

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

УТВЕРЖДАЮ



Директор филиала МГУ в г. Сарове
член-корреспондент РАН В.В.Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЧКОВ И
ИМПУЛЬСОВ

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Лазерная нелинейная оптика и фотоника

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

К.ф.-м.н., доцент Шленов Святослав Александрович, кафедра общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Математическое моделирование распространения пучков и импульсов»

В курсе рассматриваются математические модели распространения оптических пучков и импульсов, обсуждаются используемые приближения, изучаются численные методы решения дифференциальных уравнений. Рассматриваются системы обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнение переноса, волновое уравнение, квазиоптическое приближение дифракции пучков и дисперсии импульсов, нелинейное уравнение Шредингера. Для каждого из типов уравнений излагаются наиболее эффективные численные процедуры. Проводится анализ устойчивости расчетных схем, получены их спектральные характеристики, исследованы сеточные дисперсия и диффузия. Примеры использования численных схем сопровождаются анализом возможных погрешностей и условий их возникновения. Обсуждаются математические модели филаментации фемтосекундных импульсов, распространения пучков в случайно-неоднородных средах. Излагаются методы генерации случайных полей с заданной автокорреляционной функцией. Описаны теоретические основы и рекомендации по практическому применению преобразования Фурье для функций дискретного аргумента.

Разделы рабочей программы

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

В результате освоения дисциплины «Математическое моделирование распространения пучков и импульсов» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач. Дисциплина читается во 2 семестре и относится к вариативной части программы.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн». Владение языком программирования, знакомство с одной из программ (библиотекой) научной графики.

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1)	<p>Знать основные законы и направления современных научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь на основе фундаментальных знаний в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>Владеть необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2)	<p>Знать базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь используя знания в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники проводить научные исследования.</p> <p>Владеть навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>

<p>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники (СПК-3).</p>	<p>Знать основные направления инновационного развития в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p> <p>Уметь проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>Владеть методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области лазерной физики, нелинейной оптики и фотоники.</p>
---	---

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Дискретное преобразование Фурье.

1.1 Введение. Место математического моделирования в исследованиях распространения пучков и импульсов. Дискретность и конечность области определения. 1.2. Функция дискретного аргумента. Ряд и интеграл Фурье. Расчетная сетка. Гребневая функция Дирака. Спектр функции дискретного аргумента. Частота Найквиста. Восстановление оригинала по спектру функции дискретного аргумента. Теорема Котельникова-Шеннона. Осцилляции Гиббса. Взаимосвязь функции и спектра при дискретизации. Вычисление производных с использованием спектров. 1.3. Дискретное преобразование Фурье. Анализ Фурье. Ортогональность гармоник в дискретном пространстве. Обратное преобразование Фурье. Свойства дискретного преобразования Фурье. Формулы смещения и свертки. Практика дискретного преобразования Фурье. 1.5. Быстрое преобразование Фурье (БПФ). Алгоритм БПФ. Оценка эффективности. 1.6 Интерполяция сеточной функции, спектральный подход. Спектральный анализ с высоким частотным разрешением. 1.7 Компьютерные библиотеки ДПФ.

Тема 2. Интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений.

2.1 Основы разностной аппроксимации. Аппроксимация дифференциальных операторов. Спектральный анализ погрешности аппроксимации. Длинноволновое приближение. 2.2. Задача Коши. Метод Эйлера. Характеристики численных методов решения ОДУ. Устойчивость схемы Эйлера. Анализ устойчивости численного метода для системы ОДУ. 2.3. Схемы второго порядка точности. Двухслойный метод с перешагиванием. Явный двухшаговый метод. Схема “предиктор -корректор”. Неявный метод. Самостартующий алгоритм Верле. Обратимость во времени. Методы Рунге-Кутты. Экстраполяционный и интерполяционный методы Адамса. 2.4. Краевые задачи. Метод стрельбы. Метод прогонки.

Тема 3. Уравнение переноса.

3.1. Методы первого порядка точности. Схема бегущего счета. Спектральный анализ устойчивости. Дисперсия и диффузия на сетке. Природа сеточной дисперсии. Неявная схема бегущего счета. Схема Лакса. 3.2 Методы второго порядка точности. Явно-неявная

двуслойная схема. Трехслойная схема с перешагиванием. Алгоритм Лакса-Вендроффа. 3.3. Квазилинейные уравнения переноса. Разрывные решения и псевдовязкость. Консервативные схемы.

