

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Димитровградский инженерно-технологический институт –

филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(ДИТИ НИЯУ МИФИ)

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель руководителя

_____ Т.И. Романовская
« _____ » _____ 20 ____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.04.04 Электродинамика

Направление подготовки	<i>03.03.02 Физика</i>
Квалификация выпускника	<i>Бакалавр</i>
Профиль	<i>Медицинская физика</i>
Форма обучения	<i>очная</i>
Выпускающая кафедра	<i>Кафедра общей и медицинской физики</i>
Кафедра-разработчик рабочей программы	<i>Кафедра общей и медицинской физики</i>

Семестр	Трудоемкость час.(ЗЕТ)	Лекций, час.	Практич. занятий, час.	Лаборат. работ, час.	СРС, час.	Форма промежуточного контроля (экз., час./зачет)
5	144(4)	17	34		57	экзамен (36)
Итого	144(4)	17	34		57	экзамен (36)

Димитровград
2022 г

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	3
2. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	3
3. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП	6
4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ	6
5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	7
6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	9
7. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ВХОДНОГО И ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ И ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ (АННОТАЦИЯ)	11
8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	23
9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Ошибка! Закладка не определена.
10. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИНВАЛИДОВ И ЛИЦ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ.....	25

1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины:

овладение студентами совокупностью знаний в области электромагнитных явлений в вакууме и материальных средах.

Задачей дисциплины является:

- изучение основных законов классической электродинамики, являющейся фундаментом большинства разделов электротехники, радиотехники, электроники, классической оптики и др.;
- освоение математического аппарата электродинамики;
- овладение техникой решения задач электродинамики.

2 ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций и индикаторов их достижения в соответствии с ОС НИЯУ МИФИ и ООП ВО по специальности.

В результате изучения дисциплины студент должен:

Знать:

основные законы и уравнения, описывающие электромагнитные явления и вытекающие из них основные закономерности поведения частиц в электромагнитных полях.

Владеть: способностью применять на практике математический аппарат, адаптированный к специфическим задачам электродинамики

Уметь:

применять на практике полученные знания для решения широкого круга прикладных и теоретических задач электродинамики.

Владеть:

способностью применять на практике математический аппарат, адаптированный к специфическим задачам электродинамики.

Профессиональные компетенции и индикаторы их достижения:

Задача ПД	Объект или область знания	Код и наименование ПК	Код и наименование индикатора достижения ПК	Основание (профессиональный стандарт, анализ опыта) Обобщенные трудовые функции
Тип задачи профессиональной деятельности: научно-исследовательский				
Способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики, биофизики и ядерной медицины, решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий, используя новейший отечественный и зарубежный опыт	объекты и технические устройства, испускающие или способные испускать не ионизирующее и ионизирующее излучение	ПК-1. Способен использовать профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин	З-ПК-1 знать основные физические явления, фундаментальные понятия, законы и теории физики, основные методы теоретического и экспериментального исследования, методы измерения различных физических величин У-ПК-1 уметь разбираться в физических принципах, используемых в изучаемых специальных дисциплинах, решать физические задачи применительно к изучаемым специальным дисциплинам и прикладным проблемам будущей специальности. В-ПК-1 владеть методами проведения физических измерений с оценкой погрешностей, а также методами физического описания типовых профессиональных задач и интерпретации полученных результатов.	Профессиональный стандарт «40.008. Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами» А.6. Организация выполнения научно-исследовательских работ по закрепленной тематике
		ПК-2. Способен проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудова-	З-ПК-2 знать основные современные методы и средства научного исследования, современную приборную базу (в том числе сложное физическое оборудование); теоретические основы и базовые представления научного исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований, основные закономерности формирования результатов эксперимента У-ПК-2 уметь самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в выбранной области и решать их с помощью современной приборной базы и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;	Профессиональный стандарт «40.008. Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами» А.6. Организация выполнения научно-исследовательских работ по закрепленной тематике

		<p>ния) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</p>	<p>уметь проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и(или) теоретических физических исследований, анализировать результат, полученный в ходе проведения эксперимента; оценивать изменения в выбранной области, связанные с новыми разработками, с помощью информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта.</p> <p>В-ПК-2 владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников в избранной области исследования, навыками проведения теоретических, экспериментальных и практических исследований с использованием современных программных средств, инновационных и информационных технологий, навыками работы со стандартной измерительной аппаратурой и экспериментальными установками, навыками работы на современной аппаратуре и оборудовании для выполнения физических исследований с применением современных компьютерных технологий</p>	
--	--	---	--	--

3 МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Электродинамика» относится к *части, формируемой участниками образовательных отношений профессионального* модуля учебного плана по программе бакалавриата для направления подготовки 03.03.02 Физика.

4 ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное и трудовое воспитание	Формирование глубокого понимания социальной роли профессии, позитивной и активной установки на ценности избранной специальности, ответственного отношения к профессиональной деятельности, труду (В14)	1. Использование воспитательного потенциала дисциплины «Электродинамика» для: - формирования позитивного отношения к профессии инженера (конструктора, технолога), понимания ее социальной значимости и роли в обществе, стремления следовать нормам профессиональной этики посредством контекстного обучения, решения практико-ориентированных ситуационных задач; - формирования устойчивого интереса к профессиональной деятельности, способности критически, самостоятельно мыслить, понимать значимость профессии посредством осознанного выбора тематики проектов, выполнения проектов с последующей публичной презентацией результатов, в том числе обоснованием их социальной и практической значимости; - формирования навыков командной работы, в том числе реализации различных проектных ролей (лидер, исполнитель, аналитик и пр.) посредством выполнения совместных проектов.
Профессиональное и трудовое воспитание	- формирование психологической готовности к профессиональной деятельности по избранной профессии (В15)	Использование воспитательного потенциала дисциплин «Основы электроники и электротехника» для формирования устойчивого интереса и мотивации к профессиональной деятельности, потребности в достижении результата, понимания функциональных обязанностей и задач избранной профессиональной деятельности, чувства профессиональной ответственности через выполнение учебных, в том числе практических заданий, требующих строгого соблюдения правил техники безопасности и инструкций по работе с оборудованием в рамках лабораторного практикума.
Профессиональное воспитание	- формирование культуры исследовательской и инженерной деятельности (В16)	Использование воспитательного потенциала дисциплины «Электродинамика» для формирования навыков владения эвристическими методами поиска и выбора технических решений в условиях неопределенности через специальные задания с использованием программных пакетов.

5 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1. Структура дисциплины

Общая трудоемкость (объем) дисциплины «Электродинамика» составляет 4 зачетных единицы (ЗЕТ), 144 академических часов.

Таблица 5.1 Объём дисциплины по видам учебных занятий

Вид учебной работы	Всего, зачетных единиц (акад. часов)	Семестр
		7
Контактная работа с преподавателем в том числе:		
– аудиторная по видам учебных занятий	51	51
– лекции	17	17
– практические занятия	34	34
– лабораторные работы	0	0
Самостоятельная работа обучающихся в том числе:	57	57
– проработка конспекта лекции	25	25
– подготовка к практическому занятию и его последующая доработка	25	25
– подготовка к лабораторному занятию и его последующая доработка	0	0
– составления глоссария	7	7
– подготовка доклада	0	0
– реферат	0	0
Вид промежуточной аттестации – экзамен	36	36
Итого по дисциплине	144	144

Таблица 5.2 Распределение учебной нагрузки по разделам дисциплины

№ раздела	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, включая самостоятельную работу студентов, акад. часы								Формируемые индикаторы освоения компетенций
		Лекции	Практические занятия	в том числе в форме практической подготовки	Лабораторные работы	в том числе в форме практической подготовки	Самостоятельная работа	в том числе в форме практической	Всего часов	
1	Электродинамика	17	34	-	0	-	57	-	108	З-ПК1 У-ПК-1 В-ПК1
2	Экзамен	0	0		0		0		36	З-ПК2 У-ПК2 В-ПК2
ИТОГО		17	34	-	0	-	57	-	144	

