

ПРОГРАММА

по дисциплине: **Цифровизация физических процессов**

по направлению подготовки:

09.03.01 Информатика и вычислительная техника

физтех-школа: **ВШПИ**

кафедра: **общей физики**

курс: **2**

семестр: **4**

лекции – 30 часов

практические (семинарские)

занятия – 30 часов

лабораторные занятия – 30 часов

Диф. зачёт – 1 семестр

ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ – 90

Самостоятельная работа:

теор. курс – 55 часов

физ. практикум – 50 часов

Программу и задание составили:

к.ф.-м.н., доц. П. В. Попов

к.ф.-м.н., доц. Г. И. Лапушкин

Программа принята на заседании
кафедры общей физики 12 декабря 2024 г.

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор

А. В. Гавриков

Электричество и магнетизм. Элементы оптики

1. **Вынужденные электрические колебания.** Цепи переменного тока, метод комплексных амплитуд. Импеданс. Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики колебательного контура. Резонанс в колебательном контуре.
2. **Понятие о спектральном разложении.** Понятие о теореме Фурье. Спектры простейших сигналов: гармонические, прямоугольные импульсы, дельта-импульс. Связь длительности импульса и ширины его спектра (соотношение неопределённостей). Модуляция и детектирование сигналов, принципы передачи информации. Понятие о спектральной фильтрации сигналов, примеры простейших фильтров.
3. **Электромагнитные волны I.** Распространение электромагнитных волн по проводам, длинная линия как цепочка гармонических осцилляторов. Скорость электромагнитной волны. Отражение волн, согласованная нагрузка. Понятие о дисперсии волн. Групповая скорость волнового пакета. Искажение сигналов из-за дисперсии.
4. **Электромагнитные волны II.** Волновое уравнение в пустом пространстве. Плоские волны. Понятие о поляризации волн. Волны в безграничной среде, показатель преломления. Прохождение волны через границу раздела двух сред: законы преломления и отражения. Полное внутреннее отражение. Понятие по формулам Френеля и явлении Брюстера.
5. **Геометрическая оптика.** Основные законы геометрической оптики. Тонкая линза. Оптические приборы: лупа, телескоп, микроскоп.
6. **Элементы волновой оптики I.** Интерференция монохроматических волн, интерференционные полосы. Схемы наблюдения интерференции. Понятие о статистической природе излучения, когерентность волн. Ограничения на монохроматичность и размер источников.
7. **Элементы волновой оптики II.** Распространение волн как интерференция вторичных волн, принцип Гюйгенса—Френеля. Дифракция Фраунгофера на щели и отверстиях. Влияние дифракции на работу оптических приборов. Дифракция Френеля. Дифракция на периодической решётке, дифракционная решётка как спектральный анализатор.

Элементы термодинамики и статистической физики

8. **Основные понятия физики систем многих частиц.** Идеальный газ. Температура и давление газа, термодинамическое равновесие. Уравнение состояния. Внутренняя энергия газа. Модели неидеального газа, пример газа Ван-дер-Ваальса. Газовые процессы. Адиабата идеального газа.

9. Основные законы термодинамики. Работа, внутренняя энергия, теплота. Первое начало термодинамики. Тепловые машины и их КПД, холодильные машины. Идеальная машина, цикл Карно. Второе начало термодинамики. Энтропия и её термодинамическое определение. Энтропия идеального газа. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах. Энтропия как мера неупорядоченности.

10. Фазовые переходы. Условия фазового равновесия, теплота фазового перехода. Скачок энтропии, фазовый переход как изменение степени упорядоченности. Фазовые диаграммы равновесия «твёрдое тело—жидкость—пар». Тройная и критическая точки. Зависимость давления насыщенного пара от температуры (качественно). Кипение. Понятие о фазовых переходах II рода.

11. Элементы статистической физики. Статистический смысл энтропии, неубывание энтропии как наиболее вероятный результат динамики замкнутой системы. Распределение Больцмана и Гиббса (без вывода). Барометрическая формула. «Заселённость» дискретных уровней энергии в молекулах. Распределение молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла). Теорема о равномерном распределении энергии по степеням свободы.

12. Флуктуации. Тепловые флуктуации груза на пружине. Задача о случайных блужданиях. Зависимость флуктуаций от числа частиц, закон \sqrt{N} . Изменение энтропии при флуктуациях. Тепловой и дробовой шум в электрических цепях.

13. Явления случайного переноса. Диффузия как процесс случайных блужданий. Закон Эйнштейна–Смолуховского. Теплопроводность и вязкость. Уравнение диффузии и теплопроводности. Броуновское движение, связь подвижности и коэффициента диффузии.

