

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Смирнов Сергей Николаевич  
Должность: врио ректора  
Дата подписания: 23.09.2022 12:51:25  
Уникальный программный ключ:  
69e375c64f7e975d4e8830e7b4fcc2ad1bf35f08

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Утверждаю:

Руководитель ООП



*[Handwritten signature]*

Б.Б.Педько

«28» июня 2022 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

**Физика магнитных явлений (ч.1)**

Направление подготовки

03.03.02 Физика

профиль

Физика конденсированного состояния вещества

Для студентов

3 курса, очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Дегтева О.Б.

*[Handwritten signature]*

Тверь, 2022

## **I. Аннотация**

### **1. Цель и задачи дисциплины**

**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.

**Задачами** освоения дисциплины являются:

- изучение классических теорий ферро-, антиферро-, ферромагнетизма 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**

Дисциплина «Физика магнитных явлений» изучается в модуле Физика конденсированного состояния Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Для успешного освоения дисциплины обучающемуся необходимы знания по предшествующим курсам «Кристаллография», «Физика конденсированного состояния вещества», «Математический анализ», «Электричество и магнетизм».

Логически и содержательно она связана с дисциплинами «Физика магнитных материалов», «Доменная структура магнетиков»,

«Микромагнетизм». Физика магнитных явлений тесно связана с такими отраслями современной науки как математика, физическая химия, электроника, информационная техника.

**3. Объем дисциплины:** 3 зачетные единицы, 108 академических часов, **в том числе:**

**контактная аудиторная работа:** лекции 28 часов, практические занятия 28 часов;

**самостоятельная работа:** 52 часа, в том числе контроль 27 часов.

**4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	УК-1.1. Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие. УК-1.2. Определяет, интерпретирует и ранжирует информацию, требуемую для решения поставленной задачи.
ПК-2. Способен выполнять экспериментальную работу в области физики и оформлять результаты исследований и разработок.	ПК-2.2. Анализирует физические явления и процессы в области физики конденсированного состояния и составляет отчет по теме исследования или по результатам проведенных экспериментов.

**5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения**

Экзамен в 6 семестре.

**6. Язык преподавания:** русский.

**II. Содержание дисциплины, структурированное по разделам с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

**1. Для студентов очной формы обучения**

Учебная программа - наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)		Самостоятельная работа (час.)
		Лекции	Практ. (лабор.) занятия	
1. Краткий исторический очерк развития учения о магнетизме. Роль русских ученых в развитии магнетизма.	4	2		2
2. Спиновый и орбитальный магнитные и механические моменты электронов в атоме. Магнетон Бора.	8	2	2	4
3. Полный магнитный момент электронной оболочки. Принцип Паули. Правила Хунда. Фактор Ланде.	8	2	2	4
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.	8	2	2	4
5. Термодинамика магнитных явлений. Основные термодинамические соотношения. Уравнение магнитного состояния.	12	3	2	7
6. Теория молекулярного поля Вейсса. Достоинства и недостатки классического подхода для объяснения природы ферромагнетизма.	12	3	2	7
7. Теория молекулярного поля Вейсса. Достоинства и недостатки классического подхода для объяснения природы ферромагнетизма.	10	2	2	6
7. Термодинамика магнитных явлений. Ферромагнитная аномалия теплоемкости. Магнетокалорический эффект.	6	2		4
8. Магнитные моменты протона и нейтрона. Аномалии ядерного магнетизма. Магнитный момент атомного ядра. Ядерный магнетон.	8	2	2	4
9. Энергия намагниченного тела. Работа	16	6	2	8