Тема 4. Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ).

4.1 Физические задачи распространения оптического излучения, приводящие к уравнению типа НУШ. Параболическое уравнение в теории дифракции. Дифракция волнового пучка в нелинейной среде. Второе приближение теории дисперсии. Самомодуляция импульса в среде с кубической нелинейностью. Безразмерные переменные. Тестовые задачи линейной дифракции пучка. Законы сохранения. 4.2. Разностные схемы решения линейного уравнения дифракции пучка. Явная схема первого порядка точности. Трёхслойная схема с перешагиванием. Простейшая неявная схема. Схема Кранка Николсона. Неявно-явные схемы. 4.3. Спектральный метод в задачах дифракции пучков. Преобразование Фурье для светового поля. Уравнение для Фурье-гармоник. 4.4. Численные методы для решения НУШ. Явная трехслойная схема с перешагиванием. Полностью неявная схема. Схема Кранка-Николсона. Явно-неявная схема. Метод расщепления по физическим факторам. Разностная аппроксимация в нелинейной задаче. Выбор шага расщепления. 4.5 Сравнение эффективности различных численных схем для НУШ.

Тема 5. Математические модели филаментации фемтосекундных импульсов.

Метод медленно меняющейся амплитуды для широкополосного излучения. Приближение медленно меняющейся волны. Поляризация среды. Спектральное описание дисперсии. Ионизация среды. Проблемы численного решения задачи. Аксиально-симметричное приближение. Вихревые пучки. Инерционность нелинейного отклика. Резонанс оператора волновой нестационарности. Частотно-угловой спектр излучения. Вычислительная сложность модели. Схемы распараллеливания для численного решения задачи филаментации в редуцированной 3D+1 модели на суперкомпьютерных комплексах. Уравнение однонаправленного распространения импульсов.

Тема 6. Волновое уравнение.

Численные схемы решения волнового уравнения. Схема типа “крест”. Аппроксимация граничных условий. Устойчивость. Неявная схема с весами. Схема Кранка-Николсона. Метод конечных разностей во временной области (FD-TD) для решения системы уравнений Максвелла. Закон электромагнитной индукции на ячейке сетки. Закон Ампера на ячейке сетки. Ячейки электрического и магнитного полей. Условие устойчивости. Поглощающие граничные условия и идеально согласованные слои (PML).

Тема 7. Статистическое моделирование распространения оптических пучков в случайно-неоднородных средах.

7.1. Метод Монте-Карло. Общая схема метода в корпускулярной модели. Текущее среднее. 7.2 Последовательности псевдослучайных чисел. Базовая последовательность равномерно распределенных чисел. Анализ качества псевдослучайных чисел. Получение равномерно распределенных чисел в заданном интервале. Псевдослучайные числа с нормальным распределением. 7.3 Моделирование распространения лазерных пучков на атмосферных трассах. Модель развитой атмосферной турбулентности. Флуктуации температуры и показателя преломления. Структурная функция. Спектральное разложение структурной функции. Связь трехмерного и одномерного спектров. Модели Колмогорова, Кармана и Татарского. 7.4 Метод Монте Карло в атмосферной оптике. Волновой подход. Модель фазовых экранов. Спектры и корреляционные функции флуктуаций фазы на экране. 7.5 Генерация случайных фазовых экранов. Ансамбли коррелированных псевдослучайных чисел. Метод скользящего суммирования. Спектральный метод. Характеризация оптической турбулентности на трассе. Индекс мерцания и радиус Фрида. Проблема пространственных

масштабов атмосферной турбулентности. Модифицированный спектральный метод. Субгармоники.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Математическое моделирование распространения пучков и импульсов	2	72	34	17	17	38

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Математическое моделирование распространения пучков и импульсов» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям, выполнении домашних заданий, решении расчетно-графических задач. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно- практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Дискретное преобразование Фурье.	12	3	-	3	6	Собеседование,

