Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Факультет вычислительной математики и кибернетики

**УТВЕРЖДАЮ**

декан факультета вычислительной математики и кибернетики

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/И.А. Соколов /**

**«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_20\_\_\_г.**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**

**Физика волновых процессов**

**Уровень высшего образования:**

**бакалавриат**

**Направление подготовки / специальность:**

**01.03.02 «Прикладная математика и информатика» (3++)**

**Направленность (профиль):**

**Математические и компьютерные методы решения задач естествознания**

**Форма обучения:**

**очная**

**Москва 2023**

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 01.03.02, 01.04.02 "Прикладная математика и информатика" программы бакалавриата Утвержден приказом МГУ от 30 августа 2019 года № 1041 (в редакции приказов МГУ от 11 сентября 2019 года № 1109, от 10 июня 2021 года № 609, от 7 октября 2021 года № 1048, от 21 декабря 2021 года № 1404, от 2 ноября 2022 года № 1299)

**1.** Дисциплина относится к вариативной части ОПОП ВО

**2.** Входные требования для освоения дисциплины (модуля): учащиеся должны владеть знаниями пофизике, математической физике и численным методам в объеме, соответствующем программе третьего года обучения основных образовательных программ бакалавриата по укрупненным группам направлений и специальностей 01.00.00 «Математика и механика», 02.00.00 «Компьютерные и информационные науки»

**3.** Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников*.*

Компетенции выпускников, частично формируемые при реализации дисциплины (модуля):

* **ОПК-1.Б** Способность самостоятельно исследовать волновые явления в оптике, акустике, информатике.
* **ОПК-2.Б** Способность применять и модифицировать математические модели в физике волновых явлений к конкретным задачам в области профессиональной деятельности
* **ПК-2.Б** Способность понимать и применять в научно-исследовательской деятельности аппарат теории волн и современные представления в физике волновых явлений.

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю):

**Знать:**

1. фундаментальные физические закономерности волновых явлений и математические уравнения их описывающие;
2. основные понятия и определения в физике волновых процессов;
3. основы теории и методы анализа распространения, отражения, дисперсии, интерференции и дифракцииэлектромагнитных и акустических волн;
4. связь физических закономерностей в волновых процессах с современными наукоемкими технологиями, природными явлениями, изменением климата Земли;
5. основы спектрального преобразования, спектральных методов анализа и теорему о ширине частотной полосы;
6. элементы Фурье – оптики и физические основы методов фильтрации сигналов, волновых пакетов, изображений; теорему о ширине частотной полосы;
7. основы дискретного преобразования Фурье; теорему отсчетов Котельникова-Шеннона;
8. влияние волновых явлений на скорость передачи информации в волоконно-оптических линиях связи;
9. связь волновых процессов с численными методами решения задач математической физики;
10. элементы физики лазеров, принципы генерации когерентного оптического излучения и его свойства.

**Уметь:**

1. извлекать полезную научно-техническую информацию из электронных библиотек научных журналов по оптике, акустике и лазерной физике;
2. анализировать и обрабатывать физическую информацию о волновых процессах при изучении их численными методами;
3. применять на практике теорию волн и методы решения волновых задач в области обработки изображений, сигналов, передачи информации;
4. формулировать задачи аналитического и численного исследования волновых процессов в реальных системах;
5. получать оценки параметров акустических и электромагнитных волн в природе и технике;
6. применять спектральные методы исследования волновых процессов в оптике, акустике и информатике;

**Владеть:**

1. основными методами физического анализа явлений распространения, отражения, преломления, дисперсии, интерференции и дифракции акустических и электромагнитных волн;
2. качественными и количественными методами анализа волновых процессов при исследовании конкретных физических задач;
3. методами построения математических моделей волновых процессов в оптике и акустике;
4. методами численного решения и интерпретации результатов в задачах распространения волн;
5. спектральными методами анализа, обработки и фильтрации сигналов и изображений;

**4.** Формат обучения: лекции проводятся с использованием меловой доски, физических и компьютерных демонстраций, семинарские занятия - в форме консультаций, коллоквиумы с представлением студентами отчетов по самостоятельному решению конкретных задач в области спектрального анализа, оптики, акустики, передачи информации и лазерной физики.

