

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 10.07.2024 12:02:42  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Утверждаю:



Руководитель ООП

Б.Б.Педько

«21»

мая

2024 г.

Рабочая программа дисциплины

**Физика магнитных явлений**

- Закреплена за кафедрой: **Физики конденсированного состояния**
- Направление подготовки: **03.03.02 Физика**
- Направленность (профиль): **Физика, технологии и компьютерное моделирование функциональных материалов**
- Квалификация: **Бакалавр**
- Форма обучения: **очная**
- Семестр: **6**

Программу составил(и):

*канд. физ.-мат. наук, Зав., Карпенков Алексей Юрьевич*

Тверь, 2024

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

### Цели освоения дисциплины (модуля):

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся базовых представлений о фундаментальных основах магнетизма, природы магнетизма различных материалов, физических характеристик и законов, описывающих магнитные состояния и свойства магнетиков.

### Задачи:

Задачами освоения дисциплины являются:

- изучение классических теорий ферро-, антиферро-, ферримагнетизма и парамагнетизма Ланжевена; изучение основных типов взаимодействий в магнетиках (обменного, магнитокристаллического, магнитостатического, магнитоупругого, с внешним магнитным полем) и влияния каждого из них на основные магнитные свойства магнетиков; магнетокалорического эффекта, ферромагнитной аномалии теплоемкости; изучение физических принципов, лежащих в основе термодинамически равновесного распределения векторов спонтанной намагниченности в магнетиках, особенностей формирования равновесной доменной структуры и основных типах доменных границ.

- освоение методов анализа и решения базовых и оригинальных задач физики магнитных явлений.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.В

### Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Аналитическая геометрия и линейная алгебра

Электричество и магнетизм

Электродинамика

Квантовая механика

**Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:**

Научно-исследовательская работа

Микромагнетизм

Доменная структура магнетиков

## 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

<b>Общая трудоемкость</b>	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
<b>в том числе:</b>	
аудиторные занятия	56
самостоятельная работа	19
часов на контроль	27

## 4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ПК-2.2: Анализирует физические явления и процессы в области физики конденсированного состояния и составляет отчет по теме исследования или по результатам проведенных экспериментов

УК-1.1: Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие

УК-1.2: Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи

**5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ**

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	6

**6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ**

Язык преподавания: русский.

**7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	Примечание
	Раздел 1. Физика магнетиков					
1.1	Краткий исторический очерк развития учения о магнетизме.	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
1.2	Роль русских ученых в развитии магнетизма.	Ср	6	5	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
1.3	Основные понятия и системы единиц в физике магнитных явлений	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
1.4	Системы единиц в физике магнитных явлений	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.5	Виды магнетиков. Понятие магнитной восприимчивости и проницаемости	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
1.6	Петля гистерезиса. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2	
1.7	Расчет 13 параметров магнитного материала из петли гистерезиса в системе СГС	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.8	Расчет 13 параметров магнитного материала из петли гистерезиса в Международной системе единиц СИ	Ср	6	6	Л1.1 Л1.2	
1.9	Источники магнитно поля	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.10	Расчет магнитного поля соленоида	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.11	Элементарные носители магнетизма	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1 Л2.2	
1.12	Определение спинового, орбитального и полного магнитного моментов 3d-металлов	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.13	Определение спинового, орбитального и полного магнитного моментов 4f-металлов	Пр	6	4	Л1.1 Л1.2	
1.14	Магнетизм атомных ядер	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	

1.15	Диамagnetизм	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2	
1.16	Парамагнетизм	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2Л2.2	
1.17	Магнетизм электронного газа	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.18	Термодинамика магнитных явлений	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2	
1.19	Ферромагнетизм. Теория молекулярного поля Вейсса.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2Л2.1	
1.20	Полуклассическое описание обменного взаимодействия. Обменная энергия. Обменный параметр.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.21	Оценка обменной энергии, ее объемной плотности и обменный параметр по температуре Кюри для 3d и 4f металлов	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.22	Теория антиферромагнетизма в приближении молекулярного поля.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.23	Теория ферромагнетизма Нееля. Магнитные подрешетки. Основные типы температурных зависимостей намагниченности ферромагнетиков. Точка компенсации.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.24	Явление магнитокристаллической анизотропии. Физическая природа магнитокристаллической анизотропии.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.25	Природа магнитоупругого взаимодействия. Магнитоупругая энергия. Магнитострикция.	Лек	6	1	Л1.1 Л1.2	
1.26	Магнитостатическая энергия. Собственное размагничивающее поле магнетиков.	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.27	Определение поверхностной плотности магнитостатической энергии магнитных образцов разной формы	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.28	Измерение кривых намагничивания высокоанизотропных магнетиков вдоль легкой и трудной осей намагничивания на вибрационном магнитометре.	Пр	6	4	Л1.1 Л1.2	
1.29	Магнитная доменная структура	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2	

1.30	Экспериментальные методы исследования доменной структуры ферро- и ферримагнетиков.	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2	
1.31	Наблюдение и регистрация доменной структуры магнетиков с помощью металлографического микроскопа.	Пр	6	4	Л1.1 Л1.2	
1.32	Обработка изображений доменной структуры с целью получения количественных параметров.	Ср	6	8	Л1.1 Л1.2	
1.33	Экзамен	Экзамен	6	27	Л1.1 Л1.2	

### Список образовательных технологий

1	Активное слушание
2	Методы группового решения творческих задач (метод Дельфи, метод 6–6, метод развивающей кооперации, мозговой штурм (метод генерации идей), нетворкинг и т.д.)

## 8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### 8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

См. Приложение 1

### 8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

См. Приложение 1

### 8.3. Требования к рейтинг-контролю

См. Приложение 1

## 9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

### 9.1. Рекомендуемая литература

#### 9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Гуфан, Гуфан, Физика магнитных явлений, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета (ЮФУ), 2020, ISBN: 978-5-9275-3552-1, URL: <a href="https://znanium.com/catalog/document?id=415229">https://znanium.com/catalog/document?id=415229</a>
Л1.2	Боровик Е. С., Еременко В. В., Мильнер А. С., Лекции по магнетизму, Москва: Физматлит, 2005, ISBN: 978-5-9221-0577-9, URL: <a href="https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=75475">https://biblioclub.ru/index.php?page=book&amp;id=75475</a>

### 9.1.2. Дополнительная литература

Шифр	Литература
Л2.1	Карпенков, Карпенков, Дунаева, Ховайло, Каплунов, Зонные ферро- и ферримангнетики, Тверь: Тверской государственный университет, 2021, ISBN: , URL: <a href="http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&amp;ids=5277274">http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&amp;ids=5277274</a>
Л2.2	Карпенков, Карпенков, Ракунов, Ховайло, Каплунов, Теория зонного магнетизма. Зонные парамагнетики, Тверь: Тверской государственный университет, 2021, ISBN: , URL: <a href="http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&amp;ids=5277273">http://megapro.tversu.ru/megaPro/UserEntry?Action=FindDocs&amp;ids=5277273</a>