5.2. Содержание дисциплины

Таблица 5.3. Лекционный курс

№ лекции	Номер раздела	Тема лекции и перечень дидактических единиц*	Трудоемкость, часов	
			всего	в том числе с использованием интерактивных образовательных технологий
1	1	<u>Математические методы электродинамики.</u> Основные понятия и определения. Вектор. Действия с векторами. Тензор. Преобразование системы координат. Ковариантные и контравариантные компоненты. Векторный и тензорный анализ. Солиноидальные и потенциальные поля.	2	
2	1	<u>Принцип относительности.</u> Интервал. Классификация интервалов. Собственное время. Преобразования Лоренца. Преобразования скоростей. <u>Кинематика релятивистских частиц.</u> Принцип наименьшего действия для материальной частицы. Энергия и импульс.	2	
3	1	<u>Заряд в электромагнитном поле.</u> Элементарные частицы в теории относительности. Уравнение движения заряда в поле. Калибровочная инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Действие для электромагнитного поля.	2	
4	1	<u>Уравнения Максвелла в вакууме.</u> Четырехмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Закон Кулона для электрических зарядов – первое уравнение Максвелла. Закон Био-Савара-Лапласа – второе уравнение Максвелла. Закон Фарадея – третье и четвертое уравнения Максвелла. Граничные условия. Плотность и поток энергии.	2	
5	1	<u>Распространение электромагнитных волн.</u> Волновое уравнение. Плоские волны. Монохроматическая плоская волна. Четырехмерный волновой вектор. Эффект Доплера. Поле системы зарядов на далеких расстояниях. Дипольное излучение. Квадрупольное и магнитнодипольное излучения. Поле излучения на близких расстояниях.	2	
6	1	<u>Электростатика проводников.</u> Предмет электродинамики сплошных сред. Электростатическое поле проводников. Граничные условия. Энергия электростатического поля проводников. Коэффициенты емкости и связи. Метод изображений. Силы, действующие на проводник.	2	
7	1	<u>Постоянный ток.</u> Плотность тока и проводимость. Эффект Холла. Контактная разность потенциалов. Гальванический элемент. <u>Постоянное магнитное поле.</u> Вектор намагниченности. Магнитная проницаемость и восприимчивость. Граничные условия. Магнитное поле постоянных токов. Термодинамические соотношения в магнитном поле. Энергия системы токов. Коэффициенты взаимной и самоиндукции линейных проводников.	2	

8	1	Уравнения Максвелла в электродинамике сплошных сред. Уравнения Максвелла в веществе, как усреднение уравнений в вакууме. Граничные условия для уравнений Максвелла.	3	
Итого:			17	

Таблица 5.4. Практические занятия

№ занятия	Номер раздела	Наименование практического занятия и перечень дидактических единиц	Трудоемкость, часов	
			всего	в том числе в форме практической подготовки
1	1	Математические методы электродинамики	2	
2	1	Принцип относительности	2	
3	1	Кинематика релятивистских частиц	2	
4	1	Заряд в электромагнитном поле	2	
5, 6	1	Уравнения Максвелла в вакууме	4	
7	1	Распространение электромагнитных волн	2	
8	1	Контрольная работа	2	
9	1	Поле движущихся зарядов	2	
10	1	Излучение электромагнитных волн	2	
11	1	Электростатика проводников	2	
12	1	Электростатика диэлектриков	2	
13, 14	1	Постоянный ток	4	
15	1	Постоянное магнитное поле	2	
16	1	Уравнения Максвелла в электродинамике сплошных сред	2	
17	1	Контрольная работа	2	
ИТОГО:			34	

Таблица 5.5. Лабораторные работы

Учебным планом не предусмотрены.

Таблица 5.6 Самостоятельная работа студента

Раздел дисциплины	№ п/п	Вид самостоятельной работы студента	Трудоемкость, часов
1	1.1	Проработка конспекта лекции	25
	1.2	Подготовка к практическому занятию и его последующая доработка	25
	1.3	Подготовка к лабораторному занятию и его последующая доработка	0
	1.4	Составления глоссария	7
ИТОГО:			57

6 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Образовательные технологии, используемые при реализации различных видов учебной работы и дающие наиболее эффективные результаты освоения дисциплины:

1. ЛЕКЦИЯ, мастер-класс (Лк, МК) – передача учебной информации от преподавателя к студентам, как правило с использованием компьютерных и технических средств, направленная в

основном на приобретение студентами новых теоретических и фактических знаний. Наиболее распространенные виды (формы) организации учебного процесса для достижения определенных результатов обучения и компетенций:

Информационная лекция.

Проблемная лекция – в отличие от информационной лекции, на которой сообщаются сведения, предназначенные для запоминания, на проблемной лекции знания вводятся как «неизвестное», которое необходимо «открыть». Проблемная лекция начинается с вопросов, с постановки проблемы, которую в ходе изложения материала необходимо решить. При этом выдвигаемая проблема требует не однотипного решения, готовой схемы которого нет. Данный тип лекции строится таким образом, что деятельность студента по ее усвоению приближается к поисковой, исследовательской. На подобных лекциях обязателен диалог преподавателя и студентов.

Лекция-визуализация – учит студента преобразовывать устную и письменную информацию в визуальную форму, выделяя при этом наиболее значимые и существенные элементы. На лекции используются схемы, рисунки, чертежи и т.п., к подготовке которых привлекаются обучающиеся. Проведение лекции сводится к связному развернутому комментированию преподавателем подготовленных наглядных пособий. При этом важна логика и ритм подачи учебного материала. Данный тип лекции хорошо использовать на введения студентов в новый раздел, тему, дисциплину.

Лекция с разбором конкретной ситуации, изложенной в устно или в виде короткого диафильма, видеозаписи и т.п.; студенты совместно анализируют и обсуждают представленный материал.

2. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА (СР) – изучение студентами теоретического материала, подготовка к лекциям, лабораторным работам, практическим и семинарским занятиям, оформление конспектов лекций, написание рефератов, отчетов, курсовых работ, проектов, работа в электронной образовательной среде и др. для приобретения *новых теоретических и фактических знаний, теоретических и практических умений.*

3. КОНСУЛЬТАЦИЯ, тьюторство (Конс., тьют.) – индивидуальное общение преподавателя со студентом, руководство его деятельностью с целью передачи опыта, углубления *теоретических и фактических знаний*, приобретенных студентом на лекциях, в результате самостоятельной работы, в процессе выполнения курсового проектирования и др.

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ (Пр. зан.), **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА** (Л.р) – решение конкретных задач (математическое моделирование, расчеты и др.) на основании теоретических и фактических знаний, направленное в основном на приобретение *новых фактических знаний и теоретических умений.*

5. СЕМИНАР, коллоквиум (Сем., колл.) – систематизация теоретических и фактических знаний в определенном контексте (подготовка и презентация материала по определенной теме, обсуждение ее, формулирование выводов и заключения), направленная в основном на приобретение *новых фактических знаний и теоретических умений.*

Типы практических занятий, используемых при изучении дисциплины:

Кейс-метод. Его название происходит от английского слова «кейс» – папка, чемодан, портфель (в то же время «кейс» можно перевести и как «случай, ситуация»). Процесс обучения с использованием кейс-метода представляет собой имитацию реального события, сочетающую в целом адекватное отражение реальной действительности, небольшие материальные и временные затраты и вариативность обучения. Учебный материал подается студентам виде проблем (кейсов), а знания приобретаются в результате активной и творческой работы: самостоятельного осуществления целеполагания, сбора необходимой информации, ее анализа с разных точек зрения, выдвижения гипотезы, выводов, заключения, самоконтроля процесса получения знаний и его результатов.

Основные виды образовательных технологий

Дистанционные образовательные технологии – образовательные технологии, реализуемые в основном с применением информационно-телекоммуникационных сетей при опосредованном (на расстоянии) взаимодействии обучающихся и педагогических работников.

Примерами применения дистанционных образовательных технологий являются занятия, на которых обучающийся не присутствует (например, по болезни), но выполняет задания и общается

с преподавателем по электронной почте, или преподаватель консультирует обучающихся во внеурочное время через блог или сайт.

Виды дистанционного обучения: лекции (сетевые или видеозапись), виртуальные экскурсии, практические работы (семинары), проектная деятельность, телеконференции со специалистами, форумы, обсуждения, дискуссии, консультации индивидуальные или групповые, тестирование.

Для проведения занятий с использованием электронного образования и дистанционных образовательных технологий используются следующие образовательные технологии и средства освоения дисциплины:

- электронная информационно-образовательная среда НИЯУ МИФИ – Режим доступа <https://eis.mephi.ru/>;

- платформа для проведения on-line конференций и вебинаров ZOOM – Режим доступа <https://zoom.us/>;

- файлообменная система Google Диск – Режим доступа <https://drive.google.com/>;

- система обмена текстовыми сообщениями для мобильных и иных платформ с поддержкой голосовой и видеосвязи WhatsApp, Телеграм;

- социальная сеть ВКонтакте;

- электронная почта преподавателей и студентов.