**5.** Объем дисциплины (модуля) составляет 3 з.е., в том числе 72 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

**6.** Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),**  **Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)** | **Всего**  **(часы**) | В том числе | | | |
| **Контактная работа  (работа во взаимодействии с преподавателем)**  **Виды контактной работы, часы** | | | **Самостоятельная работа обучающегося,**  **часы** |
| Занятия лекционного типа\* | Занятия семинарского типа\* | **Всего** |
| **1.**Понятие волны, определение волнового процесса, передача информации и энергии  волной.  **Описание волновых процессов.**  Формулировка задачи о распространении волны. Одномерное волновое уравнение; его факторизация.  Гармоническая волна, пространственный и временной масштабы волны.  Плоская, цилиндрическая и сферическая волны. Продольная и поперечная волны.  Физическая интерпретация условия устойчивостиразностных схем для волнового уравнения. | **7** | 3 | 0 | **3** | **4** |
| **2. Звуковые волны.**  Система гидродинамических уравнений, граничные условия.  Приближения линейной акустики, волновое уравнение, скорость звука. Потенциал скорости.  Звуковые волны на границе раздела сред; условия сопряжения. Импеданс среды. Коэффициенты отражения и прохождения.  Поток и объемная плотность акустической энергии.  Интенсивность звука. Шкала децибел. Численные оценки.  Основные математические модели нелинейных волн в акустике; уравнение простых волн, уравнение Бюргерса. Законы сохранения. | **6** | 3 | 1 | **4** | **2** |
| **3. Электромагнитные волны.**  Постановка задачи для идеального диэлектрика. Волновое уравнение. Скорость света.  Поперечность э/м волны в свободном пространстве.  Энергия э/м волны. Интенсивность.  Давление э/м волны.  Шкала э/м волн.  Оценки. Солнечная постоянная, климат Земли, "парниковый эффект", "ядерная зима" | **4** | 3 | 1 | **4** | **0** |
| **4. Электромагнитные волны на границе раздела сред. Поляризационные эффекты.**  Законы отражения и преломления.  Электро-механическая аналогия в теории волн.  Полное внутреннее отражение.  Земная рефракция. Радуга. Рефракция звука в океане.  Световоды. Волоконно-оптические линии связи. Скорость передачи информации. Световоды в медицине. | **8** | 3 | 0 | **3** | **5** |
| **5.Поляризация электромагнитных волн.** Линейная, эллиптическая, круговая поляризация.  Естественный свет.  Отражение и преломление поляризованных волн. Формулы Френеля.  Поляризационные эффекты на границе раздела. Угол Брюстера.  Распространение э/м волн в кристаллах. Двулучепреломление.  Оптическая активность и круговой дихроизм.  Принцип работы ЖК дисплеев | **7** | 3 | 0 | **3** | **4** |
| **6**. Текущий контроль успеваемости: защита задания № 1 | **1** | 0 | 1 | **1** | **0** |
| **7. Модулированные волны.**  Способы передачи информации волной.  Биения. Амплитудная модуляция Радиовещание.  Суперпозиция эквидистантных гармоник. Амплитуда квазигармонического сигнала.  Теорема о ширине частотной полосы.  **Спектральный анализ.**  Спектр периодического сигнала. Осцилляции Гиббса.  Спектр одиночного импульса, интеграл Фурье. Радиоимпульс. | **8** | 3 | 1 | **4** | **4** |
| **8**. **Спектральная плотность мощности.**  Связь формы импульса и ширины спектра 6.5.  Свойства преобразования Фурье (линейность, смещение, свертка).  **Дискретное преобразование Фурье.**  Функция дискретного аргумента и ее спектр. Периодизация спектра. Частота Найквиста. Наложение частот.  Формула Котельникова-Шеннона.  Формулы дискретного преобразования Фурье. Ортогональность гармоник.  Свойства ДПФ. Алгоритм БПФ.  Спектральная фильтрация. | **8** | 3 | 1 | **4** | **4** |
| **9**.Текущий контроль успеваемости: защита задания № 2 | **2** | 0 | 2 | **2** | **0** |
| **10. Дисперсия.**  Понятие дисперсии. Пространственная и временная дисперсия.  Первое приближение теории дисперсии; волновой пакет, групповая скорость.  Уравнение переноса для амплитуды волнового пакета. Бегущее время.  Нормальная и аномальная дисперсия. Формула Релея.  Второе приближение теории дисперсии. Параболическое уравнение для амплитуды. Дисперсия гауссового импульса. | **8** | 3 | 1 | **4** | **4** |
| **11. Пространственная дисперсия.**  Волны в цепочках. Полоса прозрачности, частота Найквиста.  Дисперсия разностной схемы для волнового уравнения. | **8** | 3 | 1 | **4** | **4** |
| **12. Временная дисперсия.**  Электронная теория дисперсии света.  Линии поглощения. Аномальная дисперсия.  Дисперсия в плазме. | **4** | 3 | 1 | **4** |  |
| **13. Интерференция волн**  Двулучевая интерференция.  Суперпозиция плоских волн. Ширина интерференционной полосы.  Интерференция волн от точеных источников.  Интерференция в тонких пленках. Просветление оптики, интерференционные фильтры.  Интерферометр Майкельсона. LIGO. Открытие гравитационных волн.  Стоячие волны. | **7** | 3 | 1 | **4** | **3** |
| **14.**Текущий контроль успеваемости: защита задания № 3 | **2** | 0 | 2 | **2** | **0** |
| **15. Когерентность.**  Условие возникновения интерференции. Интерференция квазимонохроматических волн.  Когерентность и видимость интерференционной картины. Степень когерентности.  Время и длина когерентности; ширина спектра.  Теорема Винера–Хинчина. Понятие о Фурье-спектроскопии. | **4** | 3 | 1 | **4** | **0** |
| **16.Многолучевая интерференция.**  Наложение волн от цепочки синфазных источников.  Антенные решетки. Управление диаграммой направленности. Астрофизические антенны.  Спектральные приборы. Эталон Фабри-Перо. | **4** | 3 | 1 | **4** | **0** |
| **17. Приближенная теория дифракции.**  Математическая формулировка задачи дифракции.  Интеграл Гельмгольца–Кирхгофа.  Условие излучения. Приближение Кирхгофа.  Оптическое приближение. Формула Френеля–Кирхгофа.  Принцип Гюйгенса–Френеля. Дифракция на отверстии. Зоны Френеля. Пятно Пуассона.  Дифракция Френеля. Параболическое уравнение дифракции. Гауссов пучок.  Эффект Тальбо. | **3** | 3 | 0 | **3** | **0** |
| **18. Дифракция плоских волн.**  Дифракция Фраунгофера. Угловой спектр.  Дифракция на щели. Дифракционная расходимость.  Пространственно-временная аналогия, частотный и пространственный спектры.  Ближняя, дальняя зоны дифракции, приближение геометрической оптики.  Дифракционная решетка. Разрешающая способность. | **4** | 3 | 1 | **4** | **0** |
| **19. Фурье-оптика**.  Линза как процессор Фурье. Оптическая фильтрация.  Понятие о голографии.  Корпускулярно-волновой дуализм.  Корпускулярный и волновой методы Монте-Карло в теории рассеяния. | **3** | 3 | 0 | **3** | **0** |
| **20.**  Текущий контроль успеваемости: защита задания № 4 | **2** | 0 | 2 | **2** | **0** |
| **21. Лазерное излучение.**  Излучение атома. Классическая модель Томсона. Атом Бора.  Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна.  Когерентное усиление, условие генерации. Обратная связь. Открытый резонатор. Принцип работы лазера. Свойства лазерного излучения.  Схема лазерных уровней. Накачка.  Типы лазеров; их характеристики. Применение лазеров.  Управляемый термоядерный синтез. Сверхсильные световые поля. Фемтосекундная оптика. | **3** | 3 | 0 | **3** | **0** |
| **22. Основные математические модели нелинейной волновой оптики.**  Взаимодействие волн в нелинейных диспергирующих средах. Условие синхронизма. Самовоздействие волн. Нелинейное уравнение Шредингера.  Законы сохранения и их роль в численном эксперименте.  Обзор основных численных методов в нелинейной волновой оптике. | **3** | 3 | 0 | **3** | **0** |
| Промежуточная аттестация в форме устного экзамена | **2** | 0 | 0 | **0** | **2** |
| **Итого** | **108** | **54** | **18** | **72** | **36** |