### 9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
2	Google Chrome
3	Adobe Acrobat Reader

### 9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU (подписка на журналы)
2	ЭБС ТвГУ
3	ЭБС IPRbooks
4	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
5	ЭБС «ЮРАИТ»
6	ЭБС «ZNANIUM.COM»
7	ЭБС «Лань»

## 10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-40	комплект учебной мебели, вольтмет, экран настенный, контроллер, сканеры для вольтметра, двухфазные Lock-in усилители, компьютеры, установка "Мишень"

## 11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Контрольные вопросы для экзамена

1. Краткий исторический очерк развития учения о магнетизме. Роль русских ученых в развитии магнетизма. Гипотеза Ампера о существовании микроскопических круговых токов в атоме. Магнитный момент кругового тока. Гипотеза Вейсса о существовании доменов в ферромагнетиках.
2. Спиновый и орбитальный магнитные и механические моменты электронов в атоме. Спиновый и орбитальный g-факторы, гиромангнитная аномалия спина. Магнетон Бора.
3. Полный магнитный момент электронной оболочки. Принцип Паули. Правила Хунда. Фактор Ланде.
4. Векторная модель атома для случаев L-S и j-j связи. Принцип заполнения электронных оболочек атомов в периодической системе. Строение электронных оболочек атомов 3d-переходных и редкоземельных металлов.
5. Термодинамика магнитных явлений. Основные термодинамические соотношения. Уравнение магнитного состояния.
6. Теория молекулярного поля Вейсса. Достоинства и недостатки классического

подхода для объяснения природы ферромагнетизма.

7. Термодинамика магнитных явлений. Теплоемкость при постоянной намагниченности и постоянном магнитном поле. Ферромагнитная аномалия теплоемкости.

8. Магнитные моменты протона и нейтрона. Аномалии ядерного магнетизма и их качественное объяснение. Магнитный момент атомного ядра. Гиромагнитное отношение для ядра. Полуэмпирические правила для определения спина различных ядер. Ядерный магнетон.

9. Энергия намагниченного тела. Работа намагничивания. Энергия и плотность энергии магнитного поля.

10. Явление магнитокристаллической анизотропии. Физическая природа магнитокристаллической анизотропии. Представление плотности энергии МКА для кристаллов с различными типами кристаллических решеток. Константы анизотропии.

11. Ферромагнетики, диамагнетики, парамагнетики. Основные критерии различия веществ по степени магнитного порядка.

12. Полуклассическое описание обменного взаимодействия. Обменная энергия. Обменный параметр.

13. Понятие магнитного домена и доменной структуры. Скачки Баркгаузена, как экспериментальное доказательство существования доменов. Теория доменной структуры в магнитоупорядоченных кристаллах по Ландау и Лившицу.

14. Магнитостатическая энергия. Собственное размагничивающее поле магнетиков. Размагничивающий фактор.

15. Теория ферромагнетизма Нееля. Магнитные подрешетки. Основные типы температурных зависимостей намагниченности ферромагнетиков. Точка компенсации.

16. Энергия магнетика во внешнем магнитном поле. Физическая природа изменения магнитного состояния при изменении внешнего магнитного поля. Размагниченное состояние и состояние магнитного насыщения.

17. Парамагнетизм систем слабозадействующих ионов (классическая теория парамагнетизма Ланжевена). Закон Кюри.

18. Природа магнитоупругого взаимодействия. Магнитоупругая энергия. Магнитострикция и константы магнитострикции.

19. Теория антиферромагнетизма в приближении молекулярного поля. Понятие асимптотической точки Кюри. Закон Кюри-Вейсса для антиферромагнетиков.

20. Температурные зависимости магнитной восприимчивости в ферро-, ферри-, антиферромагнетиках и парамагнетиках и их объяснение в рамках классических теорий.

21. Поле анизотропии и способы его определения. Экспериментальные методы определения констант магнитокристаллической анизотропии.

22. Основные типы магнитной анизотропии. Физические причины, обуславливающие их существование.

23. Виды магнитных структур: коллинеарные ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики. Примеры веществ с указанными структурами. Метод магнитной нейтронографии.

24. Природа сверхтонкого взаимодействия в атоме. Энергия сверхтонкого взаимодействия. Экспериментальное подтверждение существования сверхтонкого взаимодействия.

25. Учет собственных размагничивающих полей образцов конечной формы при магнитных измерениях. «Сдвиговая коррекция» кривых намагничивания и петель гистерезиса.

26. Термодинамика магнитных явлений. Магнетокалорический эффект, выраженный через изменение намагниченности и через изменение внешнего магнитного поля. Практическое использование магнетокалорического эффекта.

27. Понятие магнитного домена и доменной структуры. Теория доменной структуры в магнитоупорядоченных кристаллах по Ландау и Лившицу.

28. Доменные границы Блоха. Эффективная ширина и энергия блоховских доменных границ для одноосного магнетика.

## Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 1

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
<p>Начальный</p> <p><b>Уметь:</b> применять полученные знания при решении конкретных задач в профессиональной деятельности, определять конкретные цели, которые должны быть достигнуты в процессе эксперимента (решения задач).</p>	<p><b>Примеры задач.</b></p> <p>1. Рассчитать квантовые числа S, L, J для не полностью заполненных электронных оболочек следующих атомов: 3d – переходных металлов Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni; 4d - металлов Zr, Hf, W, Ir 4f – металлов Sm, Pr, Dy, Er, Yb. Записать обозначения термов основного состояния этих атомов.</p> <p>2. Определить спиновый, орбитальный и полный магнитные моменты следующих атомов: Mg, Mn, V, Fe, Co, Ni, Pr, Ce, Nd, Sm, Dy, Y, Tb, Tm, Er. Построить график зависимости величины полного магнитного момента от порядкового номера редкоземельного металла.</p>	<p>1. Не использует базовые знания в области физики магнитных явлений при решении конкретных задач.</p> <p>2. Использует лишь ограниченные знания физических законов.</p> <p>3. Удовлетворительно использует знания физических законов, но не всегда может получить окончательный результат.</p> <p>4. Умеет хорошо использовать знания в области физики магнитных явлений, допускает ошибки.</p> <p>5. Свободно использует основные физические представления и законы, получает правильный результат.</p>
<p>Начальный</p> <p><b>Знать:</b> основные классические теоретические модели физики ферро-ферримагнетизма, парамагнетизма и диамагнетизма.</p>	<p><b>Примеры задач.</b></p> <p>1. Оценить обменную энергию, ее объемную плотность и обменный параметр по температуре Кюри для следующих металлов: Fe, Co, Ni, Gd, Dy. Составить таблицу с указанием значений рассчитанных величин и температур Кюри.</p> <p>2. Определите поверхностную плотность магнитостатической энергии бесконечной пластины</p>	<p>1. Не знает основных классических законов магнетизма, определений основных магнитных характеристик вещества.</p> <p>2. Знает лишь отдельные законы магнетизма, некоторые определения магнитных характеристик вещества.</p> <p>3. Удовлетворительно знает основные законы магнетизма, допускает</p>