Кейсовая-технология основывается на использовании наборов (кейсов) текстовых, аудиовизуальных и мультимедийных учебно-методических материалов и их рассылке для самостоятельного изучения учащимся при организации регулярных консультаций у преподавателей.

Телевизионно-спутниковая технология основана на применении интерактивного телевидения: теле- и радиолекции, видеоконференции, виртуальные практические занятия и т.д.

Сетевые технологии используют телекоммуникационные сети для обеспечения учащихся учебно-методическим материалом и взаимодействия с различной степенью интерактивности между преподавателем и учащимся.

Информационные технологии – обучение в электронной образовательной среде с целью расширения доступа к образовательным ресурсам (теоретически к неограниченному объему и скорости доступа), увеличения контактного взаимодействия с преподавателем, построения индивидуальных траекторий подготовки и объективного контроля и мониторинга знаний студентов.

Работа в команде – совместная деятельность студентов в группе под руководством лидера, направленная на решение общей задачи путем творческого сложения результатов индивидуальной работы членов команды с делением полномочий и ответственности.

Case-study - анализ реальных проблемных ситуаций, имевших место в соответствующей области профессиональной деятельности, и поиск вариантов лучших решений.

Игра – ролевая имитация студентами реальной профессиональной деятельности с выполнением функций специалистов на различных рабочих местах.

Проблемное обучение – стимулирование студентов к самостоятельному приобретению знаний, необходимых для решения конкретной проблемы.

Контекстное обучение – мотивация студентов к усвоению знаний путем выявления связей между конкретным знанием и его применением. При этом знания, умения, навыки даются не как предмет для запоминания, а в качестве средства решения профессиональных задач.

Обучение на основе опыта – активизация познавательной деятельности студента за счет ассоциации и собственного опыта с предметом изучения.

Индивидуальное обучение – выстраивание студентом собственной образовательной траектории на основе формирования индивидуальной образовательной программы с учетом интересов студента.

Междисциплинарное обучение – использование знаний из разных областей, их группировка и концентрация в контексте решаемой задачи.

Опережающая самостоятельная работа – изучение студентами нового материала до его изучения в ходе аудиторных занятий.

7 ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ВХОДНОГО И ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ И ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ (АННОТАЦИЯ)

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о рейтинговой системе оценки знаний студентов ДИТИ НИЯУ МИФИ.

Входной контроль

Входной контроль не предусмотрен

Текущий контроль студентов производится в дискретные временные интервалы лектором и преподавателем (ями), ведущими лабораторные работы и практические занятия по дисциплине в следующих формах:

- проверка домашних заданий
- устные опросы и письменные задания на практических занятиях;
- отдельно оцениваются личностные качества студента (аккуратность, исполнительность, инициативность) – работа у доски, своевременная сдача тестов, отчетов к лабораторным работам и письменных домашних заданий.

Примеры заданий и задач практических занятий и письменных домашних.

Методические указания представлены в форме типовых задач с решениями, позволяющими познакомиться с методикой решения задач домашних заданий.

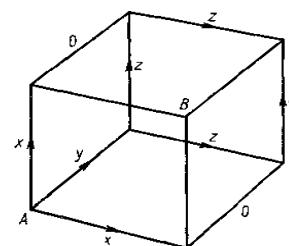
3.1. Ребра куба представляют собой одинаковые сопротивления R , соединенные друг с другом в вершинах. Два противоположных угла одной грани куба присоединены к батарее. Каково эффективное сопротивление такой цепи?

Решение:

С учетом симметрии куба направления токов через сопротивления можно представить так, как показано на рисунке. Из закона сохранения тока следует, что

$$I = 2x + y, \quad y = 2z,$$

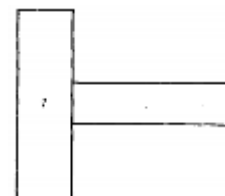
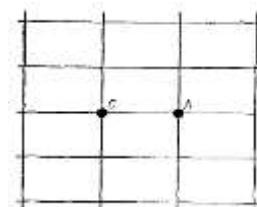
где I – полный ток в цепи. Из условия, что разность потенциалов между точками A и B не зависит от пути, получим дополнительное уравнение $2xR = 2(y + z)R$. Из этих трех уравнений найдем, что $x = 3I/8$, $y = I/4$ и $z = I/8$. Сопротивление между точками A и B равно $2xR/I$, а следовательно, $R_{AB} = 3R/4$.



3.2. В электрическую цепь, представляющую собой бесконечно протяженную плоскую сетку с прямоугольной ячейкой, через точку A подводится, а через точку C снимается ток i . Найти силу тока, протекающего по проводу AC .

Решение:

Если ток i подводится через точку A , а снимается на бесконечности, то из соображений симметрии по проводу AC течет ток $i/4$. С другой стороны, если с точки C снимается ток i , подводимый к сетке на бесконечности, то очевидно, что по проводу AC будет течь ток $i/4$. Таким образом, суммарный ток по проводу AC равен $i/2$.



3.3. Имеются два одинаковых стальных бруска, один из которых намагничен, а другой нет. Каким образом можно определить, какой из брусков намагничен, не используя внешнее магнитное поле? (Имеется возможность измерять силы.)

Решение:

Расположим бруски как показано на рисунке. Тогда, если намагничен брусок 1, то вследствие симметрии между брусками притяжения не будет. Если же намагничен брусок 2, то благодаря индуцированному в бруске 1 полю они будут притягиваться.

3.4. Проводник заряжается электрическим зарядом при многократном соприкосновении с металлической пластиной, которая после каждого соприкосновения дозарядается до величины заряда Q . До какой конечной величины зарядится проводник, если после первого соприкосновения его заряд оказался равен q ?

Решение:

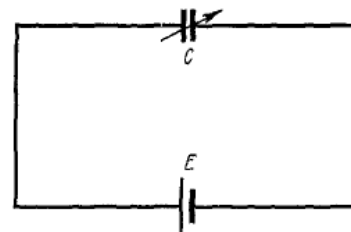
Вследствие линейности уравнений электростатики имеем следующие выражения для зарядов соответственно на проводнике на пластине, после того как они приведены в контакт:

$$q_1 = C_1 V, \quad q_2 = C_2 V,$$

где V – общий для проводника и пластины потенциал.

Таким образом, $q_1/q_2 = C_1/C_2 = \text{const}$. После первого соприкосновения $q_1 = q$ и $q_2 = Q - q$, но, в конце концов, $q_2 \rightarrow Q$ и, следовательно, $q_1 \rightarrow Qq/(Q - q)$.

3.5. Переменный конденсатор присоединен к батарее с э.д.с., равной E . C_0 и q_0 – начальная емкость и заряд конденсатора. В дальнейшем емкость конденсатора изменяется во времени так, что ток в цепи I остается постоянным. Вычислить мощность, потребляемую от батареи, и сравнить ее со скоростью изменения во времени энергии, запасенной в конденсаторе. Если сравниваемые величины различаются, объяснить – почему.



Решение:

От батареи потребляется постоянная мощность $P = EI$. Электростатическая энергия конденсатора $U = qE/2$ изменяется во времени со скоростью

$$\frac{dU}{dt} = \frac{E}{2} \cdot \frac{dq}{dt} = \frac{EI}{2}$$

Таким образом, работа, произведенная батареей, в два раза превышает энергию, запасенную конденсатором. Наблюдаемая разница объясняется тем, что конденсатор производит работу над внешним агентом, вызывающим соответствующее изменение емкости.

3.6. После погружения конденсатора в среду с проводимостью g сопротивление между его зажимами оказалось равным R . Показать, что независимо от формы его пластин имеет место соотношение $RC = \epsilon/g$, где ϵ – диэлектрическая постоянная среды, а C – емкость конденсатора в среде.

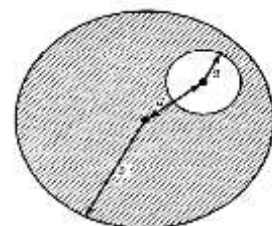
Решение:

Пусть Q – величина заряда на пластине, а σ – поверхностная плотность заряда на этой пластине. Обозначим I и J соответственно ток и плотность тока между пластинами, а V – разность потенциалов, приложенную к пластинам. Тогда

$$\frac{V}{R} = I = \int \mathbf{J} d\mathbf{A} = g \int \mathbf{E} d\mathbf{A} = \frac{g}{\epsilon} \int \sigma d\mathbf{A} = \frac{gQ}{\epsilon} = \frac{Q}{\epsilon} CV$$

(здесь использовали теорему Гаусса). Следовательно, $RC = \epsilon/g$.

