Юнга равен 210 ГПа, а плотность составляет  $7,8 \text{ г/см}^3$ .

#### Задача 9

Кинетическая энергия  $E_k$  электрона в атоме водорода составляет порядка 10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные размеры атома.

#### Задача 10

Приняв, что электрон находится внутри атома диаметром 0,4 нм, требуется

найти (в электрон-вольтах) неопределенность энергии данного электрона.

### **7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач**

#### **Задача 1**

Оценить решеточную молярную теплоемкость алюминия при значениях температуры 2 и 700 К.

#### **Задача 2**

Оценить различными методами температуру Дебая для алюминия. Дополнительные данные: для Al характерна решетка ГЦК, модификаций нет; модуль Юнга равен 72 ГПа, температура плавления равна 933 К, молярная масса  $M = 27$  г/моль, плотность  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup>, атомный металлический радиус составляет 0,143 нм.

#### **Задача 3**

Оценить длину свободного пробега фононов для низких значений температуры, много ниже температуры Дебая, для металла (металлический радиус составляет 0,2 нм, ОЦК решетка) с атомной долей примесей, равной 0,1 %, для металла с плотностью дислокаций  $10^6$  см/см<sup>3</sup>, для монокристалла со средним размером грани 10 нм.

#### **Задача 4**

При какой температуре электронная и решеточная составляющие теплоемкости серебра равны друг другу, если коэффициент электронной теплоемкости равен  $6,8 \cdot 10^{-4}$  Дж/(моль · К<sup>2</sup>), а температура Дебая составляет 225 К?

#### **Задача 5**

Рассчитайте значение удельного электросопротивления, обусловленного атомами растворенных элементов, если при температуре 2 К значение удельного сопротивления составляет 0,7 нОм × см, при 4 К – 1,9 нОм × см, при 6 К – 3,9 нОм × см

#### **Задача 6**

При температуре 0 К алюминиевый образец имел форму кубика с длиной ребра 10 мм. Чему примерно равна длина ребра при нагреве до температуры, близкой к температуре плавления (933 К)?

#### **Задача 7**

Температура Кюри ферромагнетика равна 100 К. Во сколько раз изменится магнитная восприимчивость этого материала при нагреве от 200 до 300 К?

#### **Задача 8**

Оценить значение коэффициента теплопроводности при температуре 3 К для монокристалла с линейными размерами около 0,5 мкм, если известно, что скорость распространения звука в материале составляет 3000 м/с, температура Дебая равна 430 К, плотность материала  $\rho = 22,65$  г/см<sup>3</sup>, молярная масса  $M = 192$  г/моль.

#### **Задача 9**

Используя закон Дебая, оцените температуру Дебая ванадия по приведенным в таблице значениям молярной теплоемкости  $C$  при разных значениях температуры  $T$ .

T, K	2,0	3,0	4,0	5,0
C, 10 <sup>-6</sup> Дж/(моль·K)	31,5	106,4	252,2	492,7

### Задача 10

Оценить решеточную молярную теплоемкость алюминия при значениях температуры 4,2 и 77 К.

#### 7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Основные свойства конденсированного вещества. Процесс зарождения конденсированного вещества. Классификация конденсированных сред. Масштабы и размерность объектов физики конденсированного состояния. Классификация свойств и явлений в конденсированных средах. Основы физики микрочастиц. Способы описания состояния макроскопической системы (коллектива). Невырожденные и вырожденные коллективы. Число состояний для микрочастиц. Функция распределения для невырожденного газа. Функция распределения для вырожденного газа фермионов. Функция распределения для вырожденного газа бозонов. Правила статистического усреднения. Силы Ван-дер-Ваальса. Ионная связь. Ковалентная связь. Металлическая связь. Водородная связь. Сопоставление различных видов связи. Силы отталкивания. Кристаллическая решетка. Решетки Бравэ и с базисом. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристаллах (индексы Миллера). Классификация тел по кристаллическим структурам. Элементы симметрии в кристаллах, трансляционная симметрия, ячейка Вигнера — Зейтца. Явление полиморфизма. Классификация твердых тел по кристаллографической симметрии. Периодические функции для трансляционных векторов. Обратная решетка и ее свойства. Дефекты и диффузия в твердых телах. Элементарный закон Гука. Тензоры напряжений и деформаций и закон Гука для анизотропных твердых тел. Пластические свойства кристаллов. Деформация скольжением и двойникованием. Хрупкое разрушение. Твердость. Механические свойства твердых тел при низких температурах: Прочность металлов на растяжение при низких температурах. Металлы, которые остаются пластичными при низких температурах. Предел прочности. Гармоническое приближение. Понятие о нормальных колебаниях решетки. Колебания атомов трехмерной решетки. Спектр нормальных колебаний решетки. Понятие о фононах. Ангармонизм колебаний атомов. Теплоемкость твердого тела. Энергия тепловых колебаний решетки. Теплоемкость электронного газа. Тепловое расширение твердых тел. Теплопроводность твердых тел.