	<p>толщиной <math>a</math>, намагниченной до величины остаточной намагниченности <math>I</math> параллельно и перпендикулярно ее плоскости.</p> <p>3. Оцените величину внешнего магнитного поля, необходимую для магнитного насыщения сферического образца железа.</p> <p><b>Примеры вопросов для самостоятельного изучения.</b></p> <p>1. Каковы особенности обменного взаимодействия в ферримагнетиках?</p> <p>2. Как в модели ферримагнетизма определяется внутримолекулярное поле каждой из магнитных подрешеток?</p> <p>3. Как зависит от температуры магнитная восприимчивость ферримагнетиков?</p> <p>4. Объяснить смысл всех параметров, входящих в закон Кюри-Вейсса для ферримагнетиков? Для какой области температур он справедлив?</p> <p><b>Вопросы для экзамена.</b></p> <p>1. Энергия магнетика во внешнем магнитном поле. Физическая природа изменения магнитного состояния при изменении внешнего магнитного поля. Размагниченное состояние и состояние магнитного насыщения.</p> <p>2. Парамагнетизм систем слабозаимодействующих ионов (классическая теория</p>	<p>отдельные ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает основные законы магнетизма.</p> <p>5. Исчерпывающе знает основные законы магнетизма.</p>
--	--	--

	парамагнетизма Ланжевена). Закон Кюри.	
Промежуточный <b>Владеть:</b> методиками планирования и разработки физических экспериментов, методами анализа и обработки полученных результатов, экспериментальными навыками работы с современными приборами.	1. Измерение кривых намагничивания высокоанизотропных магнетиков вдоль легкой и трудной осей намагничивания на вибрационном магнитометре. Определение намагниченности насыщения и поля анизотропии. 2. Наблюдение и регистрация доменной структуры магнетиков с помощью металлографического микроскопа.	1. Не владеет методиками магнитных измерений и наблюдения доменной структуры. 2. Удовлетворительно владеет методиками, но не может объяснить полученные результаты. 3. Удовлетворительно владеет методиками магнитных измерений и наблюдения доменной структуры, но допускает методические ошибки. 4. Хорошо владеет методиками магнитных измерений и наблюдения доменной структуры. 5. Свободно владеет экспериментальными методиками и методами анализа и обработки полученных результатов.
Промежуточный <b>Уметь:</b> применять полученные знания при решении конкретных задач в профессиональной деятельности, определять конкретные цели, которые должны быть достигнуты в процессе эксперимента (решения задач).	1. На графике приведены температурные зависимости констант анизотропии $K_1$ и $K_2$ монокристалла гадолиния. Определить как меняется тип магнитокристаллической анизотропии Gd в интервале температур $0 < T < 300$ К ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ ). Схематично нарисовать зависимость угла $\Theta$ между осью C гексагональной элементарной ячейки и направлением легкой оси намагничивания от температуры. 2. Оценить величину первой константы анизотропии	1. Не использует базовые знания в области физики магнитных явлений при решении конкретных задач. 2. Использует лишь ограниченные знания физических законов. 3. Удовлетворительно использует знания физических законов, но не всегда может получить окончательный результат. 4. Умеет хорошо использовать знания в области физики магнитных явлений,

	одноосного монокристалла $\text{SmCo}_5$ , если его поле анизотропии $H_A=430$ кЭ, удельная намагниченность насыщения $\sigma_s=100$ Гс·см <sup>3</sup> /г, а плотность $\rho=8,7$ г/см <sup>3</sup> .	допускает ошибки. 5. Свободно использует основные физические представления и законы, получает правильный результат.
Промежуточный <b>Знать:</b> основные классические теоретические модели физики ферро-ферримагнетизма, парамагнетизма и диамагнетизма.	1. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома церия имеет вид $^3H_4$ . Определить основные квантовые числа его незаполненной 4f оболочки. 2. Как основные магнитные характеристики (I, H, C <sub>I</sub> , C <sub>H</sub> ) определяются через основные термодинамические потенциалы F, Ф, U?	1. Не знает основных классических законов магнетизма, определений основных магнитных характеристик вещества. 2. Знает лишь отдельные законы магнетизма, некоторые определения магнитных характеристик вещества. 3. Удовлетворительно знает основные законы магнетизма, допускает отдельные ошибки. 4. Хорошо знает основные законы магнетизма. 5. Исчерпывающе знает основные законы магнетизма.

## Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 2

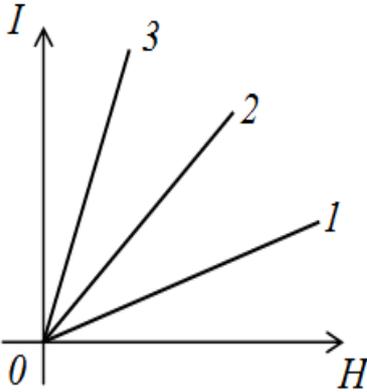
Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
Начальный <b>Уметь:</b> правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты	1. Представить результаты магнитных измерений в виде графиков с использованием программы научной графики Origin. 2. Получить изображения доменной структуры и представить результаты в виде отчета в формате Microsoft	1. Не умеет правильно производить измерения и обрабатывать результаты с помощью стандартных и специализированных компьютерных программ. 2. Обладает лишь начальными навыками работы на

<p>на основе теоретических знаний.</p>	<p>Word.</p>	<p>экспериментальных установках и методами компьютерной обработки полученных результатов.  3. Удовлетворительно справляется с проведением измерений и обработкой полученных результатов.  4. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний, допускает отдельные ошибки.  5. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>
<p>Начальный  <b>Знать:</b> основные экспериментальные методы исследования свойств магнетиков, физические принципы работы экспериментальных установок.</p>	<p>1. Учет собственных размагничивающих полей образцов конечной формы при магнитных измерениях. «Сдвиговая коррекция» кривых намагничивания и петель гистерезиса.  2. Экспериментальные методы исследования доменной структуры ферро- и ферримагнетиков.  3. Как оценить постоянную молекулярного поля экспериментальным путем?</p>	<p>1. Не знает основных экспериментальных методов исследования магнитных свойств и физических принципов работы экспериментальных установок.  2. Знает лишь отдельные экспериментальные методы исследования магнитных свойств.  3. Удовлетворительно знает экспериментальные</p>