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.	12	4	2	6
11. Ферромагнетики, диамагнетики, парамагнетики. Основные критерии различия веществ по степени магнитного порядка.	10	2	2	6
12. Полуклассическое описание обменного взаимодействия. Обменная энергия. Обменный параметр.	10	2	2	6
13. Понятие магнитного домена и доменной структуры. Скачки Баркгаузена, как экспериментальное доказательство существования доменов. Теория доменной структуры в магнитоупорядоченных кристаллах по Ландау и Лившицу.	12	4	2	6
14. Магнитостатическая энергия. Собственное размагничивающее поле магнетиков. Размагничивающий фактор.	10	2	2	6
15. Теория ферромагнетизма Нееля. Магнитные подрешетки. Основные типы температурных зависимостей намагниченности ферромагнетиков. Точка компенсации.	8	4		4
16. Энергия магнетика во внешнем магнитном поле. Физическая природа изменения магнитного состояния при изменении внешнего магнитного поля.	10	2	2	6
Размагниченное состояние и состояние магнитного насыщения.	6	2		4
17. Парамагнетизм систем слабозаимодействующих ионов. Закон Кюри.	6	2		4
18. Природа магнитоупругого взаимодействия. Магнитоупругая энергия. Магнитострикция и константы магнитострикции.	8	2		6

19. Теория антиферромагнетизма в приближении молекулярного поля. Понятие асимптотической точки Кюри. Закон Кюри-Вейсса для антиферромагнетиков.	8	2	2	6
20. Температурные зависимости магнитной восприимчивости в ферро- ферри-, антиферромагнетиках и парамагнетиках и их объяснение в рамках классических теорий.	9	3	1	5
21. Поле анизотропии и способы его определения. Экспериментальные методы определения констант магнитокристаллической анизотропии.	9	4		5
22. Другие типы магнитной анизотропии. Физические причины, обуславливающие их существование.	8	2		4
23. Виды магнитных структур: коллинеарные ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики. Метод магнитной нейтронографии.	5	2		3
24. Природа сверхтонкого взаимодействия в атоме. Энергия сверхтонкого взаимодействия. Экспериментальное подтверждение существования сверхтонкого взаимодействия.	8	2	2	4
25. Учет собственных размагничивающих полей образцов конечной формы при магнитных измерениях. «Сдвиговая коррекция» кривых намагничивания и петель гистерезиса.	10	2	2	4
26. Термодинамика магнитных явлений. Магнетокалорический эффект, выраженный через изменение намагниченности и через изменение внешнего магнитного поля. Практическое использование магнетокалорического эффекта.	9	3	1	5
27. Понятие магнитного домена и доменной структуры. Теория доменной структуры в магнитоупорядоченных кристаллах по Ландау и Лившицу.				4

28. Доменные границы Блоха. Эффективная ширина и энергия блоховских доменных границ для одноосного магнетика.				
Итого	252	36	72	144

### **III. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

- Тесты и задачи для практических занятий и самостоятельного решения;
- Вопросы для самоподготовки;
- Контрольные вопросы для экзамена;
- Требования к рейтинг-контролю

### **IV. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине**

**Форма проведения промежуточного контроля:** студенты, освоившие программу курса могут получить оценку по итогам семестровой и полусеместровой рейтинговой аттестации согласно «Положению о рейтинговой системе обучения ТвГУ» (протокол №8 от 30 апреля 2020 г.).

Если условия «Положения о рейтинговой системе ...» не выполнены, то экзамен сдается согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.).

**1. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 1 (ПК-1: способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин).**

<b>Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина</b>	<b>Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков</b>	<b>Критерии оценивания компетенции, шкала оценивания</b>
Начальный <b>Уметь:</b> применять полученные знания при	<b>Примеры задач.</b> 1. Рассчитать квантовые числа $S, L, J$ для не полностью	1. Не использует базовые знания в области физики магнитных явлений при

<p>решении конкретных задач в профессиональной деятельности, определять конкретные цели, которые должны быть достигнуты в процессе эксперимента (решения задач).</p>	<p>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.  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>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, допускает ошибки.  5. Свободно использует основные физические представления и законы, получает правильный результат.</p>
<p>Начальный  <b>Знать:</b> основные классические теоретические модели физики ферро-ферримагнетизма, парамагнетизма и диамагнетизма.</p>	<p><b>Примеры задач.</b>  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.  2. Определите поверхностную плотность магнитостатической энергии бесконечной пластины толщиной <math>a</math>, намагниченной до величины остаточной намагниченности <math>I</math> параллельно и перпендикулярно ее плоскости.  3. Оцените величину внешнего магнитного поля, необходимую для магнитного насыщения сферического образца железа.</p>	<p>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.</p>



