




МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования


**«Дальневосточный федеральный университет»  
(ДФУ)**

**Институт наукоемких технологий и передовых материалов (Школа)**

СОГЛАСОВАНО  
Руководитель ОП

  
(подпись) А.А. Саранин  
(ФИО)



УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой Физики  
низкоразмерных структур  
  
(подпись) А.А. Саранин  
(ФИО.)  
14 января 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Основы микромагнитного моделирования

**Направление подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника**  
магистерская программа

«Электроника и нанoeлектроника (совместно с ИАПУ ДВО РАН)»

**Форма подготовки очная**

курс   2   семестр   3    
лекции   0   час.  
практические занятия   0   час.  
лабораторные работы   52   час.  
в том числе с использованием MAO лек.    /пр.    /лаб.    час.  
в том числе в электронной форме лек.    /пр.    /лаб.    час.  
всего часов аудиторной нагрузки   68   час.  
в том числе с использованием MAO    час.  
в том числе контролируемая самостоятельная работа    час.  
в том числе в электронной форме    час.  
самостоятельная работа   92   час.  
в том числе на подготовку к экзамену   36   час.  
курсовой проект   3   семестр  
зачет – не предусмотрено учебным планом  
экзамен   3   семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 22 сентября 2017 г. № 959

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры физики низкоразмерных структур, протокол № 5 от «14» января 2021 г.

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., член-корр., профессор Саранин А.А.

Составитель: д.ф.-м.н., профессор Саранин А.А.

Владивосток  
2021

**Оборотная сторона титульного листа РПД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Директор департамента: \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Директор департамента: \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## **Аннотация дисциплины «Основы микромагнитного моделирования»**

Учебная дисциплина «Основы микромагнитного моделирования» предназначена для магистрантов 2 курса магистратуры 11.04.04 Электроника и наноэлектроника, магистерской программы «Электроника и наноэлектроника (совместно с ИАПУ ДВО РАН)».

Дисциплина «Основы микромагнитного моделирования» входит в часть формируемую участниками образовательных отношений цикла дисциплин образовательной программы, является дисциплиной по выбору (Б1.В.ДВ.05.01), реализуется на 2 курсе в 3 семестре, завершается экзаменом. Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 5 зачетных единиц (180 часов). Учебным планом предусмотрены лабораторные занятия (52 час.), самостоятельная работа студента (128 час., в том числе 36 час. на подготовку к экзамену), курсовое проектирование.

Язык реализации – русский.

**Цель** изучения дисциплины - изучение физических и математических основ работы метода микромагнитного моделирования, а также приобретение практических навыков формулировки и решения научно-исследовательских задач в области наноманетизма.

### **Задачи:**

- Изучить теоретические основы, (законы, взаимодействия) позволяющие описать явления и процессы, реализующиеся в магнитных средах на наноразмерном уровне.
- Получить представления о методах конечных разностей и конечных элементов для решения задач математической физики в области наноманетизма.
- Получить практический навык работы в программном пакете The Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF).

Базой для освоения данной дисциплины являются курсы «Физика», «Дифференциальные уравнения», «Математическая физика», «Физика

магнитных пленок и наноразмерных структур».

В результате изучения данной дисциплины у обучающихся формируются следующие профессиональные компетенции:

Тип задач	Код и наименование профессиональной компетенции (результат освоения)	Код и наименование индикатора достижения компетенции
Научно-исследовательский	<b>ПК-3</b> Способен осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени	ПК-3.1 разрабатывает требования к средствам проведения эксперимента, контроля и диагностики
		ПК-3.2 разрабатывает проектные материалы при планировании и автоматизации эксперимента в избранной области электроники и нанoeлектроники
		ПК-3.3 тестирует и проводит диагностику изделий нанoeлектроники
	<b>ПК-4</b> Способен к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов	ПК-4.1 планирует основные этапы экспериментальных исследований
		ПК-4.2 самостоятельно проводит экспериментальные исследования, используя современные средства и методы
Научно-педагогический	<b>ПК-6</b> Способен планировать и проводить эксперименты по моделированию и практическому определению структуры и свойств материалов, перспективных для электроники и нанoeлектроники	ПК-6.1 демонстрирует знание методов исследования поверхности низкоразмерных структур, основных типов и параметров лабораторных установок для экспериментальных исследований
		ПК-6.2 осуществляет моделирование и практическое определение структуры и свойств материалов
		ПК-6.3 применяет методы математического описания физических процессов, протекающих в низкоразмерных структурах

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
ПК-3.1 разрабатывает требования к средствам проведения эксперимента, контроля и диагностики	<u>Знает</u> основные требования, предъявляемые к средствам проведения эксперимента, контроля и диагностики
	<u>Умеет</u> осуществлять разработку требований к средствам проведения эксперимента, контроля и диагностики в зависимости от исследовательской задачи
	<u>Владеет</u> навыками оценки соответствия средств проведения эксперимента, контроля и диагностики их нормативной документации
ПК-3.2 разрабатывает проектные материалы при планировании и автоматизации эксперимента в избранной области электроники и нанoeлектроники	<u>Знает</u> принципы разработки проектных материалов при планировании и автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов
	<u>Умеет</u> осуществлять непосредственную разработку проектных материалов для экспериментальных задач в избранной области электроники и нанoeлектроники
	<u>Владеет</u> навыками эксплуатации высокотехнологичного оборудования в избранной области электроники и нанoeлектроники

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Наименование показателя оценивания (результата обучения по дисциплине)
ПК-3.3 тестирует и проводит диагностику изделий наноэлектроники	<u>Знает</u> основные принципы, предъявляемые к тестированию и диагностике изделий наноэлектроники
	<u>Умеет</u> осуществлять подготовку к процессу тестирования и диагностики изделий наноэлектроники
	<u>Владеет</u> навыками проведения диагностики и тестирования изделий наноэлектроники в соответствии с технической и эксплуатационной документацией
ПК-4.1 планирует основные этапы экспериментальных исследований	<u>Знает</u> основные этапы экспериментальных исследований
	<u>Умеет</u> планировать этапы проведения эксперимента для исследовательских задач
	<u>Владеет</u> навыками организации и проведения экспериментальных исследований с применением современных средств и методов
ПК-4.2 самостоятельно проводит экспериментальные исследования, используя современные средства и методы	<u>Знает</u> современные средства и методы, позволяющие самостоятельно проводить экспериментальные исследования
	<u>Умеет</u> определять подходящие методы для проведения экспериментальных исследований
	<u>Владеет</u> навыками настройки высокотехнологичного оборудования в соответствии современными методами проведения экспериментальных работ
ПК-6.1 демонстрирует знание методов исследования поверхности низкоразмерных структур, основных типов и параметров лабораторных установок для экспериментальных исследований	<u>Знает</u> методы исследования поверхности низкоразмерных структур
	<u>Умеет</u> оценивать и выбирать подходящие типы и параметры лабораторных установок для экспериментальных исследований
	<u>Владеет</u> методами исследования низкоразмерных структур, навыками оценки и определения подходящих параметров лабораторных установок для экспериментальных исследований
ПК-6.2 осуществляет моделирование и практическое определение структуры и свойств материалов	<u>Знает</u> основы моделирования и расчётов атомной структуры и свойств материалов
	<u>Умеет</u> использовать необходимые алгоритмы и программные пакеты для осуществления моделирования структур и их свойств
	<u>Владеет</u> навыками моделирования структур и систем с разными параметрами
ПК-6.3 применяет методы математического описания физических процессов, протекающих в низкоразмерных структурах	<u>Знает</u> методы математического описания физических процессов, протекающих в низкоразмерных структурах
	<u>Умеет</u> выбирать подходящий для конкретной задачи метод математического описания
	<u>Владеет</u> навыками настройки или модификации программных алгоритмов и кодов, используемых для описания физических процессов, протекающих в низкоразмерных структурах

## СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА

### Лабораторные работы (68/ \_\_ час.)

**Лабораторная работа №1. Описание геометрических параметров и расчет магнитных постоянных моделируемого объекта на основании экспериментальных данных (4 / \_\_ час.)**

- Используя изображение экспериментального образца, опишите его геометрическую форму и рассчитайте площадь поверхности ферромагнитного слоя.
- Постройте в OriginPro петли гистерезиса, измеренные

- экспериментально на вибромагнетометре в полях измеренных параллельно и перпендикулярно оси легкого намагничивания (о.л.н.).
3. Проведите нормировку построенных петель гистерезиса.
  4. Определите значения таких характеристик формы петель как коэрцитивная сила ( $H_c$ ), остаточная намагниченность ( $M_r/M_s$ ), поля эффективной анизотропии ( $H_{eff}$ ).
  5. Зная состав экспериментальной структуры и геометрические параметры измеренного образца, рассчитайте его объем.
  6. Определив магнитный момент образца в насыщении, рассчитайте величину намагниченности насыщения образца ( $M_s$ ).
  7. Рассчитайте величину эффективной магнитной анизотропии, используя формулу  $K_{eff} = \frac{1}{2} H_{eff} \cdot M_s$ .
  8. Учитывая ориентацию о.л.н. и кристаллическую структуру экспериментального образца, произведите пересчет эффективной анизотропии в константу наведенной ( $K_u$ ), либо кристаллографической анизотропии ( $K_c$ ), которая будет использоваться в моделировании.
  9. Из графика температурного изменения намагниченности определите температуру Кюри ( $T_c$ ) и рассчитайте константу обменного взаимодействия ( $A$ ).
  10. Рассчитайте длину ферромагнитной корреляции для данного образца, используя формулу  $l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}$ .

**Лабораторная работа №2. Анализ экспериментальных результатов исследования магнитной структуры (4 / \_\_ час.)**

1. Используя изображение доменной структуры в размагниченном состоянии, полученное методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ), определите тип анизотропии образца.
2. Зная масштаб сканируемой на МСМ области образца, измерьте средний размер доменов.
3. Обозначьте направление намагниченности в каждом домене МСМ изображения.
4. Учитывая состав образца и толщины слоев, установите тип доменных границ.
5. Разделите на изображении МСМ дефекты сканирования связанные с

- рельефом и особенности магнитной структуры – топологические спиновые конфигурации (магнитные вихри, скирмионы, изменения киральности доменных границ).
6. Обработайте изображение образца №2 в размагниченном состоянии, полученное на магнитооптическом Керр-микроскопе.
  7. По виду доменной структуры на изображении Керр-микроскопии определите тип анизотропии.
  8. Зная масштаб сканируемой области образца на Керр-микроскопе, измерьте средний размер доменов.
  9. Используя изображения Керр-микроскопии измеренные на образце №2 в процессе перемагничивания, определите плотность центров зарождения доменов.
  10. Постройте зависимость изменения среднего размера доменов при изменении внешнего магнитного поля.