	<p>Какой порядок величины имеет внутримолекулярное поле? Сопоставить эти значения с реально достижимыми магнитными полями?</p>	<p>методы исследования магнитных свойств и физические принципы работы экспериментальных установок, допускает отдельные ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает экспериментальные методы исследования магнитных свойств и физические принципы работы экспериментальных установок.</p> <p>5. Знает в полном объеме экспериментальные методы исследования магнитных свойств и физические принципы работы экспериментальных установок.</p>
<p>Промежуточный</p> <p><b>Владеть:</b></p> <p>компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой.</p>	<p>1. Измерить кривые намагничивания высокоанизотропных магнетиков на вибрационном магнитометре при различных температурах. Построить семейство зависимостей <math>\sigma_s(T)</math> для каждого образца в одной координатной плоскости.</p> <p>2. Обработать изображения доменной структуры с целью получения количественных параметров.</p>	<p>1. Не владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой.</p> <p>2. Удовлетворительно владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой, но не может объяснить полученные</p>

		<p>результаты.</p> <p>3. Удовлетворительно владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой, но допускает методические ошибки.</p> <p>4. Хорошо владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой.</p> <p>5. Свободно владеет компьютерными программами для построения графиков, таблиц, анализа изображений, полученных с помощью микроскопа, навыками работы с литературой.</p>
<p>Промежуточный</p> <p><b>Уметь:</b> правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>	<p>1. Измерить петлю гистерезиса сферического образца. Произвести ее коррекцию с учетом размагничивающего фактора образца. Обработку результатов производить с помощью программы Origin.</p> <p>2. Получить изображения доменной структуры монокристалла <math>RCO_5</math> в процессе его намагничивания.</p>	<p>1. Не умеет правильно производить измерения и обрабатывать результаты с помощью стандартных и специализированных компьютерных программ.</p> <p>2. Обладает лишь начальными навыками работы на экспериментальных установках и методами компьютерной обработки полученных результатов.</p>

		<p>3. Удовлетворительно справляется с проведением измерений и обработкой полученных результатов.</p> <p>4. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний, допускает отдельные ошибки.</p> <p>5. Умеет правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>
<p>Промежуточный</p> <p><b>Знать:</b> основные экспериментальные методы исследования свойств магнетиков, физические принципы работы экспериментальных установок.</p>	<p>1. Записать формулы для магнетокалорического эффекта ферромагнетика через изменение намагниченности, и магнетокалорического эффекта парамагнетика через изменение напряженности магнитного поля. Где находят практическое применение эти формулы?</p> <p>2. Какая из представленных ниже кривых намагничивания парамагнетика измерена при наименьшей температуре?</p>	<p>1. Не знает основных экспериментальных методов исследования магнитных свойств и физических принципов работы экспериментальных установок.</p> <p>2. Знает лишь отдельные экспериментальные методы исследования магнитных свойств.</p> <p>3. Удовлетворительно знает экспериментальные методы исследования магнитных свойств и физические принципы работы</p>

	 <p>1. Кривая 1. 2. Кривая 3. 3. Кривая 2.</p>	<p>экспериментальных установок, допускает отдельные ошибки. 4. Хорошо знает экспериментальные методы исследования магнитных свойств и физические принципы работы экспериментальных установок. 5. Знает в полном объеме экспериментальные методы исследования магнитных свойств и физические принципы работы экспериментальных установок.</p>
--	---	--

### Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 3

Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина	Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков	Критерии оценивания компетенции, шкала оценивания
<p>Начальный <b>Уметь:</b> грамотно планировать проведение заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.</p>	<p>1. Во внешнем поле <math>H = 100</math> А/м сферический ферромагнитный образец достигает намагниченности <math>I = 270</math> А/м. Чему равна магнитная восприимчивость материала в данном поле? 2. В чем состоит физическая причина возникновения собственного размагничивающего поля образца? Как направлено это поле по отношению к намагниченности? Чему равно истинное (внутреннее)</p>	<p>1. Не умеет планировать проведение заданных экспериментов. 2. Обладает лишь начальными навыками планирования заданных экспериментов, затрудняется объяснять результаты. 3. Удовлетворительно справляется с планированием экспериментов, может объяснить отдельные результаты.</p>

	<p>магнитное поле намагниченного образца? Почему на практике необходимо учитывать различие в значениях внешнего и внутреннего полей?</p> <p>3. Определить эффективную ширину <math>180^\circ</math>-ной доменной границы в кобальте, если известны значения обменного параметра <math>A = 0,75 \cdot 10^{-6}</math> эрг/см и константы анизотропии <math>K_1 = 4,3 \cdot 10^6</math> эрг/см<sup>3</sup>.</p>	<p>4. Умеет планировать проведение заданных экспериментов. При объяснении результатов допускает отдельные ошибки.</p> <p>5. Умеет грамотно планировать проведение заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.</p>
<p>Начальный</p> <p><b>Знать:</b> особенности практических применений конкретных физических свойств магнетиков, способы управления ими в ходе эксперимента.</p>	<p>1. Во внешнем поле <math>H</math> сферический ферромагнитный образец достигает намагниченности <math>I_0</math>. Образец сложной формы из данного материала в том же поле имеет намагниченность <math>I_N</math>. Рассчитайте размагничивающий фактор образца сложной формы.</p> <p>2. Оценить обменную энергию, ее объемную плотность и обменный параметр по температуре Кюри для следующих металлов: Fe, Co, Ni, Gd, Dy. Составить таблицу с указанием значений рассчитанных величин и температур Кюри.</p>	<p>1. Не знает основные практические применения конкретных физических свойств магнетиков.</p> <p>2. Знает применения лишь отдельных физических свойств магнетиков.</p> <p>3. Удовлетворительно знает основные применения физических свойств магнетиков, допускает ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает основные применения физических свойств магнетиков, испытывает затруднения в выборе способов управления ими в ходе эксперимента.</p> <p>5. Знает особенности практических применений конкретных физических свойств магнетиков, способы управления ими в ходе эксперимента.</p>
<p>Промежуточный</p> <p><b>Владеть:</b> навыками</p>	<p>1. Коллективная работа по планированию эксперимента,</p>	<p>1. Не владеет навыками работы в коллективе.</p>

<p>работы в коллективе, деятельность которого подчинена достижению общей цели.</p>	<p>проведению измерений, обсуждению полученных результатов и подготовке отчета.</p>	<p>2. Испытывает определенные трудности при работе в коллективе. 3. Удовлетворительно владеет навыками работы в коллективе. 4. Хорошо владеет навыками работы в коллективе. 5. Свободно владеет навыками работы в коллективе, деятельность которого подчинена достижению общей цели.</p>
<p>Промежуточный <b>Уметь:</b> грамотно планировать проведение заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.</p>	<p>1. Получить изображения доменной структуры (ДС) монокристалла <math>\text{SmCo}_5</math> на плоскостях, имеющих различную кристаллографическую ориентацию. Подготовить план проведения эксперимента, провести подготовку образцов, наблюдения ДС. Объяснить полученные результаты.</p>	<p>1. Не умеет планировать проведение заданных экспериментов. 2. Обладает лишь начальными навыками планирования заданных экспериментов, затрудняется объяснять результаты. 3. Удовлетворительно справляется с планированием экспериментов, может объяснить отдельные результаты. 4. Умеет планировать проведение заданных экспериментов. При объяснении результатов допускает отдельные ошибки. 5. Умеет грамотно планировать проведение заданных экспериментов, объяснять результаты на основе современных теоретических представлений.</p>