#### 7.2.5 Примерный перечень заданий для подготовки к экзамену

Основные свойства конденсированного вещества. Процесс зарождения конденсированного вещества. Классификация конденсированных сред. Масштабы и размерность объектов физики конденсированного состояния. Классификация свойств и явлений в конденсированных средах. Основы физики микрочастиц. Способы описания состояния макроскопической системы (коллектива). Невырожденные и вырожденные коллективы. Число состояний для микрочастиц. Функция распределения для невырожденного

газа. Функция распределения для вырожденного газа фермионов. Функция распределения для вырожденного газа бозонов. Правила статистического усреднения. Силы Ван-дер-Ваальса. Ионная связь. Ковалентная связь. Металлическая связь. Водородная связь. Сопоставление различных видов связи. Силы отталкивания. Кристаллическая решетка. Решетки Бравэ и с базисом. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристаллах (индексы Миллера). Классификация тел по кристаллическим структурам. Элементы симметрии в кристаллах, трансляционная симметрия, ячейка Вигнера — Зейтца. Явление полиморфизма. Классификация твердых тел по кристаллографической симметрии. Периодические функции для трансляционных векторов. Обратная решетка и ее свойства. Дефекты и диффузия в твердых телах. Элементарный закон Гука. Тензоры напряжений и деформаций и закон Гука для анизотропных твердых тел. Пластические свойства кристаллов. Деформация скольжением и двойникованием. Хрупкое разрушение. Твердость. Механические свойства твердых тел при низких температурах: Прочность металлов на растяжение при низких температурах. Металлы, которые остаются пластичными при низких температурах. Предел прочности. Гармоническое приближение. Понятие о нормальных колебаниях решетки. Колебания атомов трехмерной решетки. Спектр нормальных колебаний решетки. Понятие о фононах. Ангармонизм колебаний атомов. Теплоемкость твердого тела. Энергия тепловых колебаний решетки. Теплоемкость электронного газа. Тепловое расширение твердых тел. Теплопроводность твердых тел. Элементы зонной теории твердых тел. Дрейф электронов под действием внешнего поля. Время релаксации и длина свободного пробега. Удельная электропроводность проводника. Электропроводность невырожденного и вырожденного газов. Закон Видемана — Франца — Лоренца. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры. Влияние температуры на электропроводность чистых металлов. Электропроводность сплавов. Магнитное поле в твердых телах. Природа диамагнетизма, парамагнетизма, ферромагнетизма. Антиферромагнетизм. Ферромагнетизм. Магнитный резонанс. Ядерное магнитное упорядочивание. Отрицательные спиновые температуры. Структура аморфных твердых тел. Энергетический спектр некристаллических твердых тел. Дефекты в аморфных материалах. Аморфные полупроводники, диэлектрики, металлы. Свойства и применение некоторых аморфных материалов при низких температурах. Макроструктура и микроструктура жидкостей. Двухфазное состояние жидкость — газ. Основные низкотемпературные жидкости, их особенности. Квантовые жидкости: Основные свойства гелия. Сверхтекучая жидкость гелия-4. Нормальная жидкость гелия-3. Сверхтекучая жидкость гелия-3. Смешивание гелия-3 и гелия-4. Термодинамические принципы, лежащие в основе процессов получения низких и сверхнизких температур. Адиабатная откачка паров кипящей жидкости. Адиабатное барботирование ненасыщенных газов через жидкость. Процессы охлаждения, основанные на использовании свойств жидкого гелия: Охлаждение растворением гелия-3 в гелии-4. Охлаждение

адиабатной кристаллизацией (метод Померанчука). Процессы охлаждения с использованием рабочей среды в твердом состоянии: Адиабатное размагничивание парамагнитных солей. Адиабатное ядерное размагничивание. Десорбционное охлаждение.

### **7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации**

Зачёт проводится по билетам, каждый из которых содержит теоретический вопрос и задачу. Правильность и полнота ответа на теоретический вопрос оценивается по пятибалльной шкале. Задача оценивается в 5 баллов (3 балла верное решение и 2 балла за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов — 10.

1. Оценка «не зачтено» ставится в случае, если студент набрал менее 7 баллов.

2. Оценка «зачтено» ставится в случае, если студент набрал от 7 до 10 баллов.

Экзамен проводится по билетам, каждый из которых содержит два теоретических вопроса и задачу. Правильность и полнота ответа на каждый теоретический вопрос оценивается по пятибалльной шкале. Задача оценивается в 5 баллов (3 балла верное решение и 2 балла за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов — 15.

1. Оценка «неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 8 баллов.

2. Оценка «удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 8 до 10 баллов.

3. Оценка «хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 13 баллов.