**Лабораторная работа №4. Установка, изучение интерфейса и работа в программном пакете OOMMF (4 /\_\_ час.)**

1. Зайдите на сайт разработчика The Object Oriented MicroMagnetic Framework <https://math.nist.gov/oommf/> и скачайте версию программного пакета необходимую для вашей операционной системы.
2. Скачайте ActiveTcl Software, подходящий для вашей ОС, с сайта <https://www.activestate.com/products/activetcl/downloads/> и установите данный пакет.
3. Запустите `oommf.tcl`.
4. В появившемся окне выберите подпрограмму `mmProbEd`.
5. Запустите пример 2D задачи из папки `app\mmpe\examples`.
6. Запустите подпрограмму `mmDisp` и выведите отображение распределения намагниченности в процессе расчета.
7. Поставьте расчет на паузу и сохраните полученное изображение микромагнитной структуры.
8. Откройте подпрограмму `mmGraph`, возобновите расчет и постройте график изменения полной энергии системы от числа итераций.
9. Дождитесь момента, когда полная энергия достигнет минимума и сохраните изображение микромагнитной структуры.
10. Откройте подпрограмму `Oxsii` и запустите пример 3D задачи из папки `app\oxs\examples`.

11. Запустите подпрограмму mmDataTable для отображения текущего значения величины магнитного поля, а также критерия сходимости задачи.
12. Запустите подпрограмму mmArchive для автоматического сохранения данных в ODT файле.
13. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петлю гистерезиса, полученную на моделировании 3D структуры.

**Лабораторная работа №4. Моделирование двумерных (2D) наноструктур в OOMMF (6 /\_\_ час.)**

1. Используя mmSolve2D задать двумерную задачу для наноструктур различной геометрической формы.
2. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 1.1.
3. Запустите подпрограмму mmDisp, включите отображение полученных наноструктур и сохраните OMF файл данных структур.
4. Задайте наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией и найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля.
5. Сделайте симуляцию процесса намагничивания образца в двух направлениях  $Ox$  и  $Oy$ , сохранив в ODT файле данные.
6. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте кривые намагничивания.
7. Смоделируйте процессы перемагничивания в полях ориентированных вдоль  $Ox$  и  $Oy$ , сохраните данные в ODT файле.
8. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса.
9. Напишите исходный код в формате MIF 1.1 для 2D наноструктуры с определенными магнитными и геометрическими параметрами.
10. Используя командную строку сконвертируйте исходный код из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1.

**Лабораторная работа №5. Моделирование трехмерных (3D) наноструктур различной геометрической формы в OOMMF (6 /\_\_ час.)**

1. Используя Oxsii задать трехмерную задачу для наноструктур различной геометрической формы.
2. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 2.1.



3. Запустите подпрограмму `mmDisp`, включите отображение полученных наноструктур и сохраните OMF файл данных 3D наноструктур.
4. Задайте наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией и найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля.
5. Сделайте симуляцию процесса намагничивания образца в трех направлениях  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ , сохранив в ODT файле данные.
6. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте кривые намагничивания в трех направлениях.
7. Смоделируйте процессы перемагничивания в полях ориентированных вдоль  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  сохраните данные в ODT файле.
8. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса.
9. Задайте наноструктуру, используя блок ImageAtlas, и сохраните OMF файл полученной геометрии.
10. Задайте массив наноструктур, используя блок MultiAtlas, и сохраните OMF файл полученной геометрии.

**Лабораторная работа №6. Особенности задания геометрии моделируемого 3D объекта при использовании ScriptAtlas в OOMMF (6 /\_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией, используя блок ScriptAtlas.
2. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 2.1.
3. Запустите подпрограмму `mmDisp`, включите отображение полученных наноструктур и сохраните OMF файл данных 3D наноструктур.
4. Задайте наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией, и найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля.
5. Задайте массив 3D наноструктур с определенными магнитными параметрами и геометрией, используя блок ScriptAtlas.
6. Сохранить файл исходных задач в формате MIF 2.1.
7. Запустите подпрограмму `mmDisp`, включите отображение полученного массива наноструктур и сохраните OMF файл.
8. Найдите конфигурацию намагниченности с минимальной энергией, реализуемую в отсутствие внешнего поля в массиве наноструктур.

**Лабораторная работа №7. Формирование необходимой начальной конфигурации намагниченности 3D структур в OOMMF (6 / \_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией, используя блок UniformVectorField, задайте однородную намагниченность по осям  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_z$ . Сохраните полученные распределения намагниченности в OMF файлах.
2. Задайте двухдоменное состояние через обращение к разным регионам моделируемой геометрии. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
3. Задайте двухдоменное состояние, используя подпрограмму ScriptVectorField. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
4. Задайте вихревое состояние, используя подпрограмму ScriptVectorField. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
5. Задайте полосовую доменную структуру, используя подпрограмму ScriptVectorField. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
6. Задайте хаотическое распределение намагниченности с размером ячейки  $4 \times 4 \times 4 \text{ нм}^3$ . Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.
7. Сравните полные энергии системы при различных конфигурациях намагниченности и найдите конфигурацию с минимальной энергией.

**Лабораторная работа №8. Виды обменного взаимодействия при моделировании 3D объектов в OOMMF (4 / \_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В полученной наноструктуре задайте косвенное обменное взаимодействие Дзялошинского-Мория.
2. Задайте двухдоменное состояние, после минимизации энергии сохраните OMF файл распределения намагниченности. Определите киральность доменных границ.
3. Измените знак константы обменное взаимодействие Дзялошинского-Мория на противоположный, повторите задания 1 и 2.

4. Задайте 3D наноструктуру трехслойной пленки с определенными магнитными параметрами. Между верхним и нижним слоями задайте косвенное обменное взаимодействие RKKY с антиферромагнитной связью через немагнитную прослойку.
5. Задайте в качестве начальной конфигурации хаотическое распределение намагниченности в трехслойной пленке.
6. Найдите конфигурацию с минимальной энергией в отсутствие внешнего магнитного поля.
7. Сохраните полученное распределение намагниченности в OMF файле и исходный код задачи в MIF файле.

**Лабораторная работа №9. Магнитная анизотропия при моделировании 3D объектов в OOMMF (4 / \_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В полученной наноструктуре задайте одноосную анизотропию.
2. Проведите симуляции процессов перемагничивания в полях ориентированных параллельно и перпендикулярно о.л.н..
3. Включите автоматическое сохранение данных в ODT файл.
4. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса для двух случаев ориентации внешнего магнитного поля.
5. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В полученной наноструктуре задайте кубическую анизотропию.
6. Проведите симуляции процессов перемагничивания в полях ориентированных вдоль кристаллографических осей [100], [010], [001] и по диагонали [111].
7. Включите автоматическое сохранение данных в ODT файл.
8. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте петли гистерезиса для двух случаев ориентации внешнего магнитного поля.

**Лабораторная работа №10. Симуляция процессов перемагничивания под действием внешнего магнитного поля в OOMMF (6 / \_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В начальном состоянии задайте хаотическое

распределение намагниченности. Проведите симуляцию процесса намагничивания вдоль оси  $Ox$ .

2. Включите автоматическое сохранение данных в ODT файл.
3. Импортируйте данные ODT файла в OriginPro и постройте кривую намагничивания.
4. Задайте в начальной конфигурации двухдоменное состояние. Исследуйте динамику доменной стенки под действием вращающегося магнитного поля в плоскости  $Oxy$ .
5. Задайте в начальной конфигурации вихревое состояние намагниченности. Исследуйте динамику ядра вихря под действием переменного магнитного поля.
6. Задайте однодоменное состояние намагниченности. Исследуйте процесс перемагничивания наноструктуры под действием локального смещающегося магнитного поля. Включите автоматическое сохранение данных в OMF файл.

### **Лабораторная работа №11. Симуляция спиновой динамики 3D объекта под действием температуры в OOMMF (4 / \_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. В начальном состоянии задайте вихревую намагниченность.
2. Увеличивайте температуру, чтобы найти предельную  $T_{crit}$  до которой данное состояние будет оставаться устойчивым.
3. Увеличивайте температуру дальше выводя на mmGraph зависимость  $m=f(T)$ .
4. Найдите точку Кюри для вашей структуры.
5. Увеличьте размер ячейки разбиения в 2 раза и повторите задания 1-4.
6. Проведите анализ полученных результатов и сделайте вывод о том, как размер ячейки разбиения влияет на динамику намагниченности под действием температуры.

### **Лабораторная работа №12. Моделирование топологических спиновых конфигураций в OOMMF (4 / \_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с плоскостной магнитной анизотропией. В начальном состоянии задайте вихревую намагниченность.
2. Сохраните распределение намагниченности в OMF файл.

3. Измените кодировку полученного OMF файла из binary 4 в text.
4. Импортируйте полученное распределение намагниченности в OriginPro.
5. Используя формулу  $N_{sk} = \frac{1}{4\pi} \iint \vec{m} \cdot \left( \frac{\partial \vec{m}}{\partial x} \times \frac{\partial \vec{m}}{\partial y} \right) dx dy$ , рассчитайте величину топологического заряда для данной конфигурации намагниченности.
6. Задайте 3D наноструктуру перпендикулярной магнитной анизотропией и взаимодействием Дзялошинского-Мория. В начальном состоянии задайте скирмион.
7. Повторите действия, описанные в пунктах 2-5, для данной структуры.
8. Сравните величины топологических зарядов рассчитанные для вихря и скирмиона.

**Лабораторная работа №13. Моделирование магнитостатических полей создаваемых ферромагнитной наноструктурой в OOMMF (4 /\_\_ час.)**

1. Задайте 3D наноструктуру с определенными магнитными параметрами и геометрией. При этом размер моделируемой области пространства должен в 2 раза превышать геометрические размеры наноструктуры в каждом из направлений.
2. Задайте однодоменное состояние намагниченности вдоль оси  $Ox$ .
3. Найдите энергетический минимум для данной структуры.
4. Включите отображение магнитостатических полей, создаваемых наноструктурой в mmDisp.
5. Сохраните полученное распределение магнитостатических полей в OMF файл.
6. Задайте массив наноструктур так, чтобы моделируемая область пространства полностью охватывала данный массив.
7. Задайте в качестве начальной конфигурации намагниченности хаотическое распределение.
8. Запустите минимизацию энергии системы в отсутствие внешнего поля.
9. Получите распределение магнитостатических полей взаимодействия между элементами массива.
10. Уменьшите расстояние между элементами массива и пункты 7-9.