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

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

|  |  |
| --- | --- |
| **Задания для контроля самостоятельной работы № 1** | |
| **Типовой вариант 1** | **Типовой вариант 2** |
| Излучатель гидроакустического локатора имеет осесимметричную вытянутую диаграмму направленности угловой ширины θ = 15o Пренебрегая затуханием в воде, определить на расстоянии l = 3 км следующие параметры ультразвуковой волны: интенсивность I (Вт/см2 ) , амплитуду для смещений частиц воды a, скорости Vmax, ускорения (dV/dt )max, и амплитуду колебаний давления pmax. Мощность излучателя N = 30 Вт, частота f = 50 кГц. В пределах угловой ширины диаграмму направленности считать равномерной | Рубиновый лазер излучает гигантский световой импульс с длиной волны 0,69 мкм. Положим, что импульс представляет собой цуг (конечный отрезок) линейно-поляризованной плоской волны с постоянной амплитудой. Длительность цуга t = 0,1 с, энергия импульса W = 0,3 Дж, поперечное сечение пучка – круг с диметром D = 5 мм. Оценить объемную плотность энергии, переносимую импульсом (дифракционным расширением пучка пренебречь). Найти амплитуду электрического поля Е. Найти давление на экран, перпендикулярный пучку, рассмотрев три случая: (а) экран полностью поглощает, (б) экран полностью отражает, (в) коэффициент отражения экрана R = 0,9.. |
| **Задания для контроля самостоятельной работы № 2** | |
| **Типовой вариант 1** | **Типовой вариант 2** |
| Найти спектр сигнала, представляющего собой периодическую последовательность импульсов прямоугольной формы длительностью t и амплитуды a. Период следования импульсов T. Построить амплитудный спектр сигнала для значений его длительности t = 0,5T и t = 0,1T. Найти спектр одиночного прямоугольного импульса. | Оценить шаг дискретизации h и время регистрации T сигнала ξ(*t*)=*a* exp(-*t* 2 /τ02) для вычисления его спектра при помощи дискретного преобразования Фурье. Определить число точек при дискретизации. Оценить частоту Найквиста Nn. |
| **Задания для контроля самостоятельной работы № 3** | |
| **Типовой вариант 1** | **Типовой вариант 2** |
| При зондировании разреженной плазмы радиоволнами различных частот обнаружили, что для излучения с длиной волны, большей, чем λ0 = 0,75 м, возможно полное внутреннее отражение. Определить концентрацию свободных электронов в этой плазме, используя теорию дисперсии электромагнитных волн в плазме (ионосфере). | Интерферометр имеет две щели на расстоянии d. Одна щель закрыта прозрачной стеклянной пластинкой толщиной h = 1 мм, другая щель открыта. Показатель преломления стекла n = 1,5. Определите (в длинах волн) запаздывание света, проходящего через щель, прикрытую пластинкой (l = 500 нм). Сколь узкой должна быть спектральная полоса Δλ излучения квазимонохроматического источника, чтобы относительный сдвиг фаз световых волн, прошедших через щели не превышал π во всей полосе Δλ ? |
| **Задания для контроля самостоятельной работы № 4** | |
| **Типовой вариант 1** | **Типовой вариант 2** |
| Многолучевой радиоастрономический телескоп представляет  собой линейную цепочку из *N* = 32 приемников, находящихся на расстоянии *d* = 7 м друг от друга и работающих на длине волны l = 21 см. Найдите угловую ширину центрального максимума диаграммы направленности и угловое расстояние между главными соседними максимумами. Как надо изменить *N* или *d*, чтобы вдвое уменьшить ширину центрального максимума? | Найти условие равенства нулю интенсивности *n*-го главного  максимума для дифракции на решетке, представляющей периодическуюпоследовательность *N* одинаковых параллельных щелей (период *d*, ширинаодиночной щели *b*, *d > b*). Какой максимальный порядок главногомаксимума, который может наблюдаться при дифракции света с длинойволны λ= 500 нм на решетке с периодом *d* = 4 мкм? |