	<p><b>Примеры вопросов для самостоятельного изучения.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Каковы особенности обменного взаимодействия в ферримагнетиках?</li> <li>2. Как в модели ферримагнетизма определяется внутримолекулярное поле каждой из магнитных подрешеток?</li> <li>3. Как зависит от температуры магнитная восприимчивость ферримагнетиков?</li> <li>4. Объяснить смысл всех параметров, входящих в закон Кюри-Вейсса для ферримагнетиков? Для какой области температур он справедлив?</li> </ol> <p><b>Вопросы для экзамена.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Энергия магнетика во внешнем магнитном поле. Физическая природа изменения магнитного состояния при изменении внешнего магнитного поля. Размагниченное состояние и состояние магнитного насыщения.</li> <li>2. Парамагнетизм систем слабозадействующих ионов (классическая теория парамагнетизма Ланжевена). Закон Кюри.</li> </ol>	
<p>Промежуточный <b>Владеть:</b> методиками планирования и разработки физических экспериментов, методами анализа и обработки полученных результатов,</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Измерение кривых намагничивания высокоанизотропных магнетиков вдоль легкой и трудной осей намагничивания на вибрационном магнитометре. Определение</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не владеет методиками магнитных измерений и наблюдения доменной структуры.</li> <li>2. Удовлетворительно владеет методиками, но не может объяснить</li> </ol>

<p>экспериментальными навыками работы с современными приборами.</p>	<p>намагниченности насыщения и поля анизотропии. 2. Наблюдение и регистрация доменной структуры магнетиков с помощью металлографического микроскопа.</p>	<p>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.</p>
<p>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).</p>	<p>1. На графике приведены температурные зависимости констант анизотропии <math>K_1</math> и <math>K_2</math> монокристалла гадолиния. Определить как меняется тип магнитокристаллической анизотропии Gd в интервале температур <math>0 &lt; T &lt; 300</math> К (<math>T_c = 25^\circ\text{C}</math>). Схематично нарисовать зависимость угла <math>\Theta</math> между осью C гексагональной элементарной ячейки и направлением легкой оси намагничивания от температуры. 2. Оценить величину первой константы анизотропии одноосного монокристалла <math>\text{SmCo}_5</math>, если его поле анизотропии <math>H_A = 430</math> кЭ, удельная намагниченность насыщения <math>\sigma_s = 100</math> Гс·см<sup>3</sup>/г, а плотность <math>\rho = 8,7</math> г/см<sup>3</sup>.</p>	<p>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, допускает ошибки. 5. Свободно использует основные физические представления и законы, получает правильный результат.</p>
<p>Промежуточный <b>Знать:</b> основные</p>	<p>1. Обозначение спектроскопического термина</p>	<p>1. Не знает основных классических законов</p>

<p>классические теоретические модели физики ферро-ферримагнетизма, парамагнетизма и диамагнетизма.</p>	<p>основного состояния атома церия имеет вид <math>^3H_4</math>.          Определить основные квантовые числа его незаполненной 4f оболочки.          2. Как основные магнитные характеристики (<math>I</math>, <math>N</math>, <math>C_I</math>, <math>C_N</math>) определяются через основные термодинамические потенциалы <math>F</math>, <math>\Phi</math>, <math>U</math>?</p>	<p>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.</p>
--	---	---

**2. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 2** (ПК-2: способность 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).

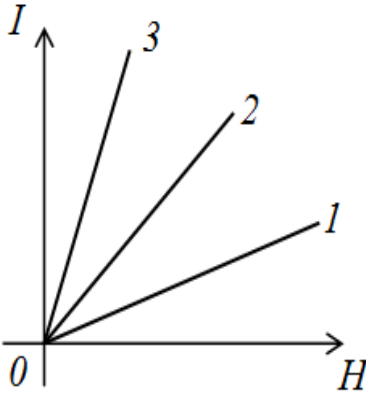
<p><b>Этап формирования компетенции, в котором участвует дисциплина</b></p>	<p><b>Типовые контрольные задания для оценки знаний, умений, навыков</b></p>	<p><b>Критерии оценивания компетенции, шкала оценивания</b></p>
<p>Начальный  <b>Уметь:</b> правильно производить нужные измерения, обрабатывать их с применением прикладных компьютерных программ, анализировать полученные результаты на основе теоретических знаний.</p>	<p>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 Word.</p>	<p>1. Не умеет правильно производить измерения и обрабатывать результаты с помощью стандартных и специализированных компьютерных программ.          2. Обладает лишь начальными навыками работы на экспериментальных установках и методами компьютерной обработки</p>