## **Лабораторная работа №14. Моделирование пленок и многослойных структур в OOMMF (6 / \_\_ час.)**

1. Задайте 3D область ферромагнитной пленки размером  $2 \times 2$  мкм<sup>2</sup> определенными магнитными параметрами и толщиной.
2. Задайте в качестве начальной конфигурации намагниченности хаотическое распределение.
3. Запустите минимизацию полной энергии системы и сохраните OMF файл распределение намагниченности в энергетическом минимуме.
4. Добавьте периодические граничные условия на краях моделируемой области с количеством трансляций вдоль  $Ox$  и  $Oy - 3$ .
5. Повторите действия из пунктов 2-3.
6. Сравните полученные результаты без и с периодическими граничными условиями.
7. Задайте многослойный нанодиск, состоящий из 5 ферромагнитных слоев разделенных немагнитными прослойками.
8. Задайте в качестве начальной конфигурации намагниченности однодоменное состояние.
9. Запустите минимизацию полной энергии системы и сохраните OMF файл распределение намагниченности в энергетическом минимуме.
10. Используя эффективную модель, описанную работе [Woo, S. et al. *Nature materials* 2016, **15**, (5), 501-506], проведите пересчет магнитных параметров моделируемой структуры.
11. Задайте новую структуру нанодиска с одним эффективным ферромагнитным слоем.
12. Повторите действия из пунктов 8-9.
13. Сравните результаты, полученные при моделировании реальной многослойной структуры и эффективной модели.

### **I. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ**

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Основы микромагнитного моделирования» представлено в Приложении 1 и включает в себя:

план-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине, в том числе примерные нормы времени на выполнение по каждому заданию;

характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению;

требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы;

критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

## II. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Описание геометрических параметров и расчет магнитных постоянных моделируемого объекта на основании экспериментальных данных	ПК-3 ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 1-7 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
2	Анализ экспериментальных результатов исследования магнитной структуры	ПК-3	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 8-11 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)
3	Установка, изучение интерфейса и работа в программном пакете ООММФ	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 12-13 Собеседование (УО-1)

			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
4	Моделирование двумерных (2D) наноструктур в OOMMF	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 14-15 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
5	Моделирование трехмерных (3D) наноструктур различной геометрической формы в OOMMF	ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 16-17 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
6	Особенности задания геометрии моделируемого 3D объекта при использовании ScriptAtlas в OOMMF	ПК-3, ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 18-19 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6 Собеседование



					(УО-1)
7	Формирование необходимой начальной конфигурации намагниченности 3D структур в ООММФ	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 20-21 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7 Собеседование (УО-1)
8	Виды обменного взаимодействия при моделировании 3D объектов в ООММФ	ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 22-23 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8 Собеседование (УО-1)
9	Магнитная анизотропия при моделировании 3D объектов в ООММФ	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 24-25
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 9 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 9 Собеседование (УО-1)
10	Симуляция процессов перемагничивания под действием внешнего магнитного поля в ООММФ	ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 26-27 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 10 Собеседование (УО-1)

			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 10 Собеседование (УО-1)
11	Симуляция спиновой динамики 3D объекта под действием температуры в OOMMF	ПК-3, ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 28-29 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 11 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 11 Собеседование (УО-1)
12	Моделирование топологических спиновых конфигураций в OOMMF	ПК-3, ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 30-31 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 12 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 12 Собеседование (УО-1)
13	Моделирование магнитостатических полей создаваемых ферромагнитной наноструктурой в OOMMF	ПК-3, ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 32-33 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 13 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 13 Собеседование (УО-1)
14	Моделирование пленок и многослойных структур в OOMMF	ПК-3, ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 34-35 Собеседование (УО-1)

			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 14 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 14 Собеседование (УО-1)

Типовые контрольные задания, методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений и навыков и (или) опыта деятельности, а также критерии и показатели, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и характеризующие этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы, представлены в Приложении 2.

### **III. СПИСОК УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

#### **Основная литература**

1. Кудреватых Н.В. Магнетизм редкоземельных металлов и их интерметаллических соединений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.В. Кудреватых, А.С. Волегов. – Электрон. текстовые данные. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2015. – 200 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69622.html> – ЭБС «IPRbooks».
2. Юрчук С.Ю. Методы математического моделирования [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Юрчук С.Ю. – Электрон. текстовые данные.— М.: Издательский Дом МИСиС, 2018. – 96 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/78562.html> – ЭБС «IPRbooks».
3. Мешков И.Н. Электромагнитное поле. Часть 1. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] / И.Н. Мешков, Б.В. Чириков. – Электрон. текстовые данные. – Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2014. – 544 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28923.html> – ЭБС «IPRbooks».
4. Аполлонский С.М. Электромагнитные поля технического оборудования. Том I. Методы математической физики и их использование при расчетах электромагнитных полей [Электронный ресурс] : монография / С.М. Аполлонский. – Электрон. текстовые данные. – М. : Русайнс, 2016. – 280 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/61685.html> – ЭБС «IPRbooks».

5. Ибатуллин Р.У. Физика. Часть 2. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс]: методические рекомендации/ Ибатуллин Р.У., Кузьмичева В.А.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московская государственная академия водного транспорта, 2016.— 39 с. <http://www.iprbookshop.ru/65692.html>

#### Дополнительная литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 2. Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] : учебное пособие / И.В. Савельев. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 352 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/705> .
2. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики. Т.2 Электричество и магнетизм [Электронный ресурс] : учебник / Г.С. Ландсберг. — Электрон. дан. — Москва : Физматлит, 2011. — 400 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2240> .
3. Кудреватых Н.В. Магнетизм редкоземельных металлов и их интерметаллических соединений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.В. Кудреватых, А.С. Волегов. — Электрон. текстовые данные. — Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 200 с. — 978-5-7996-1604-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/69622.html>
4. Астайкин А.И. Метрология и радиоизмерения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Астайкин А.И., Помазков А.П., Щербак Ю.П. – Электрон. текстовые данные. – Саров: Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, 2010. – 405 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/18440.html> – ЭБС «IPRbooks».
5. Берлин Б.В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением [Электронный ресурс] / Б.В. Берлин, Л.А. Сейдман. — Электрон. текстовые данные. — М. : Техносфера, 2014. — 256 с. — 978-5-94836-369-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/31877.html>

#### Интернет-ресурсы

1. <http://math.nist.gov/oommf/>
2. <http://deparques.co.uk/wp-content/uploads/2014/02/userguide1.pdf>
3. <http://mumax.github.io/>
4. <https://arxiv.org/pdf/1406.7635.pdf>
5. <http://www.magpar.net/static/magpar/doc/html/install.html>
6. <http://www.magpar.net/static/magpar/doc/magpar.pdf>
7. <http://gmsh.info/>

### **Нормативно-правовые документы**

1. ГОСТ Р 57700.6-2017 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения в области бессеточных методов численного моделирования.
2. ГОСТ 19693-74 Межгосударственный стандарт. Материалы магнитные. Термины и определения.
3. ГОСТ 15971-90. Системы обработки информации. Термины и определения
4. ГОСТ 8.417-02. ГСИ. Единицы величин.
5. ГОСТ Р 8.563-96. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений.

### **Перечень информационных технологий и программного обеспечения**

При осуществлении образовательного процесса по дисциплине может использоваться стандартное программное обеспечение компьютерных учебных классов (Windows, Microsoft Office).

## **IV. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

В процессе обучения студент должен не только освоить учебную программу, но и приобрести навыки самостоятельной работы. Студент должен уметь планировать и выполнять свою работу. Удельный вес самостоятельной работы обычно составляет по времени 35% от всего времени изучаемого цикла. Это отражено в учебных планах и графиках учебного процесса, с которыми каждый студент может ознакомиться у преподавателя дисциплины или на кафедре.

Главное в период обучения своей специальности – это научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на следующий день. В конце каждого дня

целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием как успешной учебы, так и последующей работы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Организация деятельности студента.

*Лабораторная работа.* Перед выполнением лабораторных работ студенты должны ознакомиться с теоретическим материалом по текущей теме. Если при изучении данного материала возникли вопросы, проконсультироваться с преподавателем. Прочитать инструкцию по выполнению лабораторной работы. Составить план выполнения для достижения поставленных задач. В случае затруднений необходимо обратиться к преподавателю. Следуя составленному плану, начать выполнение лабораторной работы. После выполнения каждого этапа, необходимо сделать анализ полученных результатов. Если результат удовлетворяет всем требованиям, указанным в задании, перейти к следующему этапу. В противном случае, если результат не удовлетворяет требованиям задания, приводит к некорректным выводам и/или ответам, необходимо проанализировать причины, приведшие к ошибкам. Работа над ошибками является одним из условий процесса совершенствования знаний и навыков а, следовательно, успешной учебы и работы.

После выполнения всех этапов лабораторной работы нужно составить отчет о проделанной работе. Представить данный отчет на проверку преподавателю.

*Самостоятельная работа.* Выполнение самостоятельной работы студентами необходимо для успешного закрепления изученного материала и навыков моделирования, приобретенных на лабораторных работах. Процесс выполнения схож с лабораторными работами, с одним отличием –

отсутствует возможность текущей консультации с преподавателем по возникающим ошибкам, либо трудностям. Благодаря этому студент начинает приобретать навыки самостоятельного анализа и решения проблем, что позволяет лучше усвоить материал. Перед выполнением самостоятельной работы прочитать поставленное задание и составить план действий для его выполнения. Следуя составленному плану, начать выполнение самостоятельной работы. Анализ полученных результатов, необходим после выполнения каждого этапа. Если результат удовлетворяет всем требованиям, указанным в задании, перейти к следующему этапу. После выполнения всех этапов самостоятельной работы нужно оформить результаты в виде отчета. Представить данный отчет на проверку преподавателю на лабораторном занятии.

## **V. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Лабораторные занятия проводятся в компьютерных классах лабораторного корпуса (корпус L). Для проведения исследований, связанных с выполнением задания по практике, а также для организации самостоятельной работы студентам доступно лабораторное оборудование и специализированные кабинеты, соответствующие действующим санитарным и противопожарным нормам, а также требованиям техники безопасности при проведении учебных и научно-производственных работ.