3.7. В цилиндре радиусом b просверлено отверстие радиусом a ($a < b$). Ось отверстия параллельна оси цилиндра, а расстояние между осями равно d . По цилиндру течет ток I . Какова напряженность магнитного поля на оси отверстия?



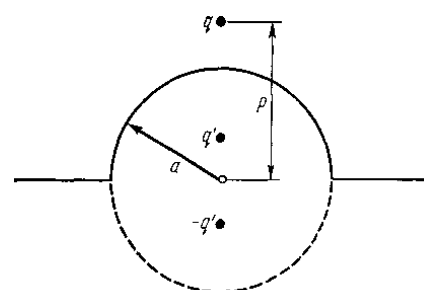
Решение:

Линейность уравнений Максвелла позволяет считать, что магнитное поле возникает от двух токов: от тока с плотностью $j = I/(\pi(b^2 - a^2))$, протекающего по цилиндру радиусом b , и от тока с плотностью $-j$, протекающего по цилиндру радиусом a . Сумма плотностей этих токов представляет собой распределение токов в просверленном цилиндре. Из закона Ампера для циркуляции $\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = (4\pi/c) \int \mathbf{j} d\mathbf{A}$ найдем, что ток с плотностью j создает в центре отверстия магнитное поле напряженностью $H = 2Id/c(b^2 - a^2)$, в то время как ток с плотностью $-j$ не создает в центре отверстия магнитного поля. Следовательно, результирующая напряженность магнитного поля H определяется выражением $H = 2Id/c(b^2 - a^2)$.

3.8. Проводник имеет форму бесконечной проводящей плоскости с полусферическим выступом радиусом a . Над центром выступа на расстоянии p от плоскости расположен заряд q . Вычислить силу, действующую на заряд.

Решение:

Задача решается методом изображений. Предполо-



жим, что внутри проводника имеются фиктивные заряды, величина и расположение которых выбраны так, чтобы поверхность проводника была эквипотенциальной. Чтобы сделать эквипотенциальной поверхность выступа, необходимо поместить фиктивный заряд $q' = -qa/p$ на расстоянии a^2/p от начала координат на линии, соединяющей начало координат с зарядом q (начало координат выбрано в центре полусферического выступа). Однако для того чтобы при этом сохранить эквипотенциальность плоскости, необходимо дополнительно поместить фиктивные заряды $-q', -q$ на расстояниях соответственно $-a^2/p$ и $-p$ внутри проводника. Тогда сила, действующая на заряд q , определится выражением

$$F = q^2 \left[\frac{-a}{\rho(\rho - a^2/\rho)^2} + \frac{a}{\rho(\rho + a^2/\rho)^2} - \frac{1}{4\rho^2} \right] =$$

$$= -q^2 \left[\frac{4a^3\rho^3}{(\rho^4 - a^4)^2} + \frac{1}{4\rho^2} \right]$$

3.9. Имеется толстостенный полусферический колпак, внутренний и внешний радиусы которого равны соответственно a и b . Колпак однородно намагничен вдоль оси симметрии (ось z на рисунке). Показать, что помещенная в начало координат небольшая стрелка компаса будет свободно вращаться.

Решение:

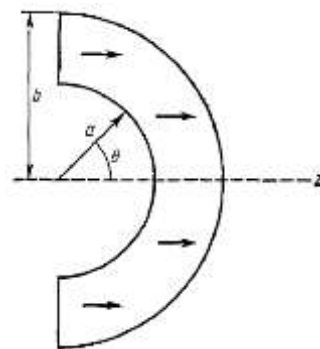
Напряженность магнитного поля в начале координат определяется выражением

$$H = \int \frac{\hat{r}\rho_M d^3x}{r^2} + \int \frac{\hat{r}d\sigma_M}{r^2} \quad (1)$$

где $\rho_M = -\nabla M = 0$ и $d\sigma_M = M dA$ – соответственно объемная и поверхностная плотности намагниченности. На каждой из поверхностей колпака $|r|$ постоянен, и

$$-\frac{d\sigma_M}{r^2} \Big|_b = \frac{d\sigma_M}{r^2} \Big|_a = -M \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi$$

подставив это значение в выражение (1), получим $\mathbf{H} = 0$.



3.10. Тонкий однородный металлический диск лежит на бесконечной проводящей плоскости. Однородное гравитационное поле направлено перпендикулярно к плоскости. Вначале диск и плоскость не заряжены, к ним медленно подводится заряд. Какова должна быть плотность заряда, чтобы диск приподнялся над плоскостью?

Решение:

Согласно теореме Гаусса, $E = 4\pi\sigma$, где σ – поверхностная плотность заряда. E направлено перпендикулярно к плоскости. Когда диск приподнимается над плоскостью на бесконечно малую высоту dx , энергия поля уменьшается на величину, равную произведению образовавшегося объема на плотность электростатической энергии: $dU = -E^2 A dx / 8\pi$, где A – площадь диска. Следовательно, появляется отталкивающая сила

$$F = -\frac{dU}{dx} = \frac{AE^2}{8\pi} = \frac{A(4\pi\sigma)^2}{8\pi} = 2\pi\sigma^2 A$$

Диск начнет подниматься над плоскостью, когда эта сила превысит силу тяжести диска.

Другой вариант решения. Поле образуется двумя источниками – зарядом на диске и зарядом на плоскости. Первый из них не может вызвать силу, действующую на диск. Вычислим поле, обусловленное зарядом на диске, и вычтем его из суммарного поля, определяемого теоремой Гаусса. Потенциал на оси диска на расстоянии x под плоскостью равен

$$V(x) = \int_0^R \frac{2\pi\sigma r dr}{(r^2 + x^2)^{3/2}} = 2\pi\sigma \left[(R^2 + x^2)^{1/2} - x \right],$$

где R – радиус диска. Тогда

$$E(0) = -\frac{dV}{dx}\Big|_{x=0} = -2\pi\sigma\left(\frac{x}{\sqrt{R^2+x^2}}-1\right)\Big|_{x=0} = 2\pi\sigma$$

Следовательно, напряженность поля E , действующего на диск, равна $2\pi\sigma$, а сила, с которой оно действует,

$$F = \sigma \int \mathbf{E} d\mathbf{A} = 2\pi\sigma^2 A$$

3.11. Вычислить емкость C сферического конденсатора, внутренний и внешний радиусы которого равны соответственно R_1 и R_2 . Конденсатор наполнен диэлектриком с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cos^2 \theta,$$

где θ – полярный угол.

Решение:

Электростатический потенциал $\phi(r)$ является функцией лишь радиуса, потому что $\phi(R_1, \theta, \varphi) = V_1$ не зависит от θ и φ . Следовательно, продолжение этой функции на область, занимаемую диэлектриком, также не должно зависеть от θ и φ . Таким образом, на поверхности радиусом R электрическое поле радиально и постоянно по величине по всей поверхности. Применяя теорему Гаусса к сфере радиусом $R (R_1 < R < R_2)$, получим

$$\begin{aligned} \int D dA = 4\pi Q &= -2\pi R^2 E \int_{-1}^{+1} (\varepsilon_0 + \varepsilon_1 \cos^2 \theta) d(\cos \theta) = \\ &= \frac{4\pi R^2}{3} E (3\varepsilon_0 + \varepsilon_1), \end{aligned}$$

откуда $E = 3Q / (3\varepsilon_0 + \varepsilon_1) R^2$. Разность потенциалов между пластинами равна

$$V = \int_{R_1}^{R_2} \mathbf{E} d\mathbf{R} = \frac{3Q(R_2 - R_1)}{(3\varepsilon_0 + \varepsilon_1)R_1 R_2} \equiv \frac{Q}{C}$$

Следовательно,

$$C = \frac{R_1 R_2 (3\varepsilon_0 + \varepsilon_1)}{3(R_2 - R_1)}$$

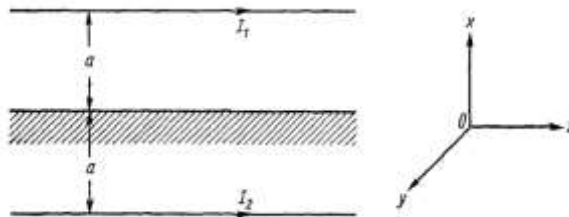
3.12. Длинный прямой провод, по которому течет ток I_1 расположен на расстоянии a над полубесконечной магнитной средой с магнитной проницаемостью μ . Вычислить силу, действующую на единицу длины провода, и определить направление этой силы.