**Вопросы к коллоквиуму**.

1. Волновое уравнение и его решение в виде бегущей волны. Соотношения между параметрами волнового процесса (длина волны, волновое число, частота, период, фазовая скорость).

2. Акустические волны. Формула для скорости звука в воздухе и ее величина. Порог слышимости. Характерные значения силы звука в децибелах.

3. Шкала электромагнитных волн. Длины волн, соответствующие компонентам видимого спектра. Скорость света в вакууме и материальных средах.

4. Волновой механизм возникновения давления электромагнитных волн. Формула для давления света.

5. Законы отражения и преломления. Полное внутреннее отражение. Ход лучей в оптическом волокне.

6. Формулы преобразования Фурье. Дискретный и сплошной спектр Фурье. Свойства преобразования Фурье.

7. Теорема о ширине частотной полосы. Спектр уединенного прямоугольного импульса и периодической последовательности таких импульсов.

8. Формулы дискретного преобразования Фурье. Периодизация спектра. Частота Найквиста. Наложение частот.

9. Формула Котельникова–Шеннона.

10. Определение дисперсии. Групповая скорость. Первое и второе приближения теории дисперсии. Влияние дисперсии на скорость передачи информации в оптических линиях связи.

11. Пространственная дисперсия в цепочке. Дисперсия разностной схемы для волнового уравнения.

12. Определение понятия интерференции. Время и длина когерентности. Ширина полос для интерференции плоских волн.

13. Теорема Винера–Хинчина.

14. Угловое распределение интенсивности при многолучевой интерференции. Ширина максимума.

15. Определение явления дифракции. Смысл приближений Кирхгофа.

16. Метод зон Френеля в решении задач дифракции.

17. Эффект Тальбо.

18. Распределение интенсивности света при дифракции на щели. Дифракционная расходимость.

19. Определение размеров отверстий и расстояний для ближней и дальней зон дифракции и приближения геометрической оптики.

20. Принципиальная схема лазера. Свойства лазерного излучения.

**7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

|  |  |
| --- | --- |
| **Зачетная работа** | |
| **Вариант 1** | **Вариант 2** |
| 1.Круглый поршневой излучатель звука с диаметром *D* = 10 см  развивает мощность *N* = 0,2 Вт на частоте *f* = 600 Гц. Рассчитать  интенсивность звука в децибелах; амплитуду смещения, скорости,  ускорения частиц; амплитуду избыточного давления на расстоянии 2 см,рассматривая звуковую волну плоской, и на расстоянии 10 см, рассматриваяволну как сферическую.  Вариант 1. Излучатель находится в воздухе.  Вариант 2. Излучатель погружен в воду.  2.Сотовая связь в стандарте GSM-1800 работает на прием на частоте925 МГц. Антенна базовой станции представляет собой вертикальный наборсинфазных излучателей, общая длина которого *L* = 4,5 м. Мощность,подводимая к антенне, *P* = 5 Вт. Рассчитать максимальное расстояние, накотором возможен прием сообщений по сотовому телефону, если егочувствительность, то есть минимальная принимаемая интенсивность,составляет 10-14 Вт/см2. Определить напряженность электрического имагнитного полей у антенны телефона для этого расстояния и у антенныбазовой станции. Рассчитать, насколько сокращается дальность приема в  следующих условиях:  1) телефон плотно прижат к уху абонента, и его чувствительность падает на2 дБ из-за экранирования головой абонента,  2) телефона находится в автомобиле, где чувствительность падает на 6 дБиз-за экранировки кузовом,  3) телефон находится в здании, где чувствительность падает на 9 дБ. | 1. Телеметрическая информация со спутника передается на наземнуюстанцию в виде последовательности радиоимпульсов. Для временногоразделения импульсов приемными устройствами период их следования *T*должен быть вдвое больше длительности t(*l*) в месте приема. Оценитьмаксимальную скорость передачи информации (в бит/с), учитываядисперсионное расплывание импульсов в ионосфере, если приемникнаходится на расстоянии *l* от спутника. Принять, что на всей длине линиясвязи находится в однородной ионосфере с известным значениемплазменной частоты *f*пл. Для оценки использовать значения групповойскорости на границах спектра импульса.  Рассмотреть следующие варианты:  Вариант (а)  Длина канала связи *l* = 600 км. Канал работает на длине волны λ= 3 м.Длительность импульса передатчика t(0) = 3 мкс. Плазменная частотаионосферы *f*пл = 30 МГц.  Вариант (б)  Длина канала связи *l* = 1000 км. Несущая частота радиоимпульсов  *f*0 = 3 МГц. Длительность импульса передатчика t(0) = 50 мкс. Плазменнаячастота ионосферы *f*пл = 2,6 МГц/  2. Плоская гармоническая волна с длиной волны λ падает нормальнона решетку с периодом *a* . Ширина щелей *b* = *a* / 2 . Получить и построитьизображение решетки на расстоянии *z* = 0,25zT ; 0,5zT ; 0,75zT и zT , гдеzT= 2a2/λ– расстояние Тальбо. Для сравнения наложить полученныеизображения на изображение решетки. |