Наименование специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Оснащенность специальных помещений и помещений для самостоятельной работы	Перечень лицензионного программного обеспечения. Реквизиты подтверждающего документа
690922, Приморский край, г. Владивосток, остров Русский, полуостров Саперный, поселок Аякс, 10, корпус L, ауд. L320	Специализированная лаборатория Департамента общей и экспериментальной физики: лаборатория пленочных технологий. 1. Сверхвысоковакуумный комплекс Omicron 2. ACM Integra Aura NT MDT 3. Photolithography system Suss MicroTech MJB6 (Germany) Количество посадочных рабочих мест для студентов – 8	Microsoft Office365/Microsoft/США/Платное ПО Microsoft Teams/Microsoft/США/Платное ПО Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software / Department of Nanometrology/ Czech Metrology Institute/ Бесплатное ПО

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

### План-график выполнения самостоятельной работы по дисциплине

№ п/п	Дата/сроки выполнения	Вид самостоятельной работы	Примерные нормы времени на выполнение	Форма контроля
1	1 неделя	Подготовка к лабораторной работе №1	4 час.	Работа на занятии
2	2 неделя	Подготовка к лабораторной работе №2	4 час.	Работа на занятии
3	3 недели	Подготовка к лабораторной работе №3	4 час.	Работа на занятии
4	4 недели	Подготовка к лабораторной работе №4. Выполнение самостоятельного задания по теме 1	4 час.	Работа на занятии
5	5 неделя	Подготовка к лабораторной работе №5	4 час.	Работа на занятии
6	6 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 2	4 час.	Проверка домашней работы
7	7 неделя	Подготовка к лабораторной работе №6	4 час.	Работа на занятии
8	8 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 3	4 час.	Проверка домашней работы
9	9 неделя	Подготовка к лабораторной работе №7	4 час.	Работа на занятии
10	10 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 4	4 час.	Проверка домашней работы
11	11 неделя	Подготовка к лабораторной работе №8	4 час.	Работа на занятии
12	12 неделя	Подготовка к лабораторной работе №9	4 час.	Работа на занятии
13	13 неделя	Подготовка к лабораторной работе №10	4 час.	Работа на занятии
14	14 неделя	Выполнение самостоятельного задания по теме 5	4 час.	Проверка домашней работы
15	15 неделя	Подготовка к лабораторной работе №11	4 час.	Работа на занятии
16	16 неделя	Подготовка к лабораторной работе №12	4 час.	Работа на занятии
17	17 неделя	Подготовка к лабораторной работе №13	6 час.	Работа на занятии
18	18 неделя	Подготовка к лабораторной работе №14	6 час.	Работа на занятии



Итого	76 час.	
-------	---------	--

### **Характеристика заданий для самостоятельной работы обучающихся и методические рекомендации по их выполнению**

Задания и методические рекомендации для самостоятельной работы обеспечивают подготовку лабораторным занятиям, а также закрепление материала по пройденным темам. Их полное содержание приведено в программе и методических указаниях. Методические указания к лабораторным занятиям в электронном виде и печатном виде берутся у ведущего преподавателя.

### **Требования к представлению и оформлению результатов самостоятельной работы**

Результаты самостоятельной работы отражаются в кратких отчетах, где приводятся результаты каждого из лабораторных занятий и заданий для самостоятельной работы. Отчеты по лабораторным занятиям и самостоятельной работе предоставляются преподавателю в электронном виде (где необходимо, компьютерное моделирование и построение графиков с помощью вычислительных средств) или письменном виде (если занятие проводится без использования компьютеров).

К представлению материалов по результатам лабораторных занятий предъявляются следующие требования.

Структура краткого отчета по результатам лабораторного занятия и самостоятельной работы.

Если для данного занятия необходимо предоставить материалы в электронной форме, то они подготавливаются как текстовые документы в редакторе MS Word.

Краткий отчет по результатам лабораторного занятия, либо самостоятельной работы должен быть обобщающим документом, включать всю информацию по выполнению заданий, в том числе исходный код моделируемой задачи, построенные графики, расчеты, необходимые пояснения и иллюстрации микромагнитной структуры и т.д.

Структурно краткий отчет по результатам лабораторного занятия, либо самостоятельной работы состоит из следующих частей:

- Исходные данные к выполнению заданий – обязательная компонента отчета, начинается с новой страницы, содержат указание варианта, тему, план работы и т.д.);
- Основная часть – материалы выполнения заданий, разбивается по рубрикам, соответствующих заданиям работы, с иерархической структурой: разделы – подразделы – пункты – подпункты и т.д.
- Выводы – обязательная компонента отчета, содержит обобщающие выводы по работе (какие задачи решены, оценка результатов, что освоено при выполнении работы);

Краткий отчет по результатам лабораторного занятия и самостоятельной работы оформляется по правилам оформления письменных работ студентами ДВФУ.

Необходимо обратить внимание на следующие аспекты в оформлении кратких отчетов:

- набор текста (если необходим отчет в электронной форме);
- структурирование работы;
- оформление заголовков всех видов (рубрик-подрубрик-пунктов-подпунктов, рисунков, таблиц, приложений);
- оформление перечислений (списков с нумерацией или маркировкой);
- оформление таблиц;

- оформление иллюстраций (графики, рисунки, фотографии, схемы, «скриншоты»);
- набор и оформление математических выражений (формул);

Если набор текста осуществляется на компьютере, то необходимо придерживаться следующих требований:

- печать – на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (размер 210 на 297 мм.);
- интервал межстрочный – полуторный;
- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 14 пт., в том числе в заголовках (в таблицах допускается 10-12 пт.);
- выравнивание текста – «по ширине»;
- поля страницы – левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее и нижнее – 20 мм;
- нумерация страниц – в правом нижнем углу страницы (для страниц с книжной ориентацией), сквозная, от титульного листа до последней страницы, арабскими цифрами;
- режим автоматического переноса слов, за исключением заголовков всех уровней (перенос слов для отдельного абзаца блокируется средствами MSWord с помощью команды «Формат» – абзац при выборе опции «запретить автоматический перенос слов»).

Графическая информация: изображения микромагнитной структуры, графики, диаграммы моделей, схемы, экранные формы и т.п., должны отвечать требованиям визуальной наглядности представления иллюстративного материала как по размерам графических объектов, так и разрешающей способности отображения текстов, цветовому оформлению и другим важным пользовательским параметрам.

Рекомендуется в среде программного приложения mmDisp OOMMF настроить параметры масштабирования и цветовой схемы для наглядного отображения микромагнитной структуры.

Приведенные в отчет изображения рекомендуется отмасштабировать для заполнения страницы отчета «по ширине».

Изображения и графики в кратком отчете оформляются как рисунки, с заголовками, помещаемыми ниже области рисунков.

### **Критерии оценки выполнения самостоятельной работы**

Оценивание результатов лабораторных занятий и самостоятельных работ проводится по критериям:

- полнота и качество выполненных заданий;
- владение методами и приемами микромагнитного моделирования в исследуемых вопросах, применение специализированных программных средств (если необходимо);
- отсутствие фактических ошибок, связанных с пониманием проблемы или задачи;
- отсутствие значительных ошибок в приводимых количественных результатах.

### **ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

<b>Код и формулировка компетенции</b>	<b>Этапы формирования компетенции</b>	
ПК-3, готовностью осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения	Знает	теоретические основы электродинамики сплошных сред; основные разделы физики конденсированного состояния, для изучения ферромагнитных материалов; перспективные направления нанoeлектроники и спинтроники, в которых используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации; основные методы исследования магнитных свойств и доменной структуры в ферромагнитных объектах.
	Умеет	пользоваться теоретическими основами магнетизма для расчета магнитных параметров исследуемого

<p>точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени</p>		<p>объекта;</p> <p>применять теоретические знания для математического описания модели, соответствующей конкретному экспериментальному случаю;</p> <p>определять перспективные направления нанoeлектроники и спинтроники, в которых используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации;</p> <p>использовать основные способы решения научных и инновационных задач нанoeлектроники и спинтроники для достижения конкретного результата.</p>
	Владеет	<p>навыками интерпретации результатов микромагнитного моделирования для описания и дополнения результатов экспериментального исследования;</p> <p>навыками практического использования основ магнетизма для исследования магнитных свойств и доменной структуры ферромагнитных объектов;</p> <p>навыками применения современных подходов для исследования поведения намагниченности в ферромагнитных средах;</p> <p>способами и навыками, позволяющими определять перспективные направления нанoeлектроники и спинтроники, в которых активно используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации.</p>
<p>ПК-4, способностью к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов</p>	Знает	<p>основные алгоритмы проведения экспериментальных исследований магнитных свойств;</p> <p>основные программные пакеты микромагнитного моделирования и их возможности;</p> <p>примеры использования методов микромагнитного моделирования для решения специфических задач, включая симуляцию статических, динамических и термических процессов;</p> <p>основные этапы планирования экспериментальных исследований;</p> <p>методики проведения экспериментальных исследований.</p>
	Умеет	<p>планировать основные этапы экспериментальных исследований в области магнетизма;</p> <p>использовать методики проведения экспериментальных исследований на практике;</p> <p>составить задачу микромагнитного моделирования и выбирать необходимый программный пакет с учетом</p>

		особенностей исследования; применять основные алгоритмы проведения экспериментальных исследований магнитных свойств для решения экспериментальных задач; выбирать соответствующие способы планирования времени, аудиторного фонда, фонда оборудования для успешной организации экспериментальных исследований.
	Владеет	навыками планирования экспериментальных исследований в области магнетизма; навыками самостоятельного проведения исследовательской работы с помощью метода микромагнитного моделирования; навыками использования методов микромагнитного моделирования для прогнозирования экспериментальных результатов.

№ п/п	Контролируемые разделы / темы дисциплины	Коды и этапы формирования компетенций	Оценочные средства		
			текущий контроль	промежуточная аттестация	
1	Описание геометрических параметров и расчет магнитных постоянных моделируемого объекта на основании экспериментальных данных	ПК-3	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 1-7 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 1 Собеседование (УО-1)
2	Анализ экспериментальных результатов исследования магнитной структуры	ПК-3	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 8-11 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 2 Собеседование (УО-1)

3	Установка, изучение интерфейса и работа в программном пакете OOMMF	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 12-13 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 3 Собеседование (УО-1)
4	Моделирование двумерных (2D) наноструктур в OOMMF	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 14-15 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 4 Собеседование (УО-1)
5	Моделирование трехмерных (3D) наноструктур различной геометрической формы в OOMMF	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 16-17 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 5 Собеседование (УО-1)
6	Особенности задания геометрии моделируемого 3D объекта при использовании ScriptAtlas в OOMMF	ПК-3, ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 18-19 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6 Собеседование (УО-1)

			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 6 Собеседование (УО-1)
7	Формирование необходимой начальной конфигурации намагничённости 3D структур в ООММФ	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 20-21 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 7 Собеседование (УО-1)
8	Виды обменного взаимодействия при моделировании 3D объектов в ООММФ	ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 22-23 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 8 Собеседование (УО-1)
9	Магнитная анизотропия при моделировании 3D объектов в ООММФ	ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 24-25 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 9 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 9 Собеседование (УО-1)
10	Симуляция процессов перемагничивания под действием внешнего магнитного поля в	ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 26-27 Собеседование (УО-1)