4. Оценка «отлично» ставится в случае, если студент набрал от 14 до 15 баллов.

### **7.2.7 Паспорт оценочных материалов**

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Общие вопросы физики конденсированного вещества	ОПК-1	Тест, зачёт, экзамен, устный опрос
2	Элементы физической статистики	ОПК-1	Тест, зачёт, экзамен, устный опрос
3	Взаимодействия микрочастиц в веществе. Силы связи в конденсированных веществах	ОПК-1	Тест, зачёт, экзамен, устный опрос
4	Элементы кристаллографии	ОПК-1	Тест, зачёт, экзамен, устный опрос
5	Кристаллические твердые	ОПК-1	Тест, зачёт, экзамен, устный опрос

	тела. Механические свойства твердых тел		
6	Кристаллические твердые тела. Некоторые вопросы динамики кристаллической решетки	ОПК-1	Тест, зачёт, экзамен, устный опрос
7	Кристаллические твердые тела. Тепловые свойства	ОПК-1	Тест, зачёт, экзамен, устный опрос
8	Кристаллические твердые тела. Электрические свойства	ОПК-1	Тест, экзамен, устный опрос
9	Кристаллические твердые тела. Магнитные свойства	ОПК-1	Тест, экзамен, устный опрос
10	Аморфные твердые тела	ОПК-1	Тест, экзамен, устный опрос
11	Низкотемпературные жидкости. Квантовые жидкости	ОПК-1	Тест, экзамен, устный опрос
12	Получение низких и сверхнизких температур	ОПК-1	Тест, экзамен, устный опрос

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

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 25 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

## **8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)**

### **8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

1. Андреева, Н.А. Физика низких температур [Электронный ресурс] : Учеб. пособие. - Электрон. текстовые, граф. дан. ( 172 КБ). - Воронеж : ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2008. - 1 файл

2. Аплеснин, С. С. Элементы квантовой механики в физике твердого тела : учебное пособие / С. С. Аплеснин, М. Н. Ситников, Л. В. Удод. — 2-е



изд. — Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2020. — 144 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/107239.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей

3. Архаров, А. М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем / А. М. Архаров. — Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2014. — 512 с. — ISBN 978-5-7038-3842-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/94052.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей

4. Байков, Ю. А. Физика конденсированного состояния : учебное пособие / Ю. А. Байков, В. М. Кузнецов. — 4-е изд. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 294 с. — ISBN 978-5-00101-825-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/6548.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей

5. Введенский, В. Ю. Физические свойства твердых тел : сборник задач / В. Ю. Введенский, Е. А. Шуваева, А. С. Перминов. — Москва : Издательский Дом МИСиС, 2021. — 56 с. — ISBN 978-5-907227-28-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/116977.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей

6. Вентура, Г. Искусство криогеники. Низкотемпературная техника в физическом эксперименте, промышленных и аэрокосмических приложениях : учебно-справочное руководство / Г. Вентура, Л. Ризегари ; под редакцией Л. П. Межова-Деглина. — Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2011. — 335 с. — ISBN 978-5-91559-040-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/103356.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей

7. Гуртов, В. А. Физика твердого тела для инженеров : учебное пособие / В. А. Гуртов, Р. Н. Осауленко ; под редакцией Л. А. Алешина. — Москва : Техносфера, 2012. — 560 с. — ISBN 978-5-94836-327-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/26903.html>. — Режим доступа: для авторизир. пользователей

8. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела [Текст] : учебное пособие. - 3-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2010 (Архангельск : ОАО "ИПП "Правда Севера", 2010). - 288 с. : ил.

9. Калядин, О.В. Элементы физики твердого тела. Низкие температуры : Учеб. пособие. - Воронеж : ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2012. - 94 с.

10. Павлов, П.В. Физика твердого тела : Учеб. пособие / П.В.Павлов,

А.Ф.Хохлов. - 3-е изд., стереотип. - М. : Высш. шк., 2000. - 494 с. : ил.

**8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:**

Microsoft Word

Microsoft Excel

Internet Explorer

Adobe Acrobat Reader

<https://www.iprbookshop.ru>

<https://old.education.cchgeu.ru>

<https://bbb.cchgeu.ru>

<https://elibrary.ru>

<https://cchgeu.ru>

## **9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА**

Для проведения лекционных занятий необходимы аудитория с меловой доской, ноутбук и видеопроектор.

## **10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

По дисциплине «Физика низких температур» читаются лекции, проводятся практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета различных параметров твердых тел и криогенных жидкостей. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; помечать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение

	задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	<p>Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоения учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций;</li> <li>- выполнение домашних заданий и расчетов;</li> <li>- работа над темами для самостоятельного изучения;</li> <li>- участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;</li> <li>- подготовка к промежуточной аттестации.</li> </ul>
Подготовка к промежуточной аттестации	<p>Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом, экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.</p>