		<p>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>Начальный</p> <p><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.</p> <p>2. Экспериментальные методы исследования доменной структуры ферро- и ферримагнетиков.</p> <p>3. Как оценить постоянную молекулярного поля экспериментальным путем? Какой порядок величины имеет внутримолекулярное поле? Сопоставить эти</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</p>

	<p>значения с реально достижимыми магнитными полями?</p>	<p>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 результаты.</p> <p>3. Удовлетворительно владеет компьютерными</p>

		<p>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>\text{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</p>

		<p>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 экспериментальных установок, допускает отдельные ошибки.</p>

	 <p>1. Кривая 1. 2. Кривая 3. 3. Кривая 2.</p>	<p>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>
--	---	---

**3. Типовые контрольные задания для проверки уровня сформированности компетенции 3 (ПК-3: готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований).**

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> 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?</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)</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>\chi = 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>
---	--	--

## **V. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

### **а) Основная литература:**

1. Гуфан, А. Ю. Физика магнитных явлений : учебник / А. Ю. Гуфан. — Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2020. — 372 с. — ISBN 978-5-9275-3552-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/180688>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Боровик, Е. С. Лекции по магнетизму : учебное пособие / Е. С. Боровик, В. В. Еременко, А. С. Мильнер. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 512 с. — ISBN 5-9221-0577-9. — Текст :

электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2118>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

б) Дополнительная литература:

1. Кингсеп А. С. Основы физики: Курс общей физики: учебник: в 2-х т. - М.: Физматлит, 2007. - Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. - 704 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступ: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82178>
2. Лилеев, А. С. Механизмы перемагничивания магнитных материалов. Моделирование процессов перемагничивания : учебное пособие / А. С. Лилеев. — Москва : МИСИС, 2020. — 49 с. — ISBN 978-5-907226-94-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/156005>. — Режим доступа: для авториз. пользователей.

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

Программное обеспечение:

Операционная система Microsoft Windows 7-10.

Офисный пакет Microsoft Office 2010+.

Программа научной графики Origin.

Внутренние информационные ресурсы:

Научная библиотека ТвГУ – <http://library.tversu.ru>;

Сервер доступа к модульной объектно-ориентированной динамической учебной среде Moodle – <http://moodle.tversu.ru>;

Сервер обеспечения дистанционного обучения и проведения Web-конференций Mirapolis Virtual Room – <http://mvr.tversu.ru>;

Репозиторий научных публикаций ТвГУ – <http://eprints.tversu.ru>.

Внешние информационные ресурсы:

Научная электронная библиотека eLibrary.ru;

Электронная база данных диссертаций РГБ;

База данных Реферативных журналов ВИНИТИ;

Полнотекстовый доступ к журналам АІР (Американский институт физики);

Полнотекстовый доступ к журналам и книгам издательства Springer Verlag;

Полнотекстовый доступ к отдельным журналам и книгам Института инженеров по электротехнике и электронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers);

Реферативная база Inspec (доступ к рефератам и полным текстам монографий и научных статей в области физики, электротехники, электроники, коммуникаций, компьютерных наук и информационных технологий).

## **VII. 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,  $T \cdot m^3 \cdot kg^{-1}$ .
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.  $\gamma = 2\sqrt{\frac{A}{K_1}}$ . 2.  $\gamma = 4\sqrt{A \cdot K_1}$ . 3.  $\gamma = 8\sqrt{\frac{K_1}{A}}$ .
10. Используя какую из перечисленных экспериментальных зависимостей можно приближенно оценить величину обменного параметра  $A$  ферромагнетика
1.  $\mu(H)$ . 2.  $I(H)$ . 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.