	ООММФ		умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 10 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 10
11	Симуляция спиновой динамики 3D объекта под действием температуры в ООММФ	ПК-3, ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 28-29 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 11 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 11 Собеседование (УО-1)
12	Моделирование топологических спиновых конфигураций в ООММФ	ПК-3, ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 30-31 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 12 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 12 Собеседование (УО-1)
13	Моделирование магнитоэлектрических полей создаваемых ферромагнитной наноструктурой в ООММФ	ПК-3, ПК-4 ПК-6	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 32-33 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 13 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 13 Собеседование (УО-1)

14	Моделирование пленок и многослойных структур в ООММФ	ПК-3, ПК-4	знает	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, вопросы 34-35 Собеседование (УО-1)
			умеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 14 Собеседование (УО-1)
			владеет	Лабораторная работа (ПР-6)	экзамен, задание, тип 14 Собеседование (УО-1)

### Шкала оценивания уровня сформированности компетенций

Код и формулировка компетенции	Этапы формирования компетенции		критерии	показатели	баллы
ПК-3, готовность осваивать принципы планирования и методы автоматизации эксперимента на основе информационно-измерительных комплексов как средства повышения точности и снижения затрат на его проведение, овладевать навыками измерений в реальном времени	Знает	теоретические основы электродинамики сплошных сред; основные разделы физики конденсированного состояния, для изучения ферромагнитных материалов; перспективные направления нанoeлектроники и спинтроники, в которых используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации; основные методы исследования магнитных свойств и доменной структуры в ферромагнитных объектах.	Способность пересказать и объяснить учебный теоретический материал с достаточной степенью научной точности и полноты, с приведением примеров	Знает основы электродинамики сплошных сред, классификацию основных методов исследования магнитных свойств и доменной структуры; Знаком с основными разделами физики конденсированного состояния, для изучения ферромагнитных материалов; Знает, как определить возможные перспективные направления нанoeлектроники и спинтроники, в которых используются, или могут использоваться стабильные спиновые	60-74

				<p>конфигурации;</p> <p>Знает, как можно решить наиболее типовые научные и инновационные задачи, затрагивающие наноэлектронику и спинтронику.</p>	
	Умеет	<p>пользоваться теоретическими основами магнетизма для расчета магнитных параметров исследуемого объекта;</p> <p>применять теоретические знания для математического описания модели, соответствующей конкретному экспериментальному случаю;</p> <p>определять перспективные направления наноэлектроники и спинтроники, в которых используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации;</p> <p>использовать основные способы решения научных и инновационных задач наноэлектроники и спинтроники для достижения конкретного результата.</p>	Уметь систематизировать научную информацию о ферромагнитном объекте, выполнять типовые задачи по расчету магнитных параметров исследуемого объекта	<p>Умеет самостоятельно использовать теоретические знания магнетизма для расчета магнитных параметров исследуемого объекта;</p> <p>Умеет проводить математическое описание геометрической модели, соответствующей конкретному экспериментальному объекту;</p> <p>Умеет на практике определить возможные перспективные направления наноэлектроники и спинтроники, в которых используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации;</p> <p>Умеет решать типовые научные и инновационные задачи в областях наноэлектроники и спинтроники для достижения конкретного результата.</p>	75-89

	Владеет	<p>навыками интерпретации результатов микромагнитного моделирования для описания и дополнения результатов экспериментального исследования;</p> <p>навыками практического использования основ магнетизма для исследования магнитных свойств и доменной структуры ферромагнитных объектов;</p> <p>навыками применения современных подходов для исследования поведения намагниченности в ферромагнитных средах;</p> <p>способами и навыками, позволяющими определять перспективные направления нанoeлектроники и спинтроники, в которых активно используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации.</p>	Владеет навыками практического использования основ магнетизма для решения простых научно-инновационных задач в областях нанoeлектроники и спинтроники.	<p>Владеет основами теории магнетизма;</p> <p>Владеет навыками интерпретации результатов микромагнитного моделирования для описания и дополнения результатов экспериментального исследования;</p> <p>Владеет навыками практического использования основ магнетизма для исследования магнитных свойств и доменной структуры ферромагнитных объектов;</p> <p>Владеет навыками применения современных подходов для исследования поведения намагниченности в ферромагнитных средах;</p> <p>Владеет способами и навыками, позволяющими определять перспективные направления нанoeлектроники и спинтроники, в которых активно используются или могут использоваться стабильные спиновые конфигурации.</p>	90-100
ПК-4, способностью к организации	Знает	основные алгоритмы проведения	Может пересказать и объяснить	Знает основные алгоритмы проведения	60-74

<p>и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов</p>		<p>экспериментальных исследований магнитных свойств; основные программные пакеты микромагнитного моделирования и их возможности; примеры использования методов микромагнитного моделирования для решения специфических задач, включая симуляцию статических, динамических и термических процессов; основные этапы планирования экспериментальных исследований; методики проведения экспериментальных исследований.</p>	<p>учебный теоретический материал с достаточной степенью научной точности и полноты, с приведением примеров</p>	<p>экспериментальных исследований магнитных свойств; Знает программные пакеты микромагнитного моделирования и их возможности; Знает основные примеры использования методов микромагнитного моделирования для решения специфических задач, включая симуляцию статических, динамических и термических процессов; Знает основные этапы планирования экспериментальных исследований; Знаком с базовыми методиками проведения экспериментальных исследований.</p>	
	<p>Умеет</p>	<p>планировать основные этапы экспериментальных исследований в области магнетизма; использовать методики проведения экспериментальных исследований на практике; составить задачу микромагнитного моделирования и выбрать необходимый программный пакет с учетом особенностей исследования; применять основные алгоритмы проведения</p>	<p>Уметь проводить микромагнитное моделирование стандартных экспериментов по исследованию магнитных свойств и структуры микро и нанообъектов</p>	<p>Умеет проводить планирование основных этапов экспериментальных исследований в области магнетизма; Производить простые действия, касающиеся стандартных приемов вычислений для микромагнитного моделирования реального объекта и выбирать необходимый программный пакет с учетом особенностей исследования;</p>	<p>75-89</p>

		<p>экспериментальных исследований магнитных свойств для решения экспериментальных задач;</p> <p>выбирать соответствующие способы планирования времени, аудиторного фонда, фонда оборудования для успешной организации экспериментальных исследований.</p>		<p>Умеет применять основные методы проведения экспериментальных исследований магнитных свойств на практике.</p>	
	Владеет	<p>навыками планирования экспериментальных исследований в области магнетизма;</p> <p>навыками самостоятельного проведения исследовательской работы с помощью метода микромагнитного моделирования;</p> <p>навыками использования методов микромагнитного моделирования для прогнозирования экспериментальных результатов.</p>	Владеет	<p>навыками использования микромагнитного моделирования для аналитики и прогнозирования экспериментальных результатов</p> <p>Владеет</p> <p>навыками самостоятельного проведения исследовательской работы с помощью метода микромагнитного моделирования;</p> <p>Владеет</p> <p>навыками использования методов микромагнитного моделирования для прогнозирования экспериментальных результатов;</p> <p>Владеет</p> <p>навыками решения задач средней сложности в одном из пакетов микромагнитного моделирования в соответствии с программой курса.</p>	90-100

## **Методические рекомендации, определяющие процедуры оценивания результатов освоения дисциплины**

### **Текущая аттестация студентов**

Текущая аттестация студентов по дисциплине «Основы микромагнитного моделирования» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине «Основы микромагнитного моделирования» проводится в форме лабораторных занятий и самостоятельных работ, по результатам которых производится оценка результатов обучения студентов. Оценка осуществляется ведущим преподавателем.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина (активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость всех видов занятий по аттестуемой дисциплине);
- уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы;
- результаты самостоятельной работы.

Оценивание результатов освоения дисциплины на этапе текущей аттестации проводится в соответствии с используемыми оценочными средствами и критериями.

### **Критерии оценки кратких отчетов по результатам практических занятий**

Оценивание результатов работы на лабораторном занятии, а также выполнения самостоятельной работы проводится при представлении краткого отчета в электронном или письменном виде по двухбалльной шкале: «зачтено», «не зачтено».

Оценка «зачтено» выставляется студенту, если он представляет преподавателю краткий отчет, удовлетворяющий требованиям по поставленным заданиям, демонстрирует владение методами и приемами теоретических и/или практических аспектов работы.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, если он не владеет методами и приемами теоретических и/или практических аспектов, рассматриваемых на занятии, допускает существенные ошибки в работе, представляет неполный отчет по выполнению заданий.

### **Промежуточная аттестация студентов**

Промежуточная аттестация студентов по дисциплине «Основы микромагнитного моделирования» проводится в соответствии с локальными нормативными актами ДВФУ и является обязательной.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Основы микромагнитного моделирования» проводится в виде экзамена, форма экзамена – «устный опрос в форме ответов на вопросы», «практические задания по типам». Допуск к экзамену возможен только после защиты отчетов по всем лабораторным работам курса и защиты курсовой работы с оценкой (задание на курсовую работу приведено в разделе оценочных средств для текущей аттестации).

### **Критерии выставления оценки студенту на экзамене по дисциплине «Основы микромагнитного моделирования»:**

Баллы (рейтинговой оценки)	Оценка (стандартная)	Требования к сформированным компетенциям
86-100	«отлично»	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при



		видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.
76-85	«хорошо»	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.
61-75	«удовлетворительно»	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.
0-60	«неудовлетворительно»	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## Оценочные средства для промежуточной аттестации

Собеседование (УО-1)

### Вопросы к экзамену

1. Основные типы упорядочения магнетиков. Источник магнитного момента атома. Критерий ферромагнетизма.
2. Обменное взаимодействие. Энергия обменного взаимодействия.
3. Магнитная кристаллографическая анизотропия. Энергия кристаллографической анизотропии различных кристаллов.
4. Наведенная магнитная анизотропии. Энергия наведенной анизотропии.
5. Магнитостатическая энергия. Размагничивающее поле.
6. Энергия магнитного момента во внешнем магнитном поле.
7. Антиферромагнитная и ферромагнитная косвенная обменная связь. Поле насыщения, билинейная и биквадратная косвенная обменная связь.
8. Взаимодействие Дзялошинского-Мория (ВДМ). Влияние данного взаимодействия на магнитную структуру. Методы измерения величины ВДМ.
9. Доменная граница и ее энергия. Типы доменных границ.
10. Процессы смещения доменных границ. Критические поля.
11. Методы исследования магнитных параметров и доменной структуры. Экспериментальные методы оценки энергии анизотропии, намагниченности насыщения.
12. Виды подходов для моделирования магнитных систем. Теоретические основы микромагнитного моделирования.
13. Метод конечных разностей и метод конечных элементов.
14. Способы задания геометрии двумерных (2D) наноструктур в OOMMF.
15. Моделирование необходимой магнитной конфигурации в 2D объектах.
16. Способы задания геометрии трехмерных (3D) наноструктур в OOMMF.
17. Блоки анизотропии, магнитостатического и обменного взаимодействий при моделировании 3D наноструктур в OOMMF.
18. Использование ScriptAtlas в OOMMF для моделирования сложных геометрических объектов.