**Вопросы к экзамену**

1.1.–1.4. Волновое уравнение и его решение в виде бегущей волны. *(Компьютерная демонстрация (КД) "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Волны". "Бегущая волна").* Параметры волнового процесса (длина волны, волновое число, частота, период, фазовая скорость) и соотношения между ними. Продольная и поперечная волна. Волновой фронт. Плоская, цилиндрическая, сферическая волны.

1.5. Понятие волны. Физическая интерпретация условия устойчивости разностных схем бегущего счета для волнового уравнения. Максимальная скорость переноса возмущений по сетке.

2.1. Система уравнений гидродинамики, граничные условия. Волна сжатия-растяжения в стержне *(КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Стержень").* Приближение сплошной среды.

2.2. Приближение линейной акустики. Вывод уравнения для звуковых волн. Потенциал скорости. Скорость звука в воздухе и воде. *(КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Стержень")*. Диапазон звуковых частот. Ультразвук и его применение в медицине.

2.3. Условия на границе раздела для акустических волн. Импеданс среды. Коэффициенты отражения и прохождения. Отражение с "потерей полуволны". *(КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Стержень")*.

2.4, 2.5. Поток и объемная плотность акустической энергии. Интенсивность. Порог слышимости. Болевой порог. Шкала децибел. Численные оценки для смещения, скорости, давления. *(КД "Характеристики акустических волн")*.

3.1, 3.5. Электромагнитные волны. Вывод волнового уравнения из уравнений Максвелла. Скорость света. Показатель преломления. Шкала электромагнитных волн. Длина волны в видимой части спектра и в диапазоне сотовой связи *(КД "Шкала электромагнитных волн")*.

3.2. Поперечность электромагнитной волны в свободном пространстве, как следствие уравнений Максвелла (Вывод). Ориентация векторов E, H, k. (*КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Волны". "Бегущая электромагнитная волна").*

3.3, 3.6. Энергия электромагнитной волны. Уравнения Максвелла. Плотность потока энергии, объемная плотность энергии. Интенсивность излучения. Солнечная постоянная. Энергетический баланс солнечного излучения в атмосфере. Климат Земли. Парниковый эффект.

3.4. Давление электромагнитной волны. Волновой механизм возникновения давления. Зависимость давления от коэффициента отражения.

4.1. Нормальное падение электромагнитной волны на границу раздела двух сред. Период и длина волны на границе раздела.

4.2. Электро-механическая аналогия в теории волн.

4.3, 4.4. Законы отражения и преломления. Полное внутреннее отражение. (*КД "Волны. Отражение и преломление. Раздел "Отражение и преломление поляризованного излучения").*

4.3, 4.5. Законы отражения и преломления. Земная рефракция. Радуга, (*КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Радуга").* Рефракция звука в океане. Подводный звуковой канал (*КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Подводный звуковой канал").*

4.4, 4.6. Полное внутреннее отражение. Волоконная оптика, (*КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Световод").* Волоконно-оптические линии связи. Скорость передачи информации. WDM-технология. Волоконные световоды в медицине.

4.7. Поляризация электромагнитных волн. Линейная, эллиптическая, круговая поляризация *(КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Волны". "Поляризация электромагнитной волны").* Естественный свет.

4.8, 4.9. Отражение и преломление поляризованных волн. Формулы Френеля. Поляризационные эффекты на границе раздела. Угол Брюстера*(КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Отражение и преломление поляризованного излучения").*

4.10, 4.11, 4.12. Распространение электромагнитных волн в кристаллах. Двулучепреломление. Построения Гюйгенса для волнового фронта. (*КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Эффект двулучепреломления").* Принцип работы ЖК дисплеев (*КД "ЖК дисплей ")*.

5.1, 5.2. Способы передачи информации волной. Биения, амплитудная модуляция, частотный спектр сигнала с амплитудной модуляцией по гармоническому закону и его зависимость от параметров сигнала. (*КД "Спектральный анализ". Разделы "Спектры", “Построение сигнала по спектру").* Радиовещание в АМ и FМ диапазонах.