Решение:

Из уравнения $\mathbf{H} = -\nabla\phi$, поскольку бесконечный провод с током I_1 , в пустоте создает поле $B_0 = 2I_1/r$ (закон Ампера), получим

$$\phi = -2I_1 \operatorname{Im} \ln(x + iy)$$

с точностью до постоянной. Введя фиктивный ток I_2 , протекающий внутри магнитной среды на расстоянии a от границы раздела, получим



$$\begin{aligned} \phi &= -2I_1 \ln[(x-a) + iy] - 2I_2 \ln[(x+a) + iy], \\ \phi_2 &= -2I_3 \ln[(x-a) + iy], \end{aligned}$$

где ϕ и ϕ_2 – соответственно потенциалы в вакууме и в среде. Далее из непрерывности тангенциальной компоненты \mathbf{H} и нормальной компоненты $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ следует

$$I_2 = I_1 \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \text{ и } I_3 = \frac{2I_1}{\mu + 1}$$

Сила, действующая на ток I_1 в точности равна силе, создаваемой фиктивным током I_2 . Поле, созданное током I_2 на проводе с током I_1 равно

$$B = \frac{2I_2}{r} = \frac{(\mu - 1)I_1}{(\mu + 1)a}$$

Отсюда получаем выражение для силы, действующей на единицу длины провода

$$\frac{F}{L} = I_1 B = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \cdot \frac{I_1^2}{a}$$

Эта сила является силой притяжения.

3.13. Коэффициент самоиндукции круговой петли из тонкой проволоки (столь тонкой, что потоком через проволоку можно пренебречь) измеряется в следующих случаях:

- а) плоскость петли совпадает с плоскостью xu , которая представляет собой раздел сред с магнитной проницаемостью $\mu = 2$ ($z < 0$) и $\mu = 1$ (вакуум, $z > 0$);
- б) петля находится в среде с $\mu = 1$.

Каково отношение коэффициентов самоиндукции L в этих двух случаях?

Решение:

Используем индексы 1 и 2 соответственно для обозначения среды с коэффициентом $\mu = 1$ и $\mu = 2$. Помещение петли на границе раздела вызывает фиктивные токи в том же самом месте, где течет реальный ток, и это обстоятельство изменяет величину, но не характер поля \mathbf{B} .

Действительно, источниками поля \mathbf{B} являются, с одной стороны, плотность реального тока \mathbf{j} , а с другой стороны, величина $[\nabla \mathbf{M}]$, где \mathbf{M} — магнитный момент единицы объема. Однако \mathbf{M} пропорционален \mathbf{H} , а $[\nabla \mathbf{H}]$ равно нулю везде, кроме области с $\mathbf{j} \neq 0$. Теперь используем соотношение $\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_{\text{реал}}$, по любой петле, где I — замкнутый ток.

В случае а)

$$\mathbf{B}_1^a = \mu_1 \mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_1 \text{ и } \mathbf{B}_2^a = \mu_2 \mathbf{H}_2 = 2\mathbf{H}_2,$$

а в случае б)

$$\mathbf{B}_1^b = \mathbf{H}_1 \text{ и } \mathbf{B}_2^b = \mathbf{H}_2$$

Выберем линию, где $|\mathbf{B}| = \text{const}$, в качестве контура, по которому берется криволинейный интеграл в законе Ампера. Тогда

$$\begin{aligned} I &= \oint \mathbf{H}^a d\mathbf{l} = \int \mathbf{B}_1^a d\mathbf{l} + \frac{1}{\mu} \int \mathbf{B}_2^a d\mathbf{l} = \frac{3}{2} \int \mathbf{B}_1^a d\mathbf{l} = \\ &= \int \mathbf{H}^b d\mathbf{l} = 2 \int \mathbf{B}_1^b d\mathbf{l} \end{aligned}$$

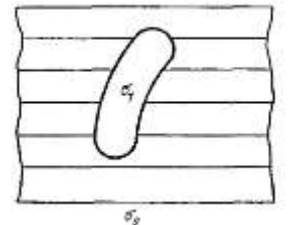
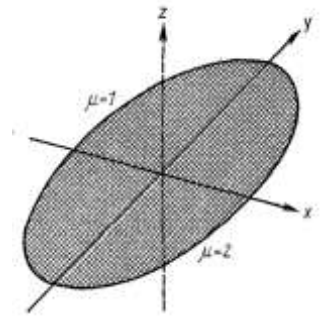
Следовательно, $\mathbf{B}_1^a = 4 \mathbf{B}_1^b / 3$. Если обозначить Φ магнитный поток через петлю, то

$$\frac{\Phi^a}{\Phi^b} = \frac{L^a I}{L^b I} = \frac{L^a}{L^b} = \frac{\int \mathbf{B}^a d\mathbf{l}}{\int \mathbf{B}^b d\mathbf{l}} = \frac{4}{3}$$

3.14. Внутри металла с проводимостью σ_0 имеется небольшое включение с проводимостью σ_1 . Это включение возмущает электрическое поле, которое в отсутствие включения было бы постоянным. Найти зависимость возмущения от расстояния до включения. (Решить задачу только для случая установившегося состояния.)

Решение:

На большом удалении от включения электрическое поле может быть записано в виде $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 - \nabla V$, где \mathbf{E}_0 — постоянное электрическое поле. Эффект возмущения поля включением представлен потенциалом, который может быть разложен по сферическим гармоникам



$$V = \sum_{l,m} A_{lm} Y_l^m(\theta, \varphi) \frac{1}{r^{l+1}}$$

Начало координат выбрано внутри самого включения. Теперь определим первый ненулевой член в этом разложении. Легко показать, что член с $l = 0$ равен нулю. Действительно, $\int \mathbf{E} d\mathbf{A}$ по поверхности, охватывающей включение, равен $4\pi A_0$. Если он не равен нулю, то заряд будет покидать включение со скоростью $\int \mathbf{j} d\mathbf{A} = \sigma_0 \int \mathbf{E} d\mathbf{A} = 4\pi\tau_0 A_0$ и условие стационарности будет нарушено. Поэтому $A_0 = 0$ и главным членом разложения возмущения будет член с $l = 1$:

$$V \sim \frac{1}{r^2} \sum_m \alpha_m Y_1^m(\theta, \varphi)$$

Следовательно:

$$|\mathbf{E} - \mathbf{E}_0| \sim \frac{1}{r^3}$$

3.15. Длинный проводник, имеющий форму полого цилиндра радиусом a , разрезан по образующим на две половинки, разделенные небольшим расстоянием. К половинкам приложены потенциалы V_1 и V_2 . Показать, что потенциал в любой точке внутри цилиндра определяется выражением

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} + 2 \frac{V_1 - V_2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n-1} \cos[(2n-1)\theta],$$

где r — расстояние от точки до оси цилиндра.

Решение:

Разделяя переменные в уравнении

$$\nabla^2 V = 0 = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2},$$

находим

$$V = \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^m [A_m \cos(m\theta) + B_m \sin(m\theta)],$$

откуда

$$V(r = a, \theta) = \sum_{m=0}^{\infty} [A_m \cos(m\theta) + B_m \sin(m\theta)],$$

$B_m = 0$, так как $V(\theta) = V(-\theta)$. Коэффициенты A_m могут быть вычислены, если проинтегрировать произведение $V(a, \theta) \cos(n\theta)$ по θ :

$$\begin{aligned} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} V_1 \cos(n\theta) d\theta + \int_{\pi/2}^{3\pi/2} V_2 \cos(n\theta) d\theta &= \\ &= \frac{2(V_1 - V_2)}{n} \sin \frac{n\pi}{2} = \pi A_n, \end{aligned}$$

и $\pi(V_2 + V_1) = 2\pi A_0$. Таким образом,

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{2(V_1 - V_2)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n-1} \times \cos[(2n-1)\theta]$$

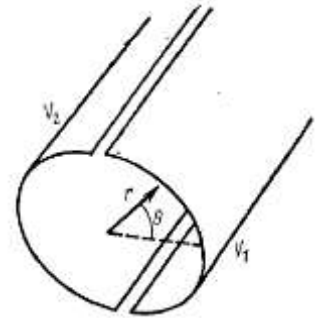
Наконец, стоит заметить, что ряд может быть просуммирован. Это выполняется с помощью соотношения

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{x^{2n-1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\theta] = \operatorname{Re} \int_0^x \frac{-1}{y} \sum_{n=1}^{\infty} (iy e^{i\theta})^{2n-1} dy,$$

которое, если воспользоваться разложением

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=1}^{\infty} x^n \text{ для } |x| < 1,$$

примет вид



$$\operatorname{Re} \int_0^x \frac{-1}{2y} \left(\frac{1}{1-iy e^{i\theta}} - \frac{1}{1+iy e^{i\theta}} \right) dy$$

Проинтегрировав, получим

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} x^{2n-1} \cos[(2n-1)\theta] = \frac{1}{2} \operatorname{Im} \ln \frac{1+ix e^{i\theta}}{1-ix e^{i\theta}} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2x \cos \theta}{1-x^2}$$

Таким образом,

$$V(r, \theta) = \frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{V_1 - V_2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2ar \cos \theta}{a^2 - r^2}$$

Это выражение может быть также получено с помощью функции Грина.