2	Интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений	12	3	-	3	6	опрос, расчетно-графическое задание
3	Уравнение переноса	10	2	-	2	6	
4	Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ)	8	2	-	2	6	
5	Математические модели филаментации фемтосекундных импульсов	8	2	-	2	3	Собеседование, опрос
6	Волновое уравнение	8	2	-	2	4	
7	Статистическое моделирование распространения оптических пучков в случайно-неоднородных средах	10	3	-	3	3	
	Промежуточная аттестация	4				4	Зачет в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Математическое моделирование распространения пучков и импульсов» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. При изучении ряда тем студенты выполняют расчетно-графические задания.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Математическое моделирование распространения пучков и импульсов» проводится в форме зачета.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Расчетно-графическое задание (РГЗ)	Средство контроля, организованное как самостоятельное выполнение студентами численного решения математической задачи и/или вывод уравнений из определенного раздела изучаемой темы с графическим представлением полученных результатов.	Перечень примерных РГЗ по темам, изучаемых в рамках дисциплины
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины

	качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: принципы математического моделирования распространения оптических пучков и импульсов ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний принципов математического моделирования распространения оптических пучков и импульсов	В целом успешные, но не систематические знания принципов математического моделирования распространения оптических пучков и импульсов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания принципов математического моделирования распространения оптических пучков и импульсов	Успешные и систематические знания принципов математического моделирования распространения оптических пучков и импульсов
УМЕТЬ: анализировать свойства численных схем для решения дифференциальных уравнений ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения анализировать свойства численных схем для решения дифференциальных уравнений	В целом успешное, но не систематическое умение анализировать свойства численных схем для решения дифференциальных уравнений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение анализировать свойства численных схем для решения дифференциальных уравнений	Успешное и систематическое умение анализировать свойства численных схем для решения дифференциальных уравнений
ВЛАДЕТЬ: численными методами математического	Отсутствие/фрагментарное владение численными методами математического	В целом успешное, но не систематическое владение	В целом успешное, но содержащее отдельные	Успешное и систематическое владение численными

го моделирования распространения пучков и импульсов ОПК-3.Б В-6	моделирования распространения пучков и импульсов	ние численными методами математического моделирования распространения пучков и импульсов	пробелы владение численными методами математического моделирования распространения пучков и импульсов	методами математического моделирования распространения пучков и импульсов
--	--	--	---	---

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Примеры вопросов для опроса:

1. Чему равна частота Найквиста?
2. Сформулируйте теорему Котельникова-Шеннона?
3. Какой спектр имеет сеточная (дискретная) функция?
4. Чем определяется (чему равно) спектральное разрешение сетки?
5. Пусть u_j значение функции $u(x)$ в j -ом узле сетки с шагом dx . Запишите выражение для второй производной по схеме центральной разности.
6. Какова устойчивость схемы Эйлера для решения ОДУ осцилляторного типа?
7. Какова дисперсия и диффузия в схеме бегущего счёта по характеристикам для уравнения переноса?
8. Какова устойчивость неявной схемы для уравнения переноса?
9. Что такое двуцикличная схема расщепления для НУШ?
10. Что такое и для чего нужны субгармоники в модифицированном спектральном методе построения случайных полей?

Примеры расчётно-графических заданий:

1. Выполните дискретное комплексное преобразование Фурье: используя одну из библиотечных программ БПФ для 4-х действительных отсчётов $u(0) = \text{код}(\Phi)$, $u(1) = \text{код}(\text{И})$, $u(2) = \text{код}(\text{О})$, $u(3) = 50$, где код(Φ), код(И) и код(О) – коды первых букв ваших, соответственно, фамилии, имени и отчества, взятые из прилагаемой таблицы кодов букв. Используя полученные гармоники, выполните обратное преобразование Фурье. Представьте полученные результаты графически.

2. Численно решите следующую задачу Коши:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u}{dt^2} + u = 0 \\ u(t=0) = u_0, \dot{u}(t=0) = v_0 \end{cases}$$

на отрезке $t = [0, 20]$ для $v_0 = 0$ и u_0 , вычисляемого в соответствии с прилагаемой таблицей. Используйте двухслойную схему с перешагиваем. Рассмотрите три варианта шага интегрирования: 1) на границе устойчивости схемы; 2) шаг в два раза меньше предыдущего; 3) шаг в 5 раз меньше границы устойчивости. Для расчета значений функций в следующем за начальным узлом сетки используйте: 1) точное решение; 2) один шаг по схеме Эйлера; 3) схему Эйлера с шагом в 2 раза меньше шага основной сетки. Постройте графики численных

решений совместно с графиком точного аналитического решения задачи (шкалы на осях обязательны). Постройте графики локальной ошибки для рассмотренных шагов интегрирования и одном из вариантов вычисления начального условия для 1-го узла.