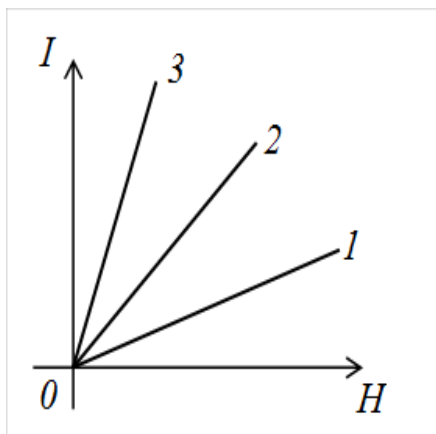
16. Величину собственного размагничивающего поля ферромагнитного образца определяет

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

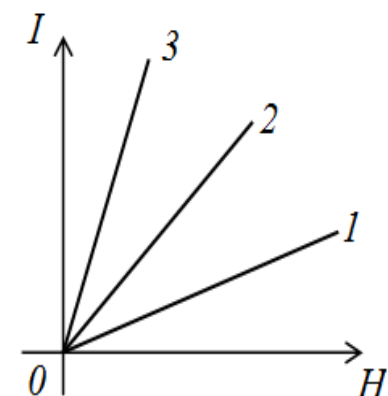
1.  $I = N\mu_0 L(\alpha)$  . 2.  $I = N\mu_0 B_j(\alpha)$ . 3.  $I = (N_+ - N_-)\mu_B$ .

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



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

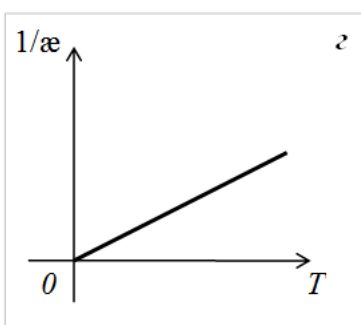
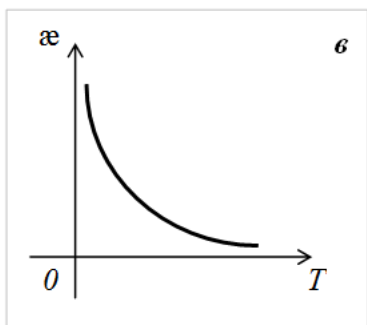
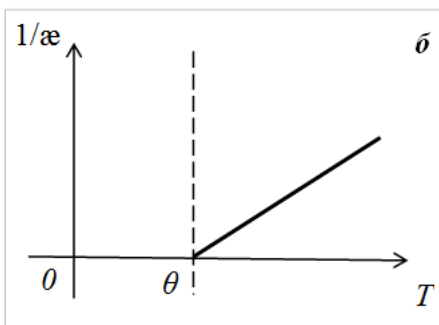
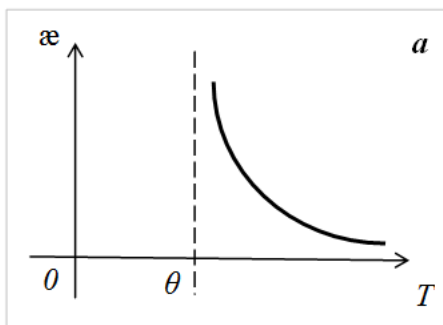
19. Какая из приведенных кривых намагничивания парамагнетика измерена при наименьшей температуре?



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

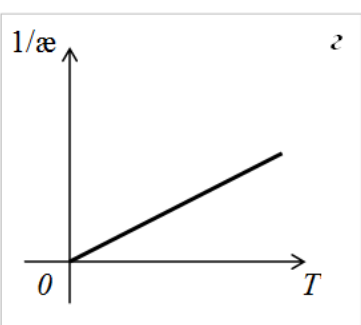
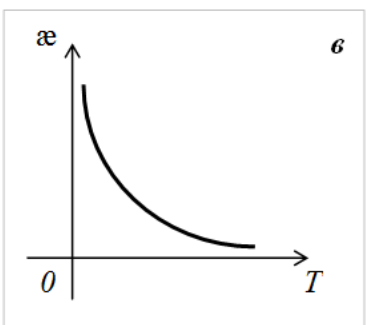
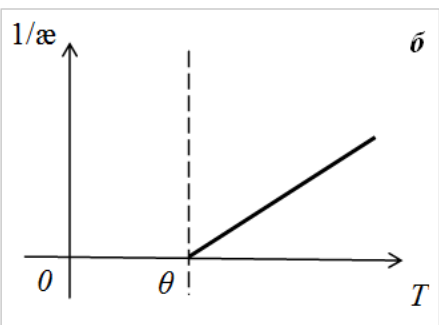
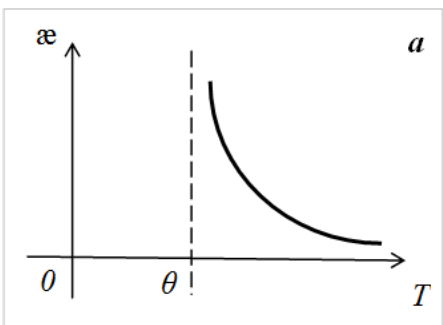