<p>Промежуточный</p> <p><b>Знать:</b> особенности практических применений конкретных физических свойств магнетиков, способы управления ими в ходе эксперимента.</p>	<p>1. Найти величину магнитного момента шара радиуса <math>R</math> из материала с магнитной восприимчивостью <math>\chi</math> в магнитном поле <math>H</math>. Ответ представить в системах СИ и СГС. Рассмотреть также предельный случай при <math>\chi \rightarrow \infty</math>.</p> <p>2. Ферромагнитный образец во внешнем поле <math>H = 20</math> А/м достигает намагниченности <math>I = 15</math> А/м. Какую форму имеет образец, если в данном поле восприимчивость материала <math>\alpha = 1</math>?</p>	<p>1. Не знает основные практические применения конкретных физических свойств магнетиков.</p> <p>2. Знает применения лишь отдельных физических свойств магнетиков.</p> <p>3. Удовлетворительно знает основные применения физических свойств магнетиков, допускает ошибки.</p> <p>4. Хорошо знает основные применения физических свойств магнетиков, испытывает затруднения в выборе способов управления ими в ходе эксперимента.</p> <p>5. Знает особенности практических применений конкретных физических свойств магнетиков, способы управления ими в ходе эксперимента.</p>
---	--	--

**Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**  
**Тесты и задачи для практических занятий и самостоятельного**  
**решения**

1. Что называется удельной намагниченностью ферромагнетика и в каких единицах она измеряется в СИ?

1. Магнитный момент единицы объема,  $A \cdot m^{-1}$ .
2. Магнитный момент единицы массы,  $Tl \cdot m^3 \cdot kg^{-1}$ .
3. Магнитный момент единицы массы,  $A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$ .

2. Закон Кюри-Вейсса для магнитной восприимчивости ферромагнетиков имеет вид

1.  $\chi = \frac{C}{T}$ , 2.  $\chi = \frac{C}{T - T_c}$ , 3.  $\chi = \frac{C}{T - \theta_a}$ .

3. Аналог закона Кюри-Вейсса для магнитной восприимчивости антиферромагнетиков имеет вид

1.  $\chi = \frac{C}{T - \theta_a}$ , 2.  $\chi = \frac{C}{T - T_c}$ , 3.  $\chi = \frac{C}{T}$ .

4. Физическая природа существования самопроизвольной намагниченности состоит в следующем:

1. Обменном взаимодействии спиновых магнитных моментов электронов соседних атомов вещества.
2. Взаимодействии магнитных моментов атомов (ионов) с внутрикристаллическим полем.
3. Взаимодействии между орбитальными и спиновыми магнитными моментами электронов в атоме.

5. Классическая теория ферромагнетизма Вейсса справедлива

1. в интервале температур  $0 < T < T_c$ ;

2. в узком интервале температур вблизи точки Кюри;

3. в области высоких температур  $T > T_c$ .

6. Не зависят от структурных особенностей магнетиков следующие из приведенных магнитных характеристик

1.  $I_s(B_s)$ , 2.  $H_c$ , 3.  $\mu$ , 4.  $(BH)_{\max}$ , 5.  $T_c$ , 6.  $I_r(B_r)$ .

7. Характерная температура, при которой магнитные моменты подрешеток двухподрешеточного ферримагнетика равны по величине называется

1. Температура Кюри.

2. Температура Нееля.

3. Температура компенсации.

8. В одноосных ферромагнетиках наблюдаются следующие типы доменных границ

1.  $180^\circ$ -ные. 2.  $90^\circ$ -ные. 3.  $45^\circ$ -ные.

9. Поверхностная плотность энергии  $180^\circ$ -ной доменной границы в одноосном ферромагнитном кристалле равна

$$1. \gamma = 2\sqrt{\frac{A}{K_1}}. \quad 2. \gamma = 4\sqrt{A.K_1}. \quad 3. \gamma = 8\sqrt{\frac{K_1}{A}}.$$

10. Используя какую из перечисленных экспериментальных зависимостей можно приблизительно оценить величину обменного параметра  $A$  ферромагнетика

$$1. \mu(H). \quad 2. I(H). \quad 3. I_s(T).$$

11. Явление магнитокристаллической анизотропии заключается

1. в существовании преимущественных кристаллографических направлений для вектора  $\vec{I}_s$  в конкретном кристалле;

2. в существовании выделенных направлений для вектора  $\vec{I}_s$  в данном веществе;

3. в наличии взаимодействия вектора  $\vec{I}_s$  с полем внутренних упругих напряжений, создаваемом дефектами кристаллической решетки.

12. В классической термодинамической теории уравнение магнитного состояния имеет вид:

$$1. \left(\frac{\partial \Phi}{\partial T}\right)_{P,H} = -S. \quad 2. \left(\frac{\partial \Phi}{\partial H}\right)_{P,T} = -I. \quad 3. \left(\frac{\partial F}{\partial I}\right)_{T,V} = H.$$

13. Соотношение основных видов теплоемкости ферромагнетика  $C_I - C_H = \omega I \left(\frac{\partial I}{\partial T}\right)_H$ , где  $\omega$  - постоянная молекулярного поля Вейсса, в общем виде описывает

1. магнетокалорический эффект;

2. ферромагнитную аномалию теплоемкости;

3. поведение теплоемкости ферромагнетика при температурах  $T > T_C$ .

14. Магнетокалорический эффект для ферромагнетика при  $T > T_C$  описывается формулой

$$1. \partial T = \frac{T}{C_I} \cdot \frac{\omega I}{T_C} \partial I. \quad 2. C_I - C_H = T \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_I \cdot \left( \frac{\partial I}{\partial T} \right)_H. \quad 3. \left( \frac{\partial U}{\partial I} \right)_T = -\omega I.$$

15. Заданный тип магнитокристаллической анизотропии («легкая ось», «легкая плоскость», «легкий конус») магнетика

1. никогда не меняется, так как зависит от физической природы вещества;
2. может изменяться при изменении соотношений между константами анизотропии  $K_1, K_2, K_3$  и т.д., а также их знака;
3. может изменяться при изменении формы образца.

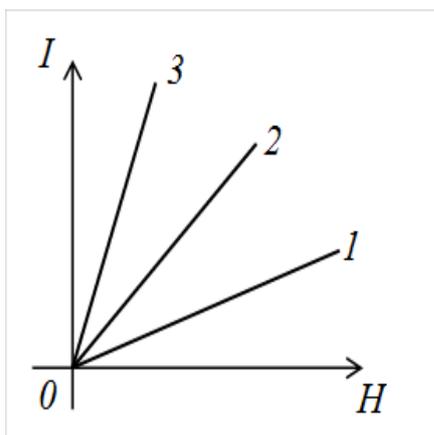
16. Величину собственного размагничивающего поля ферромагнитного образца определяет

1. Значение его намагниченности.
2. Геометрическая форма и размеры.
3. Величина намагниченности и форма образца.