3. Для неявной схемы численного решения уравнения переноса

$$u_j^{n+1} = \frac{u_j^n + \alpha u_{j-1}^{n+1}}{1 + \alpha} \quad \alpha = \frac{v\Delta t}{\Delta x}$$

получите дисперсионное уравнение $\frac{\Omega\Delta t}{\pi}$ в зависимости от $\frac{2\Delta x}{\lambda} = \frac{\lambda_N}{\lambda}$. Постройте дисперсионные кривые при параметре $\alpha=1,5; 1,2; 1,0; 0,8; 0,5; 0,1$.

4. Для схемы Лакса численного решения уравнения переноса

$$u_j^{n+1} = \frac{1}{2}(1 + \alpha)u_{j-1}^n + \frac{1}{2}(1 - \alpha)u_{j+1}^n$$

выведите уравнения для дисперсии и диффузии схемы. Постройте кривые дисперсии и затухания при $\alpha= 1,0; 0,8; 0,5; 0,1$.

5. Для явно-неявной схемы численного решения уравнения переноса

$$(1 + \alpha)u_j^{n+1} = (\alpha - 1)u_{j-1}^{n+1} + (1 - \alpha)u_j^n + (1 + \alpha)u_{j-1}^n, \quad \alpha = \frac{v\Delta t}{\Delta x}$$

получите дисперсионное уравнение $\frac{\Omega\Delta t}{\pi}$ в зависимости от $\frac{2\Delta x}{\lambda} = \frac{\lambda_N}{\lambda}$. Постройте дисперсионные кривые при параметре $\alpha=1,5; 1,2; 1,0; 0,8; 0,5; 0,1$.

6. Для трехслойной схемы с перешагиванием численного решения уравнения переноса

$$u_j^{n+1} = u_j^{n-1} - \alpha(u_{j+1}^n - u_{j-1}^n), \quad \alpha = \frac{v\Delta t}{\Delta x}$$

выведите уравнения для дисперсии и диффузии схемы. Постройте кривые дисперсии и затухания при $\alpha= 1,0; 0,8; 0,5; 0,1$.

7. Численно решите параболическое уравнение дифракции щелевого пучка с комплексной амплитудой E :

$$2i \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

на отрезке $x = [-5, 5]$ с граничными условиями $E(-5) = E(5) = 0$ и интервале $z = [0, 1]$ с начальными условиями:

$$E(x, z = 0) = E_0 e^{-x^2/2}$$

Используйте схему Кранка-Николсона:

$$2i \frac{E_j^{n+1} - E_j^n}{\Delta z} = \frac{1}{2} \frac{E_{j+1}^{n+1} - 2E_j^{n+1} + E_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \frac{E_{j+1}^n - 2E_j^n + E_{j-1}^n}{\Delta x^2}$$

и метод прогонки, при этом может быть использована только одна библиотечная функция – для вычисления экспоненты. Рассмотрите два варианта выбора шагов интегрирования Δx по x и Δz по z : 1) $\Delta x = 0,1, \Delta z = 0,01$; 2) $\Delta x = 0,1, \Delta z = 0,1$. Для каждого набора шагов интегрирования постройте графики $E \cdot E^*(x)$ для пяти расстояний $z = 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1$.

8. Получите условие устойчивости для явной

$$2i \frac{E_j^{n+1} - E_j^n}{\Delta z} = \frac{E_{j+1}^n - 2E_j^n + E_{j-1}^n}{\Delta x^2}$$

и неявной

$$2i \frac{E_j^{n+1} - E_j^n}{\Delta z} = \frac{E_{j+1}^{n+1} - 2E_j^{n+1} + E_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

схем численного решения параболического уравнения дифракции:

$$2i \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$$

Постройте графики сеточной дисперсии и диффузии для явной и неявной схем для значений

$$\alpha \equiv \frac{\Delta z}{\Delta x^2} = 0.1; 0.5; 1.0; 2.0$$

На графиках сеточной дисперсии приведите для сравнения дисперсию, описываемую дифференциальным уравнением.