20. Выберите те температурные зависимости магнитной восприимчивости  $\chi$  и обратной магнитной восприимчивости  $1/\chi$ , которые следуют из классической теории ферромагнетизма



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><b>ВАРИАНТ 1</b></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><b>ВАРИАНТ 2</b></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><b>ВАРИАНТ 3</b></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><b>ВАРИАНТ 4</b></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?

#### **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, гиромагнитная 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 ферримагнетизма Нееля. Магнитные подрешетки. Основные типы температурных зависимостей намагниченности ферримагнетиков. 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 слабовзаимодействующих 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.

### **Требования к рейтинг-контролю**

В семестре проводится два модуля, каждый из которых завершается письменной контрольной работой по решению задач или тестом. По сумме баллов, набранных студентом за два модуля, выставляется рейтинговая аттестация. Максимальное количество баллов, которые может получить студент за весь курс обучения равно 60. Дополнительные 10 баллов могут быть реализованы в период работы на семинарских занятиях (ответы у доски, доклады по темам рефератов). Для допуска к сдаче экзамена сумма баллов должна быть не менее 20. Семестр завершается экзаменом. Максимальное количество баллов, которые студент может получить за ответ на экзамене равно 40.

За активную работу на практических занятиях – 10 премиальных баллов.

### **VIII. Перечень педагогических и информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем**

Преподавание учебной дисциплины «Физика магнитных явлений ч.1» строится на сочетании лекций, практических занятий и различных форм самостоятельной работы студентов. На практических занятиях на примере решения физических задач формируются умения логически мыслить, способности применять физические законы для решения конкретных практических проблем, осмысление универсальности проявления законов природы. Способом контроля знаний студентов являются тестирование и контрольные работы.

В процессе освоения дисциплины используются традиционные формы лекций и практических занятий, тестирование.

Удельный вес практических занятий от общего объема часов составляет 14%, занятий лекционного типа - 29%, часов на самостоятельную работу - 57%.

#### IX. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Наименование специальных* помещений	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
<p>Учебно-научная лаборатория магнитных и электрических измерений № 40 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Лабораторные электронные весы с гирей M-ER 122ACF JR-600.01 LCD</li> <li>2. Вольтметр АКПП-2101</li> <li>3. Вольтметр АКПП-2101</li> <li>4. Источник питания с опцией интерфейса USB АКПП-1141</li> <li>5. Источник питания с опцией интерфейса USB АКПП-1141</li> <li>6. Компьютер iRU Corp 510 I5-2400/4096/500/G210-512/DVD-RW/W7S</li> <li>7. Компьютер с монитором 940N Core 6550 Vox/Asus P5KSE/2*1024DDRII/160/7200/DVDRW/</li> <li>8. Экран настенный ScreenMedia 153*203</li> <li>9. Мультиметр цифровой высокой точности UT804</li> <li>10. Установка импульсного намагничивания "Мишень"</li> <li>11. Мультиметр цифровой высокой точности UT804 (2 шт.)</li> <li>12. Электромагнит (3 шт.)</li> <li>13. Электромагнит ЭМ-1</li> <li>14. Осциллограф С-1-68</li> <li>15. Ферротестер</li> <li>16. Блок питания Б5-9</li> <li>17. Вольтметр В7-27А (2 шт.)</li> <li>18. Генератор ГЗ-102 (3 шт.)</li> <li>19. Источник питания Б-5-8 (2 шт)</li> <li>20. Осциллограф С-1-65</li> <li>21. Генератор ГЗ-34 (2 шт.)</li> <li>22. Блок питания Б-5-21</li> <li>23. Микровеберметр Ф-190</li> </ol>	<p>Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт на передачу прав №1051 от 05.08.2020 г.  MS Office 365 pro plus - Акт на передачу прав №1051 от 05.08.2020 г.  Kaspersky Endpoint Security для Windows - Акт на передачу прав №1842 30.11.2020  Архиватор 7-Zip - бесплатно  Acrobat Reader DC - бесплатно  Google Chrome – бесплатно  Почта Outlook – бесплатно  Origin 8.1 Sr2 - договор №13918/M41 от 24.09.2009 с ЗАО «СофтЛайн Трейд»;  NI MAX  Measurement &amp; Automation Explorer – бесплатно</p>