19. Логические операции для моделирования сложных трехмерных геометрических объектов в OOMMF.
20. Способы задания необходимой начальной конфигурации намагниченности при моделировании 3D наноструктур в OOMMF.
21. Использование ScriptVectorField в OOMMF для формирования необходимой начальной конфигурации намагниченности.
22. Блоки для описания прямого обменного взаимодействия 3D наноструктур в OOMMF.
23. Виды косвенного обменного взаимодействия. Блоки для описания косвенных обменных взаимодействий 3D наноструктур в OOMMF.
24. Типы анизотропии, задаваемые при моделировании 3D наноструктур в OOMMF.
25. Источники магнитной анизотропии в реальных магнитных объектах.
26. Поведение намагниченности под действием однородного магнитного поля.
27. Моделирование процессов перемагничивания под действием внешнего магнитного поля в OOMMF. Энергия взаимодействия намагниченности с внешним полем.
28. Влияние температуры среды на поведение намагниченности. Энергия тепловых флуктуаций.
29. Симуляция процессов спиновой динамики 3D объекта под действием температуры в OOMMF.
30. Формула топологического заряда для спиновых конфигураций. Основные виды топологических объектов в доменной структуре ферромагнетика.
31. Формирование вихревой конфигурации намагниченности в OOMMF.
32. Анизотропия формы. Размагничивающий фактор. Поле магнитостатики.
33. Моделирование картины распределения магнитостатических полей вокруг 3D наноструктуры в OOMMF.

34. Периодические граничные условия для моделирования участка пленки в OOMMF.
35. Эффективная модель для описания многослойных структур.

### **Типы экзаменационных заданий**

Тип 1. Сделайте описание геометрической формы реального объекта, а также рассчитайте величины всех магнитных параметров согласно данным из эксперимента.

Тип 2. По экспериментально измеренному изображению магнитной структуры определите тип анизотропии. Опишите доменную структуру и отметьте на ней доменные границы.

Тип 3. Откройте программу для моделирования 2D объектов. Запустите готовую программу из примеров. Выведите отображение микромагнитной структуры на экран.

Тип 4. Задайте 2D наноструктуру с определенными магнитными и геометрическими параметрами в OOMMF и запустите симуляцию процесса перемагничивания. Постройте петли гистерезиса.

Тип 5. Задайте 3D наноструктуру с необходимой геометрической формой в OOMMF. Сохраните OMF файл полученной структуры.

Тип 6. Задайте 3D наноструктуру с необходимой геометрической формой в OOMMF, используя ScriptAtlas. Сохраните OMF файл полученной структуры.

Тип 7. Задайте необходимую начальную конфигурацию в 3D наноструктуре в OOMMF. Сохраните OMF файл полученной конфигурации.

Тип 8. Смоделируйте 3D наноструктуру трехслойной пленки с косвенным обменным взаимодействием в OOMMF.

Тип 9. Смоделируйте 3D наноструктуру с кубической анизотропией в OOMMF.

Тип 10. Смоделируйте петлю гистерезиса вдоль о.л.н. 3D наноструктуры в OOMMF.

Тип 11. Смоделируйте поведение намагниченности 3D наноструктуры при увеличении температуры в OOMMF.

Тип 12. Задайте вихрь, скирмион в 3D нанодиске в OOMMF. Сохраните OMF файл полученной структуры.

Тип 13. Получите распределение магнитостатических полей вокруг 3D наноструктуры. Сохраните OMF файл полученной структуры.

Тип 14. Смоделируйте многослойную пленку с взаимодействием Дзялошинского-Мория в OOMMF, используя реальную и эффективную модели.

## Оценочные средства для текущей аттестации

Типовые задания для самостоятельной работы студентов

### Тема 1. Вариант 1

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $1200 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $11 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа одноосной анизотропии  $5 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> вдоль оси O<sub>y</sub>, константа затухания Гильберта 0,1. Геометрическая форма структур:

- а) квадрат  $50 \times 50 \times 20$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 2 нм;
- б) эллипс  $100 \times 50 \times 10$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 1 нм;
- в) квадратный массив [2×2] нанодисков диаметром  $d=50$  нм, толщиной 10 нм, расстояние между центрами дисков  $2d$ , размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; однодоменное; вихрь; антивихрь. Сохраните полученные конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль направлений O<sub>x</sub> и O<sub>y</sub>. Начальную конфигурацию задать файлом, используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и

конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

*Задание 1.4* Сконвертируйте исходную задачу из задания 1.3 из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1

### Тема 1. Вариант 2

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $480 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $9 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа кубической анизотропии  $3 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>; константа затухания Гильберта 0,3. Геометрическая форма структур:

- а) нанодиск диаметром 50 нм, толщиной 20 нм, размер ячейки 2 нм;
- б) прямоугольник  $300 \times 200 \times 10$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 1 нм;
- в) прямоугольный массив  $[2 \times 2]$  наноточек квадратной формы со стороной  $a=50$  нм, толщиной 10 нм, расстояние между центрами наноточек  $2a$ , размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; двухдоменное; четырехдоменное; вихрь. Сохраните полученные конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль направлений Ох и Оу. Начальную конфигурацию задать файлом,

используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

*Задание 1.4* Сконвертируйте исходную задачу из задания 1.3 из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1

### Тема 1. Вариант 3

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $1000 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $15 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа затухания Гильберта 0,5; в структурах имеется только анизотропия формы. Геометрическая форма структур:

- а) прямоугольник  $25 \times 100 \times 10$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 2 нм;
- б) эллипс  $300 \times 200 \times 10$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 1 нм;
- в) ряд из четырех нанодисков диаметром  $d=75$  нм, толщиной 5 нм, расстояние между центрами дисков  $2d$ , размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; однодоменное; двухдоменное вдоль и поперек длинной стороне. Сохраните полученные конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль



направлений  $O_x$  и  $O_y$ . Начальную конфигурацию задать файлом, используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

*Задание 1.4* Сконвертируйте исходную задачу из задания 1.3 из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1

#### Тема 1. Вариант 4

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $1400 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $30 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа одноосной анизотропии вдоль оси  $O_x$   $3 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>; константа затухания Гильберта 0,3. Геометрическая форма структур:

- а) нанополоска длиной 250 нм, шириной 10 нм и толщиной 20 нм, размер ячейки 2 нм;
- б) эллипсоид  $200 \times 500 \times 10$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 1 нм;
- в) массив из четырех нанополосок  $20 \times 300 \times 10$  нм<sup>3</sup>, расстояние между центрами полосок 60 нм, размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; однодоменное; четырехдоменное; вихрь. Сохраните полученные конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль направлений  $Ox$  и  $Oy$ . Начальную конфигурацию задать файлом, используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

*Задание 1.4* Сконвертируйте исходную задачу из задания 1.3 из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1

### Тема 1. Вариант 5

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $800 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $15 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа кубической анизотропии  $3 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>; константа затухания Гильберта 0,5. Геометрическая форма структур:

- а) эллипс  $25 \times 100 \times 5$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 2 нм;
- б) параллелепипед  $100 \times 200 \times 50$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 1 нм;
- в) квадратный массив  $[3 \times 2]$  наноточек треугольной формы (равносторонний треугольник со стороной  $a=50$  нм), расстояние между центрами  $2a$ , размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; однодоменное; вихрь; антивихрь. Сохраните полученные конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль направлений  $Ox$  и  $Oy$ . Начальную конфигурацию задать файлом, используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

*Задание 1.4* Сконвертируйте исходную задачу из задания 1.3 из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1

### Тема 1. Вариант 6

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $1000 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $18 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа одноосной анизотропии вдоль  $Oy$   $5 \times 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>; константа затухания Гильберта 0,2. Геометрическая форма структур:

- а) параллелепипед  $100 \times 25 \times 10$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 2 нм;
- б) круглый нанодиск диаметром 200 нм и толщиной 30 нм, размер ячейки 1 нм;
- в) кольцо диаметром 300 нм, толщиной 20, диаметр круглого отверстия 50 нм, размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; однодоменное; двухдоменное; четырехдоменное. Сохраните полученные

конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль направлений  $Ox$  и  $Oy$ . Начальную конфигурацию задать файлом, используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

*Задание 1.4* Сконвертируйте исходную задачу из задания 1.3 из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1

### Тема 1. Вариант 7

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $1050 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $30 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа затухания Гильберта 0,1; в структурах имеется только анизотропия формы. Геометрическая форма структур:

- а) прямоугольник с усеченными углами  $80 \times 30 \times 10$  нм<sup>3</sup>, размер ячейки 2 нм;
- б) прямоугольный крест длиной 400 нм, шириной 30 нм, толщиной 5 нм, размер ячейки 1 нм;
- в) кольцо диаметром 300 нм, толщиной 20 нм, в центре отверстие квадратной формы со стороной  $a=50$  нм, размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации

намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; однодоменное; двухдоменное; вихрь. Сохраните полученные конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль направлений  $Ox$  и  $Oy$ . Начальную конфигурацию задать файлом, используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

*Задание 1.4* Сконвертируйте исходную задачу из задания 1.3 из кодировки MIF 1.1 в кодировку MIF 2.1

### Тема 1. Вариант 8

*Задание 1.1* В **mmSolve2D** получить и сохранить OMF files следующих структур с магнитными параметрами: намагниченность насыщения  $1300 \times 10^3$  А/м; константа обменного взаимодействия  $8 \times 10^{-12}$  Дж/м; константа одноосной анизотропии вдоль  $Ox$   $5 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>; константа затухания Гильберта 0,3. Геометрическая форма структур:

- а) равносторонний треугольник со стороной 50 нм, размер ячейки 2 нм;
- б) нанополоска длиной 350 нм, шириной 10 нм, толщиной 15 нм, размер ячейки 1 нм;
- в) вертикальный массив из четырех равносторонний треугольников со стороной 50 нм расстояние между центрами 100 нм, размер ячейки 1 нм.

*Задание 1.2* Для структуры из задания 1.1(а) найти конфигурацию намагниченности, обладающую минимальной энергией в отсутствие внешнего воздействия, задав следующие начальные конфигурации намагниченности: хаотическое распределение намагниченности; однодоменное; вихрь; антивихрь. Сохраните полученные конфигурации (OMF file) и исходную задачу (MIF file), предварительно создав отдельную папку для расчетов.