17. В теории парамагнетизма Ланжевена поведение намагниченности как функции внешнего магнитного поля и температуры описывается соотношением

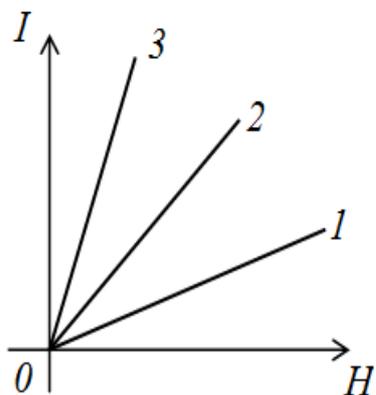
$$1. I = N\mu_0 L(\alpha). \quad 2. I = N\mu_0 B_J(\alpha). \quad 3. I = (N_+ - N_-)\mu_B.$$

18. Какая из приведенных кривых намагничивания парамагнетика измерена при наибольшей температуре?



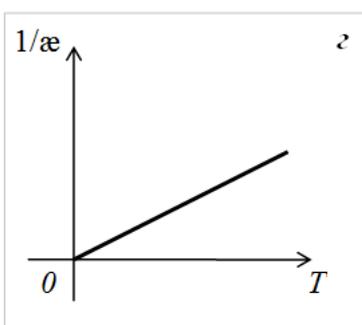
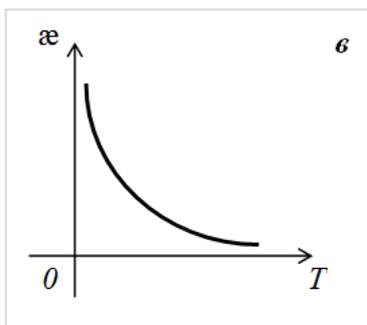
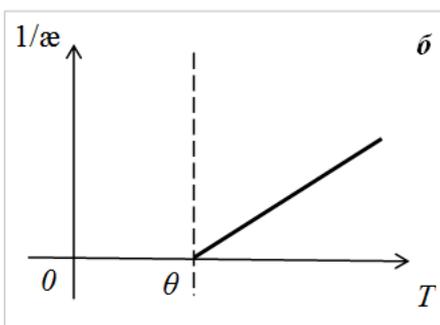
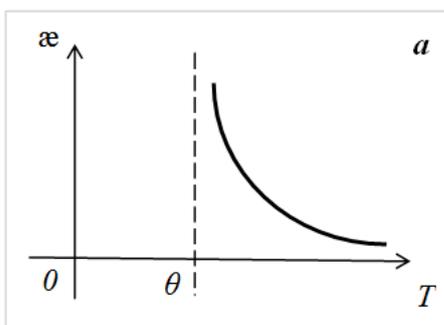
1. Кривая 1.
2. Кривая 3.
3. Кривая 2.

19. Какая из приведенных кривых намагничивания парамагнетика измерена при наименьшей температуре?



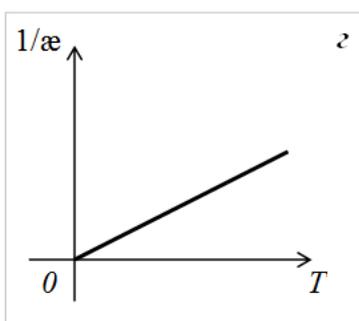
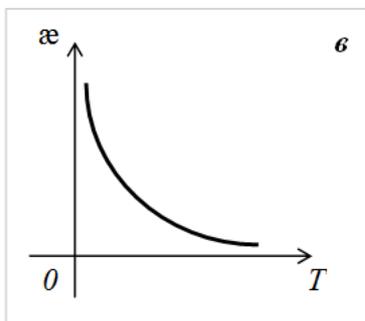
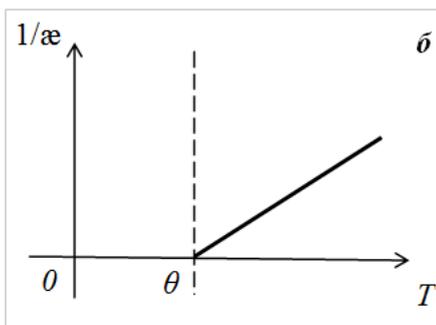
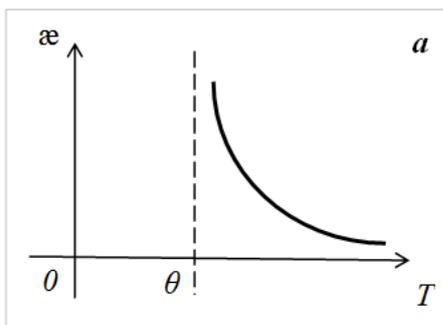
1. Кривая 2.
2. Кривая 3.
3. Кривая 1.

20. Выберите те температурные зависимости магнитной восприимчивости  $\chi$  и обратной магнитной восприимчивости  $1/\chi$ , которые следуют из классической теории ферромагнетизма



1. а, г
2. а, б
3. в, г
4. в, б

21. Выберите те температурные зависимости магнитной восприимчивости  $\chi$  и обратной магнитной восприимчивости  $1/\chi$ , которые следуют из классической теории парамагнетизма Ланжевена



1. в, г

2. а, б

3. а, в

4. в, б

22. Физическая причина возникновения диамагнитного эффекта заключается

1. во взаимодействии спиновых магнитных моментов электронов атома с внешним магнитным полем;

2. во взаимодействии полных магнитных моментов атома с внешним магнитным полем;

3. в возникновении магнитных полей индукционных электронных токов в атомах, когда внешнее магнитное поле пронизывает электронное облако наружной оболочки атома.

23. Размагничивающий фактор образца в форме бесконечно тонкой пластины, намагниченной перпендикулярно ее плоскости равен в системе СИ

1.  $N=1$ . 2.  $N=0$ . 3.  $N=1/2$ .

24. Размагничивающий фактор образца в форме бесконечно длинного круглого стержня, намагниченного вдоль его длинной оси равен в системе СИ

1.  $N=0$ . 2.  $N=1$ . 3.  $N=1/2$ .

25. Физическая природа обменного взаимодействия заключается

1. во взаимодействии спиновых и орбитальных магнитных моментов электронных оболочек атома;

2. в электростатическом (кулоновском) взаимодействии электронов соседних атомов;

3. во взаимодействии орбитальных магнитных моментов электронных оболочек соседних атомов.