	24. Проектор BenQ MP777 25. Блок питания 26. Вольтметр В-7-23 27. Генератор ГЗ-109 28. Генератор Ф-578 29. Источник питания Б-5-21	Microsoft Visual Studio 2019 - Акт на передачу прав №1051 от 05.08.2020 г.  Mozilla Firefox - бесплатно
--	---	---

### Помещения для самостоятельной работы:

Наименование помещений	Оснащенность помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
Помещение для самостоятельной работы, учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, практики, Компьютерный класс физико-технического	1. Компьютер RAMEC STORM C2D 4600/160Gb/ 256mB/DVD-RW +Монитор LG TFT 17" L1753S-SF – 12 шт 2. Мультимедийный комплект учебного класса (вариант № 2) Проектор Casio XJ-M140, настенный проекц. экран Lumien 180*180. ноутбук Dell N4050. сумка 15,6", мышь 3. Коммутатор D-Link 10/100/1000mbps 16-portr DGS-1016D 4. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО 5. Видеокамера IP-FALCON EYE FE-IPC-BL200P, ОнЛайн Трейд ООО 6. Демонстрационное оборудование комплект «LegoMidstormsEV3» 7. Комплект учебной мебели	Adobe Acrobat Reader DC - бесплатно Cadence SPB/OrCAD 16.6 - Государственный контракт на поставку лицензионных программных продуктов 103 - ГК/09 от 15.06.2009 Google Chrome - бесплатно Java SE Development Kit 8 Update 45 (64-bit) - бесплатно Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows – Акт на передачу прав №2129 от 25 октября 2016 г. Lazarus 1.4.0 - бесплатно Lego MINDSTORM EV3 - бесплатно Mathcad 15 M010 - Акт предоставления прав IC00000027 от 16.09.2011 MATLAB R2012b - Акт предоставления прав № Us000311 от 25.09.2012

факультета. Компьютерная лаборатория робототехнических систем №4а (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)		Microsoft Express Studio 4 - бесплатно MiKTeX 2.9 - бесплатно MPICH 64-bit – бесплатно MSXML 4.0 SP2 Parser and SDK - бесплатно Microsoft Windows 10 Enterprise - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017 MS Office 365 pro plus - Акт приема-передачи № 369 от 21 июля 2017
--	--	---

### Х. Перечень обновлений рабочей программы дисциплины

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины (модуля)	Описание внесенных изменений	Дата и протокол заседания, утвердившего изменения
1	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
2	Раздел IV	Скорректированы задания для промежуточной аттестации в соответствии с обновленным «Положением о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) студентов ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г.
3	Раздел V	Обновлен перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г
4	Раздел IX	Оснащенность аудиторного фонда для проведения учебных занятий и	Протокол Совета ФТФ №5 от 31 октября 2017 г



		самостоятельной работы студентов согласно «Справки МТО ООП ...»	
5	Раздел IV	Скорректирован фонд оценочных средств для проверки уровня сформированности закрепленных за дисциплиной компетенций	Протокол Совета ФТФ № 6 от 15.01.2019 г.
6	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
7	Раздел IV	Внесены изменения в соответствии с «Положением о рейтинговой системе обучения в ТвГУ»	Протокол Совета ФТФ № 10 от 19.05.2020 г.
8	Раздел IX	Актуализированы данные на основе Справки МТО ООП	Протокол Совета ФТФ №14 от 03.07.2021
9	Раздел V	Обновлен перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины	Протокол Совета ФТФ №14 от 03.07.2021