3.16. Найти, каким образом убывает во времени начальная плотность заряда в любой точке внутри проводника. Оценить время, в течение которого первоначальный заряд внутри медного проводника исчезает (удельное электрическое сопротивление меди равно $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Если проводник совершенно изолирован, то как распределяется заряд?

Решение:

Комбинируя теорему Гаусса $\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho$, закон Ома $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$ и уравнение непрерывности $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J} = 0$, получим временную зависимость плотности заряда ρ :

$$\rho = \rho_0 e^{-4\pi\sigma t}$$

Следовательно, характеристическое время утечки заряда равно $1/4\pi\sigma$. Для меди оно равно $1,5 \cdot 10^{-19} \text{ сек}$. Это время столь короткое, что для его реализации, т. е. для перемещения носителей заряда на очень малое расстояние, необходимо, чтобы их скорость превышала скорость света. Следовательно, такое решение неприменимо, что, в свою очередь, является следствием нарушения закона Ома. Поскольку заряд не может находиться внутри проводника, то в случае, когда проводник полностью изолирован, заряд распределится по его поверхности с определенной поверхностной плотностью.

3.17. Небольшая сфера радиусом a и поляризуемостью α расположена на очень большом расстоянии от сферы радиусом b , изготовленной из проводящего материала, которая поддерживается при потенциале V . Найдите приближенное выражение для силы, действующей на сферу из диэлектрика, справедливое при условии $a \ll r$, где r – расстояние между сферами.

Решение:

Сфера из проводящего материала является источником электрического поля $E = bV/r^2$, которое поляризует диэлектрик. Индуцированный таким образом диполь \mathbf{p} имеет энергию $U = -\mathbf{p}\mathbf{E}/2$ в поле \mathbf{E} . Но $\mathbf{p} = \alpha\mathbf{E}$, и, следовательно, сила, действующая на диэлектрик, определяется из уравнения $\mathbf{E} = -\nabla U$. Следовательно,

$$F_r = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{2ab^2V^2}{r^5}$$

3.18. Вывести соотношение Клаузиуса-Моссотти, связывающее диэлектрическую постоянную ϵ с поляризуемостью среды α .

Решение:

$\mathbf{P} = N\alpha \mathbf{E}_{\text{локал}} = N\alpha(\mathbf{E}_{\text{макр}} + 4\pi\mathbf{P}/3)$, где $\mathbf{E}_{\text{макр}}$ – макроскопическое электрическое поле. Далее, $\epsilon \mathbf{E}_{\text{макр}} = \mathbf{E}_{\text{макр}} + 4\pi\mathbf{P}$, так что

$$\mathbf{P} = 4\pi N\alpha \frac{\epsilon + 2}{\epsilon - 1} \cdot \frac{\mathbf{P}}{3}$$

Отсюда

$$(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2) = 4\pi N\alpha/3$$

3.19. В простой кубической решетке постоянная решетки равна 2 \AA , а показатель преломления (скажем, для длины волны излучения натрия) равен $n = 2,07$. Предположим, что среда подвергается такому давлению, что происходит двухпроцентное удлинение вдоль одного из ребер куба и однопроцентное сокращение вдоль двух других ребер.

Вычислить показатель преломления деформированной решетки для случаев, когда электрический вектор \mathbf{E} направлен а) параллельно и б) перпендикулярно к главной оси деформации. Считать атомную поляризуемость α постоянной скалярной величиной.

Указание. Локальное поле, действующее на атом в описанной среде, можно найти следующим образом. Представим себе сферическую полость, окружающую атом и шесть соседних атомов. Вне этой полости среду можно считать непрерывной и изотропной. Локальное поле в центре полости может быть выражено в виде

$$\mathbf{E}_л = \mathbf{E} + \mathbf{E}' + \sum_{i=1}^6 \mathbf{E}_i'',$$

где \mathbf{E} – приложенное поле, \mathbf{E}' и \mathbf{E}_i'' – поля, вызванные соответственно поляризованным континуумом вне сферической полости и диполем, индуцированным в i -м атоме внутри полости. В анизотропной среде $\sum_{i=1}^6 \mathbf{E}_i''$ не обращается в нуль. Более того, эта величина зависит от направления приложенного поля \mathbf{E} .

Решение:

Поле атомов, находящихся вне рассматриваемой полости, вычисляется с использованием средней плотности макроскопической поляризации \mathbf{P} в предположении, что среда обладает поверхностной плотностью зарядов $\sigma = \mathbf{P}\hat{n}$ и объемной плотностью зарядов $\rho = -\nabla\mathbf{P}$. Таким образом,

$$\mathbf{E}' = \int_s \frac{(-\mathbf{P}\hat{n})(-\hat{n})dA}{r^2} + \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_v,$$

где S – поверхность полости. Первый член обусловлен поверхностной плотностью заряда σ (направление \hat{n} выбрано наружу из области), члены \mathbf{E}_s и \mathbf{E}_v – соответственно вкладами от других поверхностных границ диэлектрика и от объемной плотности $\rho = -\nabla\mathbf{P}$. Существенно теперь считать \mathbf{P} константой в непосредственной близости от рассматриваемой полости. Тогда сумму $\mathbf{E} + \mathbf{E}_s + \mathbf{E}_v$ можно отождествить со средним макроскопическим полем $\mathbf{E}_{\text{макр}}$. Кроме того,

$$\int_s \frac{(-\mathbf{P}\hat{n})(-\hat{n})dA}{r^2} = \frac{4\pi\mathbf{P}}{3}$$

Таким образом, $\mathbf{E} + \mathbf{E}' = \mathbf{E}_{\text{макр}} + 4\pi\mathbf{P}/3$. Электрическое поле, обусловленное соседними атомами, расположенными в точке \mathbf{x}_i с дипольными моментами \mathbf{p}_i , равно

$$\mathbf{E}'' = \sum_{i=1}^6 \frac{3(\mathbf{p}_i x_i) x_i - x_i^2 \mathbf{p}_i}{x_i^5}$$

В случае (а) два атома имеют координаты $|\mathbf{x}_i| = x_1$ в то время как другие четыре атома находятся в точках с координатами $|\mathbf{x}_i| = x_2$. Все диполи имеют одинаковую величину и направлены вдоль поля \mathbf{E} . Таким образом,

$$\mathbf{E}'' = \frac{12\mathbf{p}(x_2 - x_1)}{x_2^4} \quad \text{для } (x_1 - x_2) \ll x_2$$

Кроме того, $\mathbf{p} = \alpha\mathbf{E}_л$ и $\mathbf{P} = N\alpha\mathbf{E}_л$ и, следовательно,

$$\mathbf{E}_л = \frac{\mathbf{E}_{\text{макр}}}{1 - \frac{4\pi N\alpha}{3} - 12 \frac{(x_2 - x_1)\alpha}{x_2^4}}$$

Коэффициент преломления n определяется из выражения

$$\mathbf{P} = N\alpha\mathbf{E}_л \equiv \frac{\varepsilon - 1}{4\pi} \mathbf{E}_{\text{макр}},$$

где $\varepsilon = n^2$.

Из приведенного значения постоянной решетки получаем $N = 1,25 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$, а из значения n для недеформированной решетки имеем $\alpha = 0,83 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$. Тогда для случая, когда \mathbf{E} параллельно главной оси деформации, получим $n = 2$, что меньше значения коэффициента преломления для недеформированной решетки. В случае (б)

$$\mathbf{E}'' = 6\mathbf{p}(x_1 - x_2)/x_2^4$$

и, следовательно, равно половине величины \mathbf{E}'' для случая (а) и, кроме того, имеет противополож-

ный знак. После соответствующей подстановки получим $n = 2,1$.