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

1. Спектр сеточной функции. Частота Найквиста.
2. Теорема Котельникова-Шеннона. Осцилляции Гиббса.
3. Взаимосвязь функции и спектра при дискретизации аргументов.
4. Выбор шага дискретизации, области периодизации функции, частотное разрешение при ДПФ.
5. Спектральный анализ погрешности аппроксимации производных конечными разностями. Длинноволновое приближение.
6. Метод Эйлера в задаче Коши. Анализ устойчивости.
7. Двухслойная схема с перешагиванием в задаче Коши. Устойчивость схемы.
8. Неявный метод второго порядка точности в задаче Коши. Анализ устойчивости.
9. Метод Рунге-Кутты четвертого порядка в задаче Коши.
10. Краевая задача. Метод прогонки для трехдиагональной системы уравнений.
11. Спектральный анализ устойчивости алгоритмов численного решения уравнений в частных производных. Дисперсия и диффузия на сетке.
12. Связь дисперсии и диффузии с множителем перехода.
13. Схема бегущего счета для уравнения переноса. Погрешность аппроксимации. Устойчивость. Дисперсия и диффузия на сетке.
14. Трехслойная схема с перешагиванием для уравнения переноса. Алгоритм Лакса-Вендроффа.
15. Схема типа "крест" для волнового уравнения. Схема Кранка –Николсона. Граничные условия. Условие устойчивости и его физическая интерпретация.
16. Двухслойная акустическая схема (Leapfrog). Погрешность аппроксимации. Устойчивость.
17. Неявная схема с весами для решения волнового уравнения. Условие устойчивости.
18. Разностные схемы решения линейного уравнения дифракции пучков. Сеточная дисперсия и диффузия. Схема Кранка-Николсона.
19. Спектральный метод в задачах дифракции пучков. Законы сохранения для НУШ.
20. Численные методы решения НУШ. Метод расщепления по физическим факторам. Двухциклическая схема расщепления.

21. Математическая модель филаментации фемтосекундных импульсов. Основные уравнения. Оператор волновой нестационарности.
22. Схемы распараллеливания в редуцированной модели филаментации.
23. “Телеграфные уравнения” для электрической и магнитной напряженностей в одномерной задаче распространения линейно поляризованного поля. Схема перешагивания и ее устойчивость.
24. Схема с перешагиванием в методе FD-TD. Сетки электрического и магнитного полей.
25. Дифференциальная, интегральная и конечно-разностная формулировка закона электромагнитной индукции на ячейке сетки в методе FD-TD.
26. Дифференциальная, интегральная и конечно-разностная формулировка теоремы о циркуляции магнитной напряженности на ячейке сетки в методе FD-TD.
27. Схема метода Монте-Карло для волновой модели распространения излучения.
28. Получение последовательностей псевдослучайных чисел с равномерным и нормальным распределениями.
29. Метод скользящего суммирования и спектральный метод для построения коррелированных последовательностей псевдослучайных чисел.
30. Модифицированный спектральный метод в задачах генерации фазовых экранов с атмосферной турбулентностью. Субгармоники.

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

1. Д. Поттер. Вычислительные методы в физике. - М.: Мир, 1975.
2. Н.Н. Калиткин, П.В. Корякин. Численные методы: Кн. 2. Методы математической физики. - М.: Издательский центр «Академия», 2013.
3. В.П. Кандидов, С.С. Чесноков, С.А. Шленов. Дискретное преобразование Фурье. – М.: Отдел оперативной печати физического факультета МГУ, 2019.

Дополнительная литература.

1. А.А. Самарский. Введение в численные методы. - М.: Наука, 1982.
2. В.П. Кандидов, С.А. Шленов. Явление филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов и его практические приложения // в сб: Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе (Под ред. В Я Панченко) (М.: Интерконтакт Наука, 2009) с. 185
3. С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. Введение в статистическую радиофизику, ч.2, - М.: Наука, 1978.
4. В.П. Кандидов. Метод Монте-Карло в нелинейной статистической оптике. // УФН, т. 166, № 12, с.1309 (1996).
5. С. А. Шленов, В.П. Кандидов. Формирование пучка филаментов при распространении фемтосекундного лазерного импульса в турбулентной атмосфере. Часть 1. Метод. // *Оптика атмосферы и океана*, т. 17, №8, с. 630 (2004).

Интернет-ресурсы.

1. <https://istina.msu.ru/publications/book/260554237/>
2. <http://www.mathnet.ru/links/d36b0efd812c3220cf79763105e398ec/ufn1271.pdf>

3. <https://istina.msu.ru/media/publications/article/275/604/1314129/BOOK.pdf>
4. <https://istina.msu.ru/publications/article/359112965/>

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором и управляющим компьютером. Также необходимо наличие экрана и обычной учебной доски.