26. Поле магнитокристаллической анизотропии одноосного магнетика определяется по формуле в системе СИ

$$1. H_A = -\frac{2k_1}{\mu_0 I_s} \left( 2 + \frac{k_1}{k_2} \right). \quad 2. H_A = -\frac{2k_1}{\mu_0 I_s} \left( 1 + \frac{2k_2}{k_1} \right). \quad 3. H_A = \frac{2k_1}{\mu_0 I_s}.$$

27. Поле магнитокристаллической анизотропии магнетика с анизотропией «легкий конус» определяется по формуле в системе СИ

$$1. H_A = \frac{2k_1}{\mu_0 I_s}. \quad 2. H_A = -\frac{2k_1}{\mu_0 I_s} \left( 1 + \frac{2k_2}{k_1} \right). \quad 3. H_A = -\frac{2k_1}{\mu_0 I_s} \left( 2 + \frac{k_1}{k_2} \right).$$

28. Поле магнитокристаллической анизотропии магнетика с анизотропией «легкая плоскость» определяется по формуле в системе СИ

$$1. H_A = -\frac{2k_1}{\mu_0 I_s} \left( 1 + \frac{2k_2}{k_1} \right). \quad 2. H_A = \frac{2k_1}{\mu_0 I_s}. \quad 3. H_A = -\frac{2k_1}{\mu_0 I_s} \left( 2 + \frac{k_1}{k_2} \right).$$

29. Плотность энергии магнитокристаллической анизотропии одноосного магнетика равна

$$1. E_A = k_1 + k_2. \quad 2. E_A = 0. \quad 3. E_A = -\frac{k_1^2}{4k_2}.$$

30. Плотность энергии магнитокристаллической анизотропии магнетика с анизотропией «легкая плоскость» равна

$$1. E_A = 0. \quad 2. E_A = k_1 + k_2. \quad 3. E_A = -\frac{k_1^2}{4k_2}.$$

31. Плотность энергии магнитокристаллической анизотропии магнетика с анизотропией «легкий конус» равна

$$1. E_A = -\frac{k_1^2}{4k_2}. \quad 2. E_A = k_1 + k_2. \quad 3. E_A = 0.$$

32. Энергия обменного взаимодействия зависит от следующих факторов

1. природы атомов вещества и взаимной ориентации спинов соседних электронов;
2. величины спиновых моментов атомов вещества и их ориентации по отношению к осям легчайшего намагничивания;
3. величины полных магнитных моментов соседних атомов вещества и их взаимной ориентации.

33. Аномалии ядерного магнетизма заключаются в следующем

1. магнитный момент протона равен ядерному магнетону, а магнитный момент нейтрона больше него;
2. магнитные моменты протона и нейтрона больше ядерного магнетона;
3. магнитный момент нейтрона отрицателен и его модуль также как и магнитный момент протона больше ядерного магнетона.

34. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома циркония имеет вид  ${}^3F_2$ . Квантовые числа его незаполненной 4d оболочки равны

1. S=2, L=3, J=2.
2. S=2, L=6, J=4.
3. S=1, L=3, J=4.

35. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома железа имеет вид  ${}^5D_4$ . Квантовые числа его незаполненной 3d оболочки равны

1. S=2, L=2, J=4.
2. S=1, L=3, J=2.
3. S=2, L=2, J=2.

36. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома кобальта имеет вид  ${}^4F_{9/2}$ . Квантовые числа его незаполненной 3d оболочки равны

1. S=2, L=3, J=4.
2. S=3/2, L=3, J=9/2.

3.  $S=2, L=3/2, J=4$ .

37. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома никеля имеет вид  ${}^3F_4$ . Квантовые числа его незаполненной 3d оболочки равны

1.  $S=2, L=3, J=3$ .

2.  $S=1, L=3, J=4$ .

3.  $S=2, L=1, J=3$ .

38. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома церия имеет вид  ${}^3H_4$ . Квантовые числа его незаполненной 4f оболочки равны

1.  $S=1, L=6, J=5$ .

2.  $S=1, L=5, J=4$ .

3.  $S=2, L=3, J=5$ .

39. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома празеодима имеет вид  ${}^4I_{9/2}$ . Квантовые числа его незаполненной 4f оболочки равны

1.  $S=2, L=4, J=7/2$ .

2.  $S=3/2, L=6, J=9/2$ .

3.  $S=2, L=7/2, J=9/2$ .

40. Обозначение спектроскопического термина основного состояния атома марганца имеет вид  ${}^6S_{5/2}$ . Квантовые числа его незаполненной 3d оболочки равны

1.  $S=3, L=1, J=5/2$ .

2.  $S=5/2, L=0, J=5/2$ .

3.  $S=3/2, L=1, J=5/2$ .

41. На графике приведены температурные зависимости констант анизотропии  $K_1$  и  $K_2$  монокристалла гадолиния. Определить как меняется тип магнитокристаллической анизотропии Gd в интервале температур  $0 < T < 300$  К ( $T_c = 25^\circ\text{C}$ ). Схематично нарисовать зависимость угла  $\Theta$  между осью C

гексагональной элементарной ячейки и направлением легкой оси намагничивания от температуры.

42. Вычислить напряженность поля анизотропии монокристаллического кобальта, если его самопроизвольная намагниченность  $I_S=1,42$  кГс, а константа одноосной анизотропии при комнатной температуре  $K_1=4,1 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>.

43. Оценить величину первой константы анизотропии одноосного монокристалла  $\text{SmCo}_5$ , если его поле анизотропии  $H_A=430$  кЭ, удельная намагниченность насыщения  $\sigma_S=100$  Гс·см<sup>3</sup>/г, а плотность  $\rho=8,7$  г/см<sup>3</sup>.

### Примеры тестовых заданий

Занятие 1. Принцип Паули. Правила Хунда для определения квантовых чисел электронных оболочек многоэлектронных атомов.

Рассчитать квантовые числа  $S$ ,  $L$ ,  $J$  для неполностью заполненных электронных оболочек следующих атомов:

3d – переходных металлов Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni;

4d - металлов Zr, Hf, W, Ir

4f – металлов Sm, Pr, Dy, Er, Yb.

Записать обозначения термов основного состояния этих атомов.

Занятие 2. Спиновые, орбитальные и полные магнитные моменты атомов.

Занятие 3. Обменное взаимодействие. Обменная энергия. Обменный параметр и его приближенная оценка по величине температуры Кюри.

Оценить обменную энергию, ее объемную плотность и обменный параметр по температуре Кюри для следующих металлов:

Fe, Co, Ni, Gd, Dy. Составить таблицу с указанием значений рассчитанных величин и температур Кюри.

Занятие 4. Взаимодействие намагниченного образца с собственным размагничивающим полем. Магнитостатическая энергия. Размагничивающий фактор.

Задача 1. Определите поверхностную плотность магнитостатической энергии бесконечной пластины толщиной  $a$ , намагниченной до величины остаточной намагниченности  $I$  параллельно и перпендикулярно ее плоскости.

Задача 2. Определите магнитостатическую энергию шара радиуса  $R$ , намагниченного до величины остаточной намагниченности  $I$ .

Задача 3. Определите линейную плотность магнитостатической энергии бесконечного цилиндра радиуса  $R$ , намагниченного вдоль и перпендикулярно длинной оси.