*Задание 1.3* Для структуры, использованной в задании 1.2, провести моделирование кривых намагничивания + петель гистерезиса вдоль направлений  $Ox$  и  $Oy$ . Начальную конфигурацию задать файлом, используйте состояние с минимальной энергией, определенное во втором задании. Включите автоматическое сохранение скалярных данных и конфигурации намагниченности на каждом шаге. Сохраните исходную задачу (MIF file). Постройте полученные петли.

## Тема 2. Вариант 1

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1200 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $11 \times 10^{-12}$  Дж/м. Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) куб со стороной 150 нм. Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2$  нм<sup>3</sup>.
- б) участок многослойной пленки размером  $400 \times 400$  нм<sup>2</sup>, размер ячейки в плоскости 2 нм, состоящей из 4 ферромагнитных слоев толщиной 8 нм, разделенных немагнитными прослойками по 4 нм;

в) треугольная призма, в основании которой лежит равносторонний треугольник со стороной 150 нм, высота призмы 50 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10 \text{ нм}^3$ .

### Тема 2. Вариант 2

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $480 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; длина ферромагнитной корреляции 8 нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

а) прямоугольный параллелепипед  $150 \times 300 \times 200 \text{ нм}^3$ . Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ .

б) двухслойный нанодиск диаметром 250 нм, размер ячейки в плоскости  $2 \times 2 \text{ нм}$ , толщина каждого слоя 10 нм;

в) пятиугольная призма, вписанная в окружность диаметром 300 нм, высота призмы 100 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 20 \text{ нм}^3$ .

### Тема 2. Вариант 3

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1400 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; константой обменного взаимодействия  $9 \times 10^{-12} \text{ Дж/м}$ . Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

а) эллипсоид  $300 \times 200 \times 10 \text{ нм}^3$ . Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 1 \text{ нм}^3$ .

- б) двухслойная структура, состоящая из двух нанодисков диаметрами 200 нм и 100 нм, верхний диск смещен из центра нижнего на 50 нм. Размер ячейки в плоскости  $1 \times 1$  нм, толщина каждого слоя 10 нм;
- в) надпись ООММФ, вписанная в прямоугольник  $250 \times 50$  нм<sup>3</sup>. Ячейка  $1 \times 1 \times 5$  нм<sup>3</sup>.

### Тема 2. Вариант 4

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $800 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции 9 нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) эллипс  $300 \times 200$  нм<sup>2</sup>. Размер ячейки в плоскости  $2 \times 2$  нм<sup>2</sup>.
- б) трехслойная структура, состоящая из двух ферромагнитных нанодисков диаметрами 300 нм и 200 нм и толщиной 10 нм, разделенных немагнитной прослойкой 5 нм. Размер ячейки в плоскости  $1 \times 1$  нм.
- в) овальная призма, вписанная в прямоугольник  $300 \times 200$  нм<sup>3</sup>, высота призмы 90 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

### Тема 2. Вариант 5

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $480 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $25 \times 10^{-12}$  Дж/м. Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:



- а) сферу диаметром 300 нм. Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ .
- б) массив из четырех нанополосок  $10 \times 50 \times 2 \text{ нм}^3$ . Направление трансляции  $Ox$ , расстояние между центрами нанополосок 20 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ .
- в) надпись NANO, вписанная в прямоугольник  $400 \times 90 \text{ нм}^3$ . Ячейка  $2 \times 2 \times 5 \text{ нм}^3$ .

### Тема 2. Вариант 6

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $580 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; константой обменного взаимодействия  $16 \times 10^{-12} \text{ Дж/м}$ . Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) сферу диаметром 300 нм. Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ .
- б) нанокольцо диаметром 300 нм, диаметр отверстия 150 нм, толщина 20 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ .
- в) треугольная призма, в основании которой лежит прямоугольный треугольник (длина катетов 100 нм и 200 нм), высота призмы 50 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10 \text{ нм}^3$ .

### Тема 2. Вариант 7

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1580 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; длина ферромагнитной корреляции 7 нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) прямоугольный параллелепипед  $300 \times 200 \times 100 \text{ нм}^3$ . Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ .
- б) квадратный массив  $[2 \times 2]$  нанодисков диаметром  $d=50 \text{ нм}$ , толщиной  $10 \text{ нм}$ , расстояние между центрами дисков  $2d$ . Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 10 \text{ нм}^3$ .
- в) треугольная призма, в основании которой лежит прямоугольный треугольник (длина катетов  $100 \text{ нм}$  и  $200 \text{ нм}$ ), высота призмы  $50 \text{ нм}$ . Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10 \text{ нм}^3$ .

### Тема 2. Вариант 8

*Задание 2.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $900 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; константой обменного взаимодействия  $30 \times 10^{-12} \text{ Дж/м}$ . Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) эллипсоид вращения  $100 \times 150 \times 100 \text{ нм}^3$ . Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ .
- б) массив из 4 нанодисков диаметром  $d=100 \text{ нм}$ , толщиной  $10 \text{ нм}$ . Направление трансляции  $Oy$ , расстояние между центрами дисков  $2d$ . Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10 \text{ нм}^3$ .
- в) надпись Modeling, вписанная в прямоугольник  $450 \times 50 \text{ нм}^3$ . Ячейка  $1 \times 1 \times 5 \text{ нм}^3$ .

### Тема 3. Вариант 1

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $480 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; константой обменного взаимодействия  $10 \times 10^{-12} \text{ Дж/м}$ . Полученный код

необходимо запустить в **Oxsi** и сохранить OMF files полученных структур.

Геометрические параметры структур:

а) цилиндр диаметром 100 нм и высотой 50 нм с квадратным отверстием в центре, сторона квадрата 30 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 1 \text{ нм}^3$ .

б) сферу диаметром 150 нм с отверстием конусной формы, выходящим из центра. Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2 \text{ нм}^3$ ;

в) структуру диск на диске, толщины дисков 10 нм, диаметры 200 нм и 100 нм, верхний диск смещен на 50 нм от центра нижнего. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10 \text{ нм}^3$ .

### Тема 3. Вариант 2

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1400 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; длина ферромагнитной корреляции 6 нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsi** и сохранить OMF files полученных структур.

Геометрические параметры структур:

а) кольцо толщиной 20 нм, диаметры внешний – 200 нм, внутренний – 150 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10 \text{ нм}^3$ .

б) двухслойный нанодиск диаметром 250 нм, размер ячейки в плоскости  $2 \times 2 \text{ нм}$ , толщина каждого слоя 10 нм;

в) квадратный массив из 4х нанодисков  $d=50 \text{ нм}$  и толщиной 10 нм, расстояние между центрами дисков  $2d$ . Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 20 \text{ нм}^3$ .

### Тема 3. Вариант 3

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1400 \times 10^3 \text{ А/м}$ ;

константой обменного взаимодействия  $9 \times 10^{-12}$  Дж/м. Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) эллипсоид вращения  $100 \times 500 \times 40$  нм<sup>3</sup>. Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 1$  нм<sup>3</sup>.
- б) участок пленки  $300 \times 300$  нм<sup>2</sup> с нанопорами квадратной формы (сторона квадрата  $a=100$  нм), упакованными в квадратный массив на расстоянии  $2a$  между центрами, толщина пленки  $10$  нм; Размер ячейки разбиения  $4 \times 4 \times 10$  нм<sup>3</sup>.
- в) овальная призма, вписанная в прямоугольник  $200 \times 100$  нм<sup>3</sup>, высота призмы  $90$  нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

### Тема 3. Вариант 4

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $800 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции  $9$  нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsii** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) призма в основании, которой лежит равносторонний треугольник со стороной  $50$  нм. Высота призмы  $20$  нм. Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>.
- б) сфера радиусом  $75$  нм, в центре которой находится пора квадратной формы (сторона квадрата  $40$  нм). Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 1$  нм<sup>3</sup>.
- в) массив из 4х наноплосок размером  $10 \times 50$  нм<sup>3</sup>, толщиной  $10$  нм. Расстояние между центрами соседних нанополосок  $40$  нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

### Тема 3. Вариант 5

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими

магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1000 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции 7 нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsi** и сохранить OMF files полученных структур.

Геометрические параметры структур:

а) прямоугольный крест длиной 100 нм, ширина нанополосок 20 нм, толщина 10 нм. Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

б) сферическая наночастица core-shell диаметром 90 нм, толщина оболочки 20 нм. Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 1$  нм<sup>3</sup>. Намагниченность насыщения в оболочке в 2 раза ниже.

в) массив из 4х нанодисков, упорядоченных в сточку, с диаметром 50 нм<sup>3</sup>, толщиной 10 нм. Расстояние между центрами соседних нанодисков 100 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

### Тема 3. Вариант 6

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1050 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $20 \times 10^{-12}$  Дж/м. Полученный код необходимо запустить в **Oxsi** и сохранить OMF files полученных структур.

Геометрические параметры структур:

а) призма в основании, которой лежит прямоугольный треугольник с катетами,  $100 \times 200$  нм<sup>2</sup>. Высота призмы 100 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

б) цилиндр в основании, которого эллипс  $100 \times 50$  нм и высотой 50 нм с квадратным отверстием в центре, сторона квадрата 20 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 1$  нм<sup>3</sup>.

в) двухслойную структуру, состоящую из диска (диаметр 200 нм), на которой расположен прямоугольник  $50 \times 100$  нм<sup>2</sup>, толщины слоев 10 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

### Тема 3. Вариант 7

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $800 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции 8 нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsi** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) куб со стороной 100 нм с отверстием конусной формы, выходящим из центра. Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2$  нм<sup>3</sup>;
- б) пирамиду в основании, которой лежит квадрат  $90 \times 90$  нм<sup>2</sup>. Высота призмы 100 нм. Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2$  нм<sup>3</sup>.
- в) массив из 4х нанопловолок диаметром 40 нм, длиной 100 нм, упакованных в квадратный массив с расстоянием между центрами 100 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>.

### Тема 3. Вариант 8

*Задание 3.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания геометрии трехмерных объектов, используя **ScriptAtlas**, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $950 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции 5 нм. Полученный код необходимо запустить в **Oxsi** и сохранить OMF files полученных структур. Геометрические параметры структур:

- а) участок пятислойной пленки  $500 \times 500$  нм<sup>2</sup>, структура ФМ/НМ/ФМ/НМ/ФМ (где ФМ-ферромагнитный слой, НМ-немагнитный слой). 5 нм толщина ФМ слоя, 2.5 нм толщина НМ слоя;
- б) конус в основании, которой лежит овал  $200 \times 90$  нм<sup>2</sup>. Высота конуса 100 нм. Размер ячейки  $2 \times 2 \times 2$  нм<sup>3</sup>.

в) структуру диск на диске, толщины дисков 5 нм, диаметры 150 нм и 50 нм, верхний диск смещен на 50 нм и центра нижнего. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 5 \text{ нм}^3$ .