5.3, 5.4. Суперпозиция эквидистантных гармоник. Амплитуда квазигармонического сигнала при конечном и бесконечном числе гармоник. Опыт с маятниками. Теорема о ширине частотной полосы. (*КД "Маятники Чеботаева").*

6.1. Спектр периодического сигнала. Спектр последовательности прямоугольных периодических импульсов. Влияние длительности импульса и периода следования на спектр, Формирование сигнала из гармоник. Осцилляции Гиббса. *(КД "Спектральный анализ". Раздел "Спектры". "Спектр периодического сигнала", “Формирование прямоугольного сигнала”)*

6.2. Спектр одиночного импульса. Предельный переход от дискретного спектра к сплошному. Интеграл Фурье. Спектр прямоугольного импульса. Длительность импульса и ширина его спектра *(КД "Спектральный анализ". Раздел "Спектры". "Спектр периодического сигнала"), (КД "Построение сигнала по спектру").*

6.3, 6.4. Спектральная плотность мощности. Энергетическая ширина спектра. Теорема Планшереля. Связь формы импульса и ширины спектра, (*КД "Влияние формы импульса на его спектр")*.

6.6. Свойства преобразования Фурье: формулы запаздывания, смещения, свертки.

7.1, 7.3, 7.4. Дискретное преобразование Фурье. Функция дискретного аргумента и ее спектр. Периодизация спектра. Частота Найквиста. Наложение частот. Формулы дискретного преобразования Фурье. Взаимосвязь функции и спектра при дискретизации на сетке. *(КД "Спектральный анализ". Раздел "Теорема Котельникова–Шеннона". "Восстановление сигнала по спектру ДПФ").*

7.2, 7.3. Восстановление сигнала по его дискретным отсчетам. Формула Котельникова–Шеннона. (*КД "Спектральный анализ". Раздел "Теорема Котельникова–Шеннона").* Частота Найквиста. Осцилляции Гиббса. Взаимосвязь функции и спектра при дискретизации на сетке.

7.3, 7.4. Формулы дискретного преобразования Фурье. Вывод ортогональности гармоник. Свойства дискретного преобразования Фурье: формулы запаздывания, смещения, свертки. Взаимосвязь функции и спектра при дискретизации на сетке. (*КД "Спектральный анализ". Раздел "Теорема Котельникова–Шеннона". "Восстановление сигнала по спектру ДПФ").*

7.5, 7.6. Свойства дискретного преобразования Фурье. Выбор шага сетки и области периодизации при ДПФ. Спектральная фильтрация импульсов и изображений *(КД "Спектральный анализ". Разделы "Спектральная фильтрация 1","Спектральная фильтрация 2").*

8.1, 8.4. Пространственная и временная дисперсия. Нормальная и аномальная дисперсия. Формула Рэлея. Зависимости частоты от волнового числа и показателя преломления от длины волны. *(КД "Дисперсия в скрещенных призмах").*

8.2, 8.3. Первое приближение теории дисперсии. Волновой пакет. Групповая скорость. Уравнение переноса для огибающей пакета. Бегущее время.

8.5. Второе приближение теории дисперсии. Расплывание волнового пакета и его иллюстрация на *КД "Дисперсия".* Параболическое уравнение дисперсии для амплитуды. Решение для Гауссова импульса. Дисперсионная длина. (*КД "Волновая оптика. Лазер". Разделы "Распространение электромагнитного импульса в среде с дисперсией", "Распространение импульса в среде с нормальной и аномальной дисперсией").* Влияние дисперсии на скорость передачи информации в ВОЛС.

9.1. Волны в цепочках. Дисперсионное уравнение. Длинноволновое приближение. Полоса прозрачности. Движение в цепочке при частотах внутри и вне полосы прозрачности. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Пространственная дисперсия в цепочке масс")*. 9.2. Дисперсия разностной схемы волнового уравнения. Цепочка как физический аналог разностной схемы. Частота Найквиста и верхняя граница полосы прозрачности цепочки. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Цепочки").*

10.1–10.2. Электронная теория дисперсии. Нормальная и аномальная дисперсия электромагнитных волн. Линии поглощения. (*КД "Волновая оптика. Лазер. " Раздел "Распространение импульса в среде с нормальной и аномальной дисперсией", КД "Электронная теория дисперсии").*

10.3. Дисперсия в плазме. Плазменная частота. Распространение волн УКВ-диапазона в атмосфере Земли. ( *КД "Электронная теория дисперсии 2").*

11.1, 11.2. Двулучевая интерференция. Суперпозиция плоских волн, ширина интерференционной полосы. Условия интерференционного максимума и минимума. Интерференция волн от двух точечных источников, *(КД "Волновая оптика. Лазер", Раздел "Двулучевая интерференция").*

11.3, 11.4. Интерференция в тонких пленках. Линии равной толщины. Цвета тонких пленок. Просветление оптики. (*КД "Просветляющее покрытие").* Интерферометр Майкельсона. Открытие гравитационных волн. LIGO.

11.5. Стоячие волны; узлы и пучности. Изменение напряженности полей, плотности и потока энергии в электромагнитной стоячей волне. *(КД "Волны. Отражение и преломление. Раздел "Волны". "Бегущая и стоячая волна. Стоячая э/м волна").*

12.1. Интерференция квазимонохроматических волн. Условие возникновения интерференционной картины. Понятие о когерентности.