3.20. Каков критический угол полного отражения для коротковолнового рентгеновского излучения с длиной волны λ , падающего на металлическую пластину, в которой все N электронов в единице объема являются «свободными».

Решение:

Критический угол определяется законом Снеллиуса. Но для этого необходимо знать показатель преломления $n(\lambda)$. Чтобы его определить, запишем

$$m\ddot{x} = eE = eE_0 e^{-i\omega t} = -m\chi_0 \omega^2 e^{-i\omega t},$$

где $\omega = 2\pi c/\lambda$. Предполагается, что электрон осциллирует с частотой, равной частоте рентгеновского излучения, а амплитуда осцилляции равна x_0 . Максимальный индуцированный дипольный момент для одной пары ион – электрон в предположении, что ион покоится, равен

$$ex_0 = -\frac{e^2 E_0}{m\omega^2} \quad (1)$$

При наличии связи знаменатель в выражении (1) будет содержать дополнительный член $m\omega_0^2$, где ω_0 – характеристическая частота связи электрона с ионом.

Поляризация металла равна $\mathbf{P} = -Ne^2 \mathbf{E}_0 / m\omega^2$, а его поляризуемость $\alpha = \mathbf{P}/\mathbf{E} = -Ne^2 / m\omega^2$. Далее,

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P} = \mathbf{E}(1 + 4\pi\alpha),$$

откуда

$$n^2 \equiv \varepsilon = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{m\omega^2} (< 1)$$

Согласно закону Снеллиуса $n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2$ (здесь углы измеряются по отношению к поверхности), критический угол θ_1 , для которого угол преломления $\theta_2 = 0$, определяется выражением

$$\cos^2 \theta_k = n^2 = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{m\omega^2}$$

или

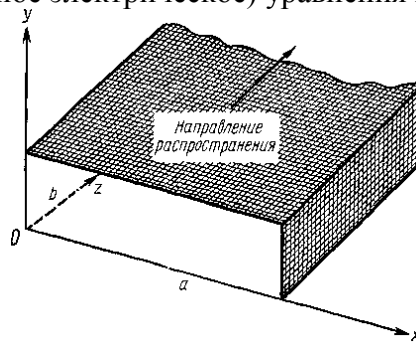
$$\sin \theta_k = \left(\frac{4\pi Ne^2}{m\omega^2} \right)^{1/2} \equiv \frac{\omega_p}{\omega}$$

где ω_p – плазменная частота. Для случая $\omega < \omega_p$ показатель преломления чисто мнимый и, следовательно, имеет место полное отражение при всех углах падения.

3.22. Показать, что электромагнитные волны могут распространяться внутри полой металлической трубы прямоугольного поперечного сечения, стенки которой полностью проводящие. Каковы групповая и фазовая скорости распространения? Показать, что имеется граничная частота и что электромагнитные волны с частотой меньше граничной не могут распространяться по такому волноводу.

Решение:

Рассмотрим решение (поперечное электрическое) уравнения Максвелла внутри полости:



$$E_z = 0, E_x = E_1(x, y)e^{1(kz - \omega t)},$$

$$E_y = E_2(x, y)e^{1(kz - \omega t)}$$

Из волнового уравнения

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$$

Получим

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_i - \left(k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) E_i = 0 \quad (1)$$

Решение, удовлетворяющее граничным условиям, гласящим, что поперечная составляющая E и продольная составляющая H обращаются в нуль, имеет вид

$$E_1 = E_{01} \cos \frac{n\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}, \quad E_2 = E_{02} \sin \frac{n\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b}.$$

Здесь $nE_{01}/a + mE_{02}/b = 0$, чтобы удовлетворялось уравнение $\nabla E = 0$. Тогда уравнение (1) переписывается в виде

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k^2 + \pi^2 \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} \right)$$

(n, m — целые числа и считаем $a > b$). Так как в случае распространения электромагнитных волн по волноводу $k^2 \geq 0$, то существует минимальная частота, равная $\omega_0 = \pi/a$. Для фазовой и групповой скоростей имеем следующие выражения:

$$v_\phi = \frac{\omega}{k} = c \left[1 + \frac{\pi^2}{k^2} \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} \right) \right]^{1/2},$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = c \left[1 + \frac{\pi^2}{k^2} \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} \right) \right]^{-1/2}.$$

Аналогичный результат получается и для поперечной магнитной моды ($H_z = 0$), однако граничная частота в этом случае выше. Легко заметить также, что $v_\phi v_g = c^2$.

3.23. Предположим, что внутри сверхпроводника вместо закона Ома ($\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$) справедливы уравнения Лондона для плотности тока \mathbf{J} :

$$c \operatorname{rot}(\lambda \mathbf{J}) = -\mathbf{B}, \quad \frac{\partial}{\partial t}(\lambda \mathbf{J}) = \mathbf{E}$$

(в гауссовой системе), λ мы считаем константой. В остальных уравнения Максвелла ($\epsilon = 1, \mu = 1$) и соответствующие граничные условия остаются неизменными. Рассмотрим бесконечную сверхпроводящую пластину толщиной $2d$ ($-d \leq z \leq d$), вне которой имеется постоянное магнитное поле, параллельное плоскости:

$$H_x = H_z = 0, \quad H_y = H_0$$

(одинаковые как для $z > d$, так и для $z < -d$), и $\mathbf{E} = \mathbf{D} = 0$ везде. Вычислить \mathbf{H} и \mathbf{J} внутри пластины, если поверхностных токов и зарядов нет.

Решение:

Плотность тока \mathbf{J} постоянна во времени, поскольку $\mathbf{E} = 0$ везде. Так как пластина бесконечная, \mathbf{H} и \mathbf{J} могут зависеть только от z . Из уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{4\pi \mathbf{J}}{c}$$

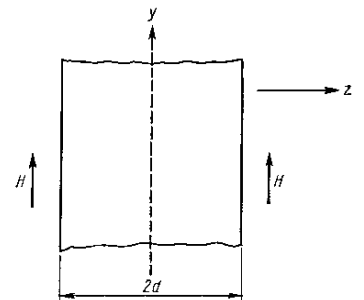
получим

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{4\pi \mathbf{B}}{\lambda} c^2 = 0$$

(Здесь мы использовали соотношение $\operatorname{rot} \operatorname{rot} = \operatorname{grad} \operatorname{div} - \nabla^2$.) Запишем решение, удовлетворяющее граничному условию $\mathbf{B}(\pm d) = \mathbf{H}_0$:

$$\mathbf{B}(z) = \mathbf{H}_0 \frac{e^{kz} + e^{-kz}}{e^{kd} + e^{-kd}} = \mathbf{H}_0 \frac{\operatorname{ch} kz}{\operatorname{ch} kd},$$

где $k^2 = 4\pi/\lambda c^2$. Плотность тока определяется из уравнения



$$\frac{4\pi\mathbf{J}}{c} = \text{rot}\mathbf{B} = -\hat{x}\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial z} = -\hat{x}kH\frac{\text{ch}kz}{\text{ch}kd}.$$

Поле \mathbf{H} обусловлено лишь внешними токами и, следовательно, $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0$ везде. Здесь нет противоречия, поскольку $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}$, где \mathbf{M} – магнитный момент единицы объема, который должен удовлетворять уравнению $c[\nabla\mathbf{M}] = \mathbf{J}$. Это легко проверить, поскольку $[\nabla\mathbf{H}] = 0$:

$$[\nabla\mathbf{M}] = \frac{1}{4\pi}[\nabla\mathbf{B}] = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{4\pi\mathbf{J}}{c} = \frac{\mathbf{J}}{c}$$

и все согласуется. Легко видеть, что \mathbf{B} ограничено поверхностным слоем глубиной $1/k$ и, следовательно, сверхпроводник «выталкивает» поле.

Промежуточный контроль по результатам семестров по дисциплине проходит в форме **экзамена** (включает в себя ответ на теоретические вопросы и задачи).

Примерный перечень вопросов для проведения промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины «Электродинамика».