#### Тема 4. Вариант 1

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $480 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; константой обменного взаимодействия  $10 \times 10^{-12} \text{ Дж/м}$ . Геометрия структуры диск на диске, толщины дисков 10 нм, диаметры 200 нм и 100 нм, верхний диск смещен на 50 нм и центра нижнего. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10 \text{ нм}^3$ . Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в верхнем диске однодоменное состояние, в нижнем вихрь;
- б) в верхнем диске двухдоменное состояние, в нижнем четырехдоменное;
- в) в верхнем 2D хаотическое распределение в нижнем двухдоменное.

#### Тема 4. Вариант 2

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1400 \times 10^3 \text{ А/м}$ ; длина ферромагнитной корреляции 6 нм. Геометрия структуры квадратный массив из 4х нанодисков  $d=50 \text{ нм}$  и толщиной 10 нм, расстояние между центрами дисков  $2d$ . Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 10 \text{ нм}^3$ . Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в каждом диске однодоменное состояние  $\uparrow \rightarrow \downarrow \leftarrow$ ;
- б) в каждом диске вихрь;
- в) хаотическое распределение.

#### Тема 4. Вариант 3

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания core-shell частицы сферической формы радиусом 75 нм, толщина оболочки 20 нм, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1200 \times 10^3$  А/м и  $900 \times 10^3$  А/м для оболочки; константой обменного взаимодействия  $9 \times 10^{-12}$  Дж/м. Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 1$  нм<sup>3</sup>. Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в центре однодоменное  $\rightarrow$ , в оболочке однодоменное  $\leftarrow$ ;
- б) в центре вихрь, оболочка насыщена по оси Oz;
- в) в центре двухдоменное состояние, в оболочке хаотическое распределение.

#### Тема 4. Вариант 4

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $800 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции 9 нм. Геометрия структуры массив из 4х нанополосок размером  $10 \times 50$  нм<sup>3</sup>, толщиной 10 нм. Расстояние между центрами соседних нанополосок 40 нм. Размер ячейки разбиения  $2 \times 2 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в каждой полоске однодоменное состояние  $\uparrow \downarrow \uparrow \downarrow$ ;
- б) в каждой полоске двухдоменное;
- в) хаотическое распределение.

#### Тема 4. Вариант 5

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами:



намагниченностью насыщения  $980 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $12 \times 10^{-12}$  Дж/м. Геометрия структуры диск, на поверхности которого расположена наноструктура квадратной формы, толщины каждого слоя 10 нм, диаметр диска 200 нм, сторона квадрата 90 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в верхнем слое однодоменное состояние, в нижнем вихрь;
- б) в верхнем слое четырехдоменное состояние, в нижнем двухдоменное;
- в) в верхнем слое 2D хаотическое распределение, в нижнем 3D хаотическое распределение.

#### Тема 4. Вариант 6

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1000 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции 8 нм. Геометрия структуры квадратный массив из 3х наноструктур квадратной формы. Сторона квадрата  $d=50$  нм, толщиной 10 нм, расстояние между центрами  $2d$ . Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в каждой наноструктуре однодоменное состояние  $\rightarrow \downarrow \leftarrow$ ;
- б) в каждой наноструктуре вихрь;
- в) хаотическое распределение.

#### Тема 4. Вариант 7

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания core-shell частицы кубической формы, сторона куба 100 нм, толщина оболочки 20 нм, со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $800 \times 10^3$  А/м и  $400 \times 10^3$  А/м для оболочки;

константой обменного взаимодействия  $9 \times 10^{-12}$  Дж/м. Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 1$  нм<sup>3</sup>. Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в центре 2D хаотическое распределение, в оболочке 3D хаотическое распределение;
- б) в центре двухдоменное состояние, оболочка насыщена по оси O<sub>x</sub>;
- в) в центре однодоменное состояние ↓, в оболочке ↑.

#### Тема 4. Вариант 8

*Задание 4.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $800 \times 10^3$  А/м; длина ферромагнитной корреляции 9 нм. Геометрия структуры массив из 4х нанопроволок диаметром  $30$  нм<sup>3</sup>, длиной 80 нм. Расстояние между центрами соседних нанопроволок 40 нм. Размер ячейки разбиения  $1 \times 1 \times 20$  нм<sup>3</sup>. Необходимо задать следующие начальные конфигурации намагниченности и сохранить OMF files полученных структур:

- а) в каждой проволоке однодоменное состояние ↑ ↓ ↑ ↓;
- б) в каждой проволоке вихрь;
- в) хаотическое распределение.

#### Тема 5. Вариант 1

*Задание 5.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1400 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $30 \times 10^{-12}$  Дж/м; кубической анизотропией [1 0 0] и  $K_1 = 5 \times 10^5$

Дж/м<sup>3</sup>. Геометрия структуры диск толщиной 10 нм, диаметр 80 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно плоскости;
- в) показать поведение ядра вихря во вращающемся поле 60 Э.

### Тема 5. Вариант 2

*Задание 5.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1000 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $10 \times 10^{-12}$  Дж/м; одноосной анизотропией [1 0 0] и  $K_1 = 4 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>. Квадратная наноструктура со стороной 70 нм и толщиной 10 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно легкой оси;
- в) показать поведение ядра вихря во вращающемся поле 40 Э.

### Тема 5. Вариант 3

*Задание 5.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $580 \times 10^3$  А/м; длиной ферромагнитной корреляции 10 нм; одноосной анизотропией [0 1 0] и  $K_1 = 2 \times 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>. Прямоугольная наноструктура  $20 \times 90$  нм<sup>2</sup> и толщиной 10 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно длинной стороне;

в) задать двухдоменное состояние и показать поведение доменной стенки во вращающемся поле 50 Э.

#### Тема 5. Вариант 4

**Задание 5.4** Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1220 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $15 \times 10^{-12}$  Дж/м; одноосной анизотропией [1 0 0] и  $K_1 = 3 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>. Прямоугольная наноструктура  $30 \times 70$  нм<sup>2</sup> и толщиной 10 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно длинной стороне;
- в) задать двухдоменное состояние и показать поведение доменной стенки во вращающемся поле 50 Э.

#### Тема 5. Вариант 5

**Задание 5.1** Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $900 \times 10^3$  А/м; длиной ферромагнитной корреляции 11 нм; кубической анизотропией [1 0 0] и  $K_1 = 3 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>. Наноструктура равностороннего треугольника со стороной 50 нм и толщиной 10 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно плоскости;
- в) показать поведение ядра вихря во вращающемся поле 60 Э.

### Тема 5. Вариант 6

*Задание 5.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $480 \times 10^3$  А/м; константой обменного взаимодействия  $12 \times 10^{-12}$  Дж/м; одноосной анизотропией  $[0 \ 1 \ 0]$  и  $K_1 = 2 \times 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>. Овальная наноструктура  $70 \times 40$  нм<sup>2</sup> и толщиной 10 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно легкой оси;
- в) показать поведение ядра вихря во вращающемся поле 50 Э.

### Тема 5. Вариант 7

*Задание 5.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $1000 \times 10^3$  А/м; длиной ферромагнитной корреляции 5 нм; одноосной анизотропией  $[0 \ 0 \ 1]$  и  $K_1 = 3 \times 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>. Нанопроволока диаметром 30 нм и длиной 90 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 5$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно длинной стороне;
- в) задать двухдоменное состояние и показать поведение доменной стенки во вращающемся поле 100 Э.

### Тема 5. Вариант 8

*Задание 5.1* Напишите код исходной задачи в формате MIF 2.1 для задания наноструктуры со следующими магнитными параметрами: намагниченностью насыщения  $800 \times 10^3$  А/м; константой обменного

взаимодействия  $9 \times 10^{-12}$  Дж/м; одноосной анизотропией  $[1 \ 0 \ 0]$  и  $K_1 = 1 \times 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>. Нанокольцо внешний диаметр 150 нм, внутренний 100 нм и толщиной 10 нм. Размер ячейки  $1 \times 1 \times 10$  нм<sup>3</sup>. Провести симуляцию следующих процессов:

- а) намагничивание из Random state;
- б) петли гистерезиса в двух направлениях параллельно и перпендикулярно плоскости;
- в) задать двухдоменное состояние и показать поведение доменных стенок во вращающемся поле 100 Э.

## **Задание на курсовую работу**

Основной целью курсового проектирования является приобретение навыков проведения самостоятельного исследования магнитных свойств методом микромагнитного моделирования, анализа полученных результатов на эксперименте и моделировании, работа со справочной литературой.

Задание на курсовой проект содержит три задачи, согласно индивидуальной теме. Выбор темы определяется либо студентом совместно с научным руководителем, согласно тематике Выпускной квалификационной работы (ВКР), либо формулируется преподавателем дисциплины, если тематика ВКР не связана с данным курсом.

### **Задача 1**

Произвести анализ литературы на выбранную тему курсового проекта. Установить основные достижения по исследованию данного вопроса, а также описать методы получения конкретных результатов. Обозначить актуальность проведения самостоятельного исследования с использованием метода микромагнитного моделирования. Выявить перечень вопросов, на которые может ответить данное исследование. Сформулировать цель курсового проекта и перечень задач, которые необходимо выполнить для достижения поставленной цели.

### **Задача 2**

Описать теоретические основы микромагнитного подхода, основные возможности метода микромагнитного моделирования для исследования ферромагнитных объектов. Также провести программного обеспечения, используемого в курсовом проекте. Список использованных блоков в ООММФ для создания модели объекта исследования, а также описание синтаксиса и пунктуации каждого конкретного блока при написании исходного кода задачи. Если моделирование основывалось на данных из

эксперимента, также нужно привести краткое описание методов которыми были получены экспериментальные результаты.

### **Задача 3**

Описание конкретного объекта исследования согласно тематике курсовой работы. Если моделирование проводилось на основе экспериментальных данных, необходимо привести результаты эксперимента. Провести анализ экспериментальных результатов и рассчитать магнитные параметры объекта исследований. При отсутствии экспериментальных данных по ряду магнитных параметров, провести анализ литературы по исследованию данных свойств подобных систем. На основании описанных магнитных и геометрических параметров сформировать исходных код для моделирования данного объекта. Провести симуляцию процессов для выполнения перечня задач, определенных в начале исследования. Сделать анализ полученных результатов, сформулировать основные результаты и выводы.

Отчет по курсовому проекту должен содержать:

- титульный лист;
- содержание;
- цель работы и задачи курсового проекта;
- обзор литературы;
- описание микромагнитного подхода;
- описание параметров объекта исследования;
- расчет с использованием микромагнитного моделирования;
- выводы по произведенным расчетам;
- список использованной литературы.

Отчет выполняется согласно требованиям ГОСТ 2.105-95 на одной стороне листа формата А4 (210 x 197 мм). Текст отчета по курсовому проекту должен состоять из разделов, снабженных заголовками в соответствии с содержанием. В тексте отчета указываются ссылки на литературу.