12.2. Когерентность волн и видимость интерференционной картины. Степень когерентности. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Когерентность").* Связь распределения интенсивности в интерференционной картине и степени когерентности.

12.3. Время когерентности. Время когерентности и длительность цуга спонтанного излучения атома, *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Когерентность").* Длина когерентности и ширина спектра излучения.

12.4. Теорема Винера–Хинчина (без вывода). Понятие о Фурье-спектроскопии, Влияние шага измерений и длины выборки. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Фурье-спектроскопия")*

13.1, 13.2. Многолучевая интерференция волн от цепочки синфазных источников. Ширина главных максимумов. Разрешающая способность. Антенные решетки. Угловое разрешение. Диаграмма направленности и ее сканирование. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел" "Антенные решетки").*

13.3. Многолучевая интерференция волн от цепочки синфазных источников. Ширина главных максимумов*,* Спектральные приборы*.* Эталон Фабри–Перо. Разрешающая способность *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел" "Интерферометр Фабри–Перо").*

14.1–14.3. Математическая формулировка задачи дифракции. Логика приближений в теории дифракции: уравнение Гельмгольца, интеграл Гельмгольца–Кирхгофа, условие излучения, приближения Кирхгофа. Формула Гельмгольца–Кирхгофа.

14.3, 14.4. Приближения Кирхгофа в теории дифракции. Формула Гельмгольца–Кирхгофа. Оптическое приближение. Формула Френеля–Кирхгофа.

14.5. Формула Френеля–Кирхгофа и принцип Гюйгенса–Френеля. Анализ дифракции на отверстии с помощью зон Френеля, *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел" "Дифракция. Зоны Френеля").* Пятно Пуассона, *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Дифракция на круглом отверстии и на диске ").*

14.6. Дифракция Френеля. Параксиальное (приосевое) приближение. Параболическое уравнение дифракции.

14.7. Эффект Тальбо. Расстояние Тальбо для одномерных структур *(КД "Волновая оптика. Лазер". Разделы "Эффект Тальбо (вариант 1)" и "Эффект Тальбо (вариант 2)").*

15.1. Дифракция Фраунгофера (дифракция плоских волн). Угловой спектр плоских волн.

15.2. Дифракция на щели, прямоугольном и круглом отверстиях. Дифракционная расходимость. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Дифракция", КД "Дифракция Фраунгофера на разных отверстиях")*.

15.3. Пространственно-временная аналогия, частотный спектр импульса и пространственный спектр при дифракции Фраунгофера на щели. Теорема о ширине спектра.

15.4. Ближняя и дальняя зоны дифракции. Приближение геометрической оптики. Число зон Френеля в отверстии для различных приближений теории дифракции *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Эффект Тальбо-2 "Ковер дифракции ).*

15.5. Дифракционная решетка. Основные минимумы, главные максимумы и их ширина. Разрешающая способность, *(КД "Волновая оптика. Лазер". Дифракционная решетка)*

15.7. Голография. Принцип записи и восстановление голографических изображений. Роль когерентности света при записи голограмм *(КД "Голография")*.

16.1, 16.2. Излучение атома, Модель Томсона, Атом Бора. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучение

16.3. Когерентное усиление, обратная связь, условие генерации. Принцип работы и схема лазера. Свойства лазерного излучения. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Принципы работы лазера")*.

16.4 - 16.6, Схема лазерных уровней. Накачка. Типы лазеров и их характеристики. Применение лазеров, Управляемый термоядерный синтез. *(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Принципы работы лазера")*.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**Экзаменационный билет** состоит из двух вопросов, например

1. Система уравнений гидродинамики, граничные условия. Волна сжатия-растяжения в стержне ***(КД "Волны. Отражение и преломление". Раздел "Стержень")****.* Приближение сплошной среды.
2. Когерентность волн и видимость интерференционной картины. Степень когерентности. ***(КД "Волновая оптика. Лазер". Раздел "Когерентность").*** Связь распределения интенсивности в интерференционной картине и степени когерентности..

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)** | | | | |
| Оценка  РО и соответствующие виды оценочных средств | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **Знания**  Коллоквиум,  Экзамен | Отсутствие знаний | Фрагментарные знания | Общие, но не структурированные знания | Сформированные систематические знания |
| **Умения**  Задания для самостоятельной работы | Отсутствие умений | В целом успешное, но не систематическое умение | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности физического непринципиального характера) | Успешное и систематическое умение |
| **Навыки  (владения, опыт деятельности)**  контрольные задания для промежуточной аттестации.  *Экзамен* | Отсутствие навыков (владений, опыта) | Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта) | В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме | Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач |

|  |  |
| --- | --- |
| **Соответствие результатов обучения и компетенций, в развитии которых участвует дисциплина (модуль)** | |
| Результаты обучения | Компетенция, с частичным формированием которой связано достижение результата обучения |
| **Знать:**   1. фундаментальные физические закономерности волновых явлений и математические уравнения их описывающие; 2. основные понятия и определения в физике волновых процессов; 3. основы теории и методы анализа распространения, отражения, дисперсии, интерференции и дифракции электромагнитных и акустических волн; 4. связь физических закономерностей в волновых процессах с современными наукоемкими технологиями, природными явлениями, изменением климата Земли; 5. элементы физики лазеров, принципы генерации когерентного оптического излучения и его свойства.   **Уметь:**   1. извлекать полезную научно-техническую информацию из электронных библиотек научных журналов по оптике, акустике и лазерной физике; 2. анализировать и обрабатывать физическую информацию о волновых процессах при изучении их численными методами; 3. получать оценки параметров акустических и электромагнитных волн в природе и технике; 4. применять спектральные методы исследования волновых процессов в оптике, акустике и информатике;   **Владеть:**   1. основными методами физического анализа явлений распространения, отражения, преломления, дисперсии, интерференции и дифракции акустических и электромагнитных волн; | ОПК-1.Б |
| **Знать:**   1. основы спектрального преобразования, спектральных методов анализа и теорему о ширине частотной полосы; 2. элементы Фурье – оптики и физические основы методов фильтрации сигналов, волновых пакетов, изображений; теорему о ширине частотной полосы; 3. основы дискретного преобразования Фурье; теорему отсчетов Котельникова-Шеннона; 4. влияние волновых явлений на скорость передачи информации в волоконно-оптических линиях связи; 5. связь волновых процессов с численными методами решения задач математической физики;   **Уметь:**   1. применять на практике теорию волн и методы решения волновых задач в области обработки изображений, сигналов, передачи информации 2. формулировать задачи аналитического и численного исследования волновых процессов в реальных системах; 3. применять спектральные методы исследования волновых процессов в оптике, акустике и информатике;   **Владеть:**   1. методами построения математических моделей волновых процессов в оптике и акустике; 2. методами численного решения и интерпретации результатов в задачах распространения волн; 3. спектральными методами анализа, обработки и фильтрации сигналов и изображений; | ОПК-2.Б |
| **Владеть:**   1. качественными и количественными методами анализа волновых процессов при исследовании конкретных физических задач; | ПК-2.Б |

8. **Ресурсное обеспечение**:

**Основная литература**:

1. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М.: Изд-во МГУ. 1998.

2. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа. 1985.

3. Кандидов В.П., Чикишев А.Ю. Физика волновых процессов, Практические занятия по физике для студентов-математиков, часть IV. М.: Факультет ВМК МГУ. 2007. (<http://www.ilc.edu.ru/upload/iblock/c19/ekbtshjo_.pdf>)

4. Кандидов В.П., Чикишев А.Ю. Физика волновых процессов. Компьютерный эксперимент в курсах физики. М.: МАКС Пресс, 2014. (<http://ofvp.phys.msu.ru/upload/iblock/158/opisanie_demonstratsii.pdf>)

5. Кандидов В.П., Чикишев А.Ю Компьютерный эксперимент в курсе «Физика волновых процессов», М.: Физический факультет МГУ, 2018. (<http://ofvp.phys.msu.ru/upload/iblock/65d/текст_title.pdf>)

6. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье. М.: Физическтий факультет МГУ, 2019. (<http://ofvp.phys.msu.ru/upload/iblock/413/Дискретное%20преобразование%20Фурье.pdf>).)

7. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Курс общей физики. Т.1. М.: Физматлит 2001

8. Крауфорд Ф. Волны. М.: Наука. 1976.

9. Пейн Г. Физика колебаний и волн. М.: Мир. 1979.

**Дополнительная литература:**

10. Калитеевский Н.И. Волновая оптика. М.: Высшая школа. 1978.

11. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука. 1976.

12. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979.

13. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Мир. 1989.

14. Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир. 1976.

**Информационные справочные системы:**

На сайте <http://ofvp.phys.msu.ru/science_education/lections/detail.php?ID=746>

в открытом доступе:

1. программа курса лекций,
2. экзаменационные вопросы по дисциплине,

3. библиотека компьютерных демонстраций для самостоятельной работы и представления на лекциях (<http://ofvp.phys.msu.ru/science_education/lections/Waves/index.html>).

4.пособия:

1. [Практические занятия по физике для студентов-математиков В.П.Кандидов, А.Ю.Чикишев ФИЗИКА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ](http://ofvp.phys.msu.ru/upload/iblock/c19/ekbtshjo_.pdf);  
2. [Описание компьютерных демонстраций](http://ofvp.phys.msu.ru/upload/iblock/158/opisanie_demonstratsii.pdf);  
3.[Описание компьютерных демонстраций - 2](http://ofvp.phys.msu.ru/upload/iblock/65d/текст_title.pdf);

4. Кандидов В.П., Чесноков С.С., Шленов С.А. Дискретное преобразование Фурье. М.: Физический факультет МГУ, 2019.

**Материально-техническое обеспечение:**

Лекционная аудитория с партами, меловой доской, комплекс приборов для физических демонстраций и и проекционная техника для представления компьютерных демонстраций на лекции.

9. Язык преподавания - русский.

10**. Преподаватели:**

Профессор физического факультета МГУ В.П.Кандидов, профессор МЛЦ МГУ А.Ю.Чикишев,

Ассистент физического факультета МГУ О.А. Шутова.

11. **Авторы программы**:

Профессор физического факультета МГУ В.П.Кандидов, профессор МЛЦ МГУ А.Ю.Чикишев.