## Пример контрольной работы

<p>ВАРИАНТ 1</p> <p>1. Найти величину внешнего поля <math>H</math>, в котором шар радиуса <math>R</math> из материала с восприимчивостью <math>\epsilon</math> имеет магнитный момент величиной <math>M</math>.</p> <p>2. В чем состоит физическая природа магнитоупругого взаимодействия? Какое физическое явление доказывает наличие этого типа взаимодействия в магнетиках? Как определяется магнитоупругая энергия?</p> <p>3. Определите значение внешнего магнитного поля, необходимого для намагничивания до насыщения тонкой монокристаллической пластины <math>S_0</math> в направлении, перпендикулярном ее плоскости, если <math>I_S=1440</math> Гс.</p>	<p>ВАРИАНТ 2</p> <p>1. Ферромагнитный образец во внешнем поле <math>H = 20</math> А/м достигает намагниченности <math>I = 15</math> А/м. Какую форму имеет образец, если в данном поле восприимчивость материала <math>\epsilon = 1</math>?</p> <p>2. В чем состоит магнитостатическое взаимодействие? Какова энергия и плотность энергии магнитостатического взаимодействия?</p> <p>3. Найти величину магнитного момента длинного тонкого круглого стержня радиуса <math>R</math> из материала с магнитной восприимчивостью <math>\chi</math>, если он помещен в магнитное поле <math>H</math>, направленное перпендикулярно длинной оси стержня.</p>
<p>ВАРИАНТ 3</p> <p>1. Во внешнем поле <math>H = 100</math> А/м сферический ферромагнитный образец достигает намагниченности <math>I = 270</math> А/м. Чему равна магнитная восприимчивость материала в данном поле?</p> <p>2. В чем состоит физическая причина возникновения собственного размагничивающего поля образца? Как направлено это поле по отношению к намагниченности? Чему равно истинное (внутреннее) магнитное поле намагниченного образца? Почему на практике необходимо учитывать различие в значениях внешнего и внутреннего полей?</p> <p>3. Определить эффективную ширину <math>180^\circ</math>-ной доменной границы в кобальте, если известны значения обменного параметра <math>A = 0,75 \cdot 10^{-6}</math> эрг/см и константы анизотропии <math>K_1=4,3 \cdot 10^6</math> эрг/см<sup>3</sup>.</p>	<p>ВАРИАНТ 4</p> <p>1. Во внешнем поле <math>H</math> сферический ферромагнитный образец достигает намагниченности <math>I_0</math>. Образец сложной формы из данного материала в том же поле имеет намагниченность <math>I_N</math>. Рассчитайте размагничивающий фактор образца сложной формы.</p> <p>2. Что такое размагничивающий фактор образца? Почему для образцов различной геометрической формы он имеет разное значение? Каким условиям удовлетворяют размагничивающие факторы тел в форме эллипсоидов вращения? Приведите примеры значений фактора формы для шара, бесконечного длинного цилиндра, бесконечной тонкой пластины.</p> <p>3. Определить намагниченность насыщения никеля, если известно, что сферический образец <math>Ni</math> достигает магнитного насыщения в поле <math>H=2</math> кЭ.</p>

### Вопросы для самоподготовки

1. Каковы особенности обменного взаимодействия в ферримагнетиках?
2. Как в модели ферримагнетизма определяется внутримолекулярное поле каждой из магнитных подрешеток?
3. Как зависит от температуры магнитная восприимчивость ферримагнетиков?
4. Объяснить смысл всех параметров, входящих в закон Кюри-Вейсса для ферримагнетиков? Для какой области температур он справедлив?
5. Какие виды температурных зависимостей намагниченности ферримагнетиков Вам известны? С чем связаны особенности формы кривой  $I_s(T)$ ?
6. Что такое температура компенсации? В чем состоит различие между температурой компенсации и температурой Кюри ферромагнетиков?
7. Какие вещества называются антиферромагнетиками? Каковы особенности их магнитной структуры?
8. Что такое температура Нееля?
9. Каковы особенности обменного взаимодействия в антиферромагнетиках?
10. Чему равна результирующая намагниченность антиферромагнетика?
11. Как определяется внутримолекулярное поле для каждой из магнитных подрешеток антиферромагнетика? Чему равны намагниченности подрешеток?
12. Сформулируйте закон Кюри-Вейсса для антиферромагнетиков, поясните смысл основных констант, входящих в него. Укажите, в какой области температур он выполняется.
13. Существуют ли различия в температурных зависимостях антиферромагнитной восприимчивости, измеренной вдоль спиновой оси антиферромагнетика и перпендикулярно ей? Чем обусловлены эти различия?
14. Какие вещества называются ферромагнетиками?

15. На каких гипотезах, выдвинутых для объяснения особенностей ряда магнитных свойств ферромагнетиков, построена теория молекулярного поля Вейсса?
16. В чем состоит модель, лежащая в основе теории молекулярного поля Вейсса? Кратко сформулировать основные положения этой теории. Как определяется намагниченность ферромагнетика в теории молекулярного поля?
17. Что такое температура Кюри ферромагнетика?
18. Что такое внутримолекулярное поле Вейсса? Каков его физический смысл?
19. Как оценить постоянную молекулярного поля экспериментальным путем? Какой порядок величины имеет внутримолекулярное поле? Сопоставить эти значения с реально достижимыми магнитными полями?
20. Сформулировать закон Кюри-Вейсса для намагниченности и магнитной восприимчивости ферромагнетика. Объяснить смысл всех параметров, входящих в формулу. Указать границы применимости закона.
21. Основные положения модели, лежащей в основе термодинамического рассмотрения парамагнетизма системы слабо взаимодействующих ионов.
22. Что такое функция Ланжевена? Какую магнитную характеристику можно описать функцией Ланжевена?
23. Сформулируйте закон Кюри для парамагнетика.
24. Как основные магнитные характеристики ( $I$ ,  $H$ ,  $C_I$ ,  $C_H$ ) определяются через основные термодинамические потенциалы  $F$ ,  $\Phi$ ,  $U$ ?
25. Уравнение магнитного состояния с точки зрения термодинамики.
26. Можно ли, используя термодинамический подход, объяснить существование намагниченности? Ответ обосновать.
27. В чем состоит термодинамическая аномалия теплоемкости?
28. Как объяснить с точки зрения термодинамики различие  $C_I$  и  $C_H$ ?

29. Какую информацию о параметрах вещества можно получить, исследуя экспериментально ферромагнитную аномалию теплоемкости?
30. В чем заключается магнетокалорический эффект? Как с термодинамической точки зрения объяснить его природу?
31. Записать формулы для магнетокалорического эффекта ферромагнетика через изменение намагниченности, и магнетокалорического эффекта парамагнетика через изменение напряженности магнитного поля. Где находят практическое применение эти формулы?
32. В чем заключаются особенности магнитной структуры ферромагнетиков?
33. Чему равна намагниченность ферромагнетика в модели ферромагнетизма, предложенной Неелем?