1. Заряд в электромагнитном поле.
2. Потенциал поля.
3. Уравнение движения заряда.
4. Постоянное электромагнитное поле.
5. Движение заряда в электромагнитном поле.
6. Тензор и инварианты электромагнитного поля.
7. Уравнения электромагнитного поля.
8. Уравнения Максвелла.
9. Уравнение непрерывности.
10. Плотность и поток энергии.
11. Плотность и поток импульса.
12. Постоянное электромагнитное поле.
13. Закон Кулона.
14. Энергия зарядов.
15. Поле движущегося заряда.
16. Дипольный момент.
17. Система зарядов.
18. Постоянное электромагнитное поле.
19. Магнитный момент.
20. Электромагнитные волны.
21. Волновое уравнения.
22. Плоские волны.
23. Эффект Доплера.
24. Поляризованный свет.
25. Геометрическая оптика.
26. Колебания поля.
27. Излучение электромагнитных волн.
28. Запаздывающие потенциалы.
29. Поле системы зарядов.
30. Дипольное излучение.
31. Излучение движущегося заряда.
32. Торможение излучением.
33. Рассеяние системой зарядов.

Фонды оценочных средств, включающие типовые задания, контрольные работы, тесты и методы контроля, позволяющие оценить результаты обучения по данной дисциплине, перечислены в Приложении.

8 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Таблица 8.1. Обеспечение дисциплины основной и дополнительной литературой

№ п/п	Автор	Название	Место издания	Наименование издательства	Год издания	Количество экземпляров
Основная литература						
1	Ландау, Л.Д.	Теоретическая физика: в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - изд. 6-е, стереотип. - Москва : Т.2: Теория поля.	Москва	Физматлит.	2008	[Электронный ресурс] library.mephi.ru
2	Ландау, Л.Д.	Теоретическая физика: в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - изд. 6-е, стереотип. - Москва : Т.8: Электродинамика сплошных сред.	Москва	Физматлит.	2008	[Электронный ресурс] library.mephi.ru
3	Ремизович, В.С.	Общие принципы классической электродинамики	Москва	НИЯУ МИФИ	2008	[Электронный ресурс] library.mephi.ru
Дополнительная литература						
4	Калашников, Н.П. [Батыгин, В.В. и др.]	Руководство по решению задач по физике: Электричество и магнетизм	Москва	НИЯУ МИФИ	2014	[Электронный ресурс] library.mephi.ru
	[Батыгин, В.В. и др.]	Современная электродинамика. Ч.1: Микроскопическая теория	Москва, Ижевск	Институт компьютерных исследований.	2003.	library.mephi.ru

8.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Перечень рекомендуемых Интернет сайтов:

1. library.mephi.ru/ (Электронно-библиотечная система НИЯУ МИФИ)
2. lanbook.com/ebs.php (Электронно-библиотечная система издательства «Лань»)
3. <https://urait.ru/> (Образовательная платформа Юрайт)
4. <https://www.studentlibrary.ru/> (Электронная библиотечная система "Консультант студента")
5. <http://www.knigafund.ru/> Электронно-библиотечная система «КнигаФонд»
6. window.edu.ru/ Единое окно доступа к образовательным ресурсам .Федеральный портал. Федеральный центр ЭОР .
7. <ftp://elib.diti-mephi.ru> Электронно-библиотечная система ДИТИ НИЯУ МИФИ

Таблица 8.2 – Рекомендуемые электронно-библиотечные системы

№	Наименование ресурса	Тематика
1	Электронно-библиотечная система НИЯУ МИФИ	
2	Электронно-библиотечная система ДИТИ НИЯУ МИФИ	
3	Научная электронная библиотека http://elibrary.ru	Электродинамика, физика
4	Электронная библиотечная система издательства Лань, www.e.lanbook.com .	
5	Фонд электронно-библиотечной системы образовательных и просветительских изданий Iqlib, www.Iqlib.ru .	
6	Образовательная платформа «Юрайт», https://urait.ru/	
7	Электронное периодическое издание «KnigaFund.Ru»,	

	http://www.knigafund.ru/books	
8	Znanium.com https://znanium.com/	
9	Scopus https://www.scopus.com/	
10	Национальная электронная библиотека http://rusneb.ru/	
11	Russian Science Citation Index (RSCI) - Мультидисциплинарная база с большей представленностью изданий по наиболее актуальным для российской науки предметным областям clarivate.ru	
12	Единое окно доступа к образовательным ресурсам // http://window.edu.ru/	
13	Oxford University Press (полнотекстовая база данных журналов издательства Оксфордского университета) http://archive.neicon.ru/	

8.3 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

Таблица 8.3 – Перечень лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения

№	Наименование	Краткое описание
1	MS Office (Word, Excel, Power Point)	оформление текста, расчет, создание презентаций
2	https://docs.google.com/ Документы, Таблицы, Формы, Презентации	оформление текста, расчет, создание презентаций
3	ONLYOFFICE Desktop Editors - Свободный Офисный Пакет	оформление текста, расчет, создание презентаций
4	JPDF Viewer, Foxit Reader	просмотрщик PDF-файлов

Таблица 8.4 – Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

№	Наименование	Тематика	Электронный адрес
1	Гарант	правовая	https://www.garant.ru/
2	Консультант	правовая	https://www.consultant.ru/
3	Консорциум «Кодекс»	электронный фонд правовых и нормативно-технических документов	https://docs.cntd.ru/

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование помещений для проведения всех видов учебной деятельности, предусмотренной учебным планом, в том числе помещения для самостоятельной работы, с указанием перечня основного оборудования, учебно наглядных пособий и используемого программного обеспечения	Адрес (местоположение) помещений для проведения всех видов учебной деятельности, предусмотренной учебным планом
1	Учебная аудитория для проведения занятий №104 посадочных мест — 18; площадь 52,10 кв.м.; специализированная мебель: Учебная доска – 1 шт., стол студенческий – 10 шт., стол преподавательский – 1 шт., стенд лабораторный НТЦ-1» Электротехника и электроника» – 8 шт., стол компьютерный – 1 шт., стулья – 30 шт., шкаф двухстворчатый – 2 шт., тумба – 3 шт., сейф – 1 шт., наглядные образцы – 25 шт. Технические средства обучения: Компьютеры (монитор, системный блок, клавиатура, мышка) – 1 шт., проектор – 1 шт., экран – 1 шт. Комплекс лабораторный электроизмерительный – 4 шт., стенд лабораторный НТЦ-12 "Основы автоматизации и вычислительной техники" – 3 шт., портативный осциллограф DSO1062B – 1 шт. программное обеспечение: ОС Windows 7, Microsoft Office 10	433511, Ульяновская область, г. Димитровград, ул.Куйбышева, д.294.

10 ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИНВАЛИДОВ И ЛИЦ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ

Обучение инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется в соответствии с:

– Конституцией Российской Федерации. Принята всенародным голосованием 12.12.1993 с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020 – ст. 43 – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/ ;

– Федеральным законом «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 №273-ФЗ (ред. от 17.02.2021), ст. 5, 71, 79 – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ ;

– Федеральным законом от 24.11.1995 №181-ФЗ (ред. от 07.03.2017) «О социальной защите инвалидов в Российской Федерации» – Глава III. Ст. 9. ,Ст. 11. Глава IV. Ст. 1 – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8559/ ;

– Федеральным законом «О ратификации Конвенции о правах инвалидов» от 03.05.2012 №46-ФЗ – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129200/ ;

– Порядком организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам – программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры (Приказ Минобрнауки РФ от 05.04.2017 № 301);

– Положением об организации обучения студентов-инвалидов и студентов с ограниченными возможностями здоровья в НИЯУ МИФИ, утвержденным 29.08.2017 г. https://mephi.ru/content/public/uploads/files/education/docs/pl_7.5-15_ver_2.2_0.pdf ;

– Методическими рекомендациями по организации образовательного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в образовательных организациях высшего образования, в том числе оснащённости образовательного процесса (приложение к письму Минобрнауки от 16 апреля 2014 г. №05-785) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_159405/73804ce294dfe53d86ae9d22b5afde310dc506f7/ ;

– Требованиями к организации образовательного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в профессиональных образовательных организациях, в том числе оснащённости образовательного процесса» (приложение к письму Минобрнауки от 18 марта 2014 г. №06-281) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_57872/7d7f56523837be788b6cfa5578482a6b178918d3/ .

**Дополнения и изменения в рабочей программе
дисциплины на 20__/20__ уч.г.**

Внесенные изменения на 20__/20__ учебный год

В рабочую программу вносятся следующие изменения или делается отметка о нецелесообразности внесения каких-либо изменений на данный учебный год:

Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры

(дата, номер протокола заседания кафедры, подпись зав. кафедрой).

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой

наименование кафедры личная подпись расшифровка подписи дата

Руководитель ООП,
ученая степень, должность

личная подпись расшифровка подписи дата