Литература

Основная

1. Кингсеп А.С., Локшин Г.Р., Ольхов О.А. Основы физики. Курс общей физики. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. Москва : Физматлит, 2007.
2. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М. Основы физики. Курс общей физики. Т. 2. Квантовая и статистическая физика. Москва : Физматлит, 2007.
3. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 2. Термодинамика / под ред. А.Д. Гладуна. – Москва : МФТИ, 2012.
4. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 2. Электричество и магнетизм / под ред. А.В. Максимова и М.Г. Никулина. — Москва : МФТИ, 2019.
5. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 4. Оптика. / под ред. А.В. Максимова. Москва : МФТИ. 2014.
6. Сборник задач по общему курсу физики. Ч. 1 / под ред. В.А. Овчинкина.

Москва : Физматкнига, 2023.

7. Сборник задач по общему курсу физики. Ч. 2 / под ред. В.А. Овчинкина. Москва : Физматкнига, 2023.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика., Т. 3. Электричество., Т. 4. Оптика. — Москва : Физматлит, 2022.

2. Кириченко Н.А. Принципы оптики : учеб. пособие. Москва : МФТИ, 2016.

3. Кириченко Н.А. Электричество и магнетизм. Москва : МФТИ, 2017.

4. Кириченко Н.А. Термодинамика. Статистическая и молекулярная физика. Москва : Физматкнига, 2005.

ЗАДАНИЕ

Дата	N	Темы семинарских занятий	Задачи		
			Дома	Семинар	Мод.
1–7 февр.	1	Вынужденные электрические колебания, метод комплексных амплитуд	⁰ 1.1 ⁰ 1.2 ⁰ 1.3	10.8 ^{эм} , 10.62 ^{эм} , 10.59 ^{эм} , T1	M1a M1b
8–14 февр.	2	Спектральный анализ электрических сигналов	⁰ 2.1 ⁰ 2.2 ⁰ 2.3	11.15 ^{эм} , 11.6 ^{эм} , 11.16 ^{эм} , 11.43 ^{эм} , 11.47 ^{эм}	
15–21 февр.	3	Волны в длинных линиях. Дисперсия волн.	⁰ 3.1 ⁰ 3.2 ⁰ 3.3	12.42 ^{эм} , T2, T3, 10.77 ^{опт}	M2
22–28 февр.	4	Сдача задач и проектов			
1–7 мар.	5	Геометрическая оптика	⁰ 4.1 ⁰ 4.2 ⁰ 4.3	1.18 ^{опт} , 1.22 ^{опт} , T4, 1.32 ^{опт} , 1.38 ^{опт} , 1.41 ^{опт}	M3
8 мар. – 14 мар.	6	Плоские электромагнитные волны. Интерференция	⁰ 5.1 ⁰ 5.2 ⁰ 5.3	2.11 ^{опт} , 3.3 ^{опт} , 3.14 ^{опт} , 4.11 ^{опт} , 5.2 ^{опт}	M4a M4b
15–21 мар.	7	Дифракция	⁰ 6.1 ⁰ 6.2 ⁰ 6.3	7.47 ^{опт} , 7.16 ^{опт} , T5, 8.8 ^{опт} , 8.40 ^{опт}	

22–28 мар.	8	Сдача задач и проектов			
29 мар. – 4 апр.	9	Идеальный и неидеальный газ	⁰ 7.1 ⁰ 7.2 ⁰ 7.3	1.34 ^{тд} , Т6, 1.67 ^{тд} , 6.22 ^{тд}	М5а М5б М6а
5–11 апр.	10	Тепловые машины. Энтропия. Фазовые переходы	⁰ 8.1 ⁰ 8.2 ⁰ 8.3	3.25 ^{тд} , 3.27 ^{тд} , 3.47 ^{тд} , 4.40 ^{тд} , 11.2 ^{тд}	
12–18 апр.	11	Распределения Максвелла и Больцмана	⁰ 9.1 ⁰ 9.2 ⁰ 9.3	7.3 ^{тд} , 7.14 ^{тд} , 7.24 ^{тд} , 8.1 ^{тд} , 11.26 ^{тд} , 8.59 ^{тд}	
19–25 апр.	12	Статистическая энтропия. Флуктуации	⁰ 10.1 ⁰ 10.2 ⁰ 10.3	9.5 ^{тд} , 9.40 ^{тд} , 9.46 ^{тд} , Т7, Т8, Т9	М6б М7
26 апр– 2 мая.	13	Процессы случайного пере- носа	⁰ 11.1 ⁰ 11.2 ⁰ 11.3	Т10, Т11, 10.30 ^{тд} , 10.92 ^{тд} , 10.16 ^{тд} , 10.106 ^{тд}	
3–16 мая	14 15	Сдача задач и проектов			
15 мая	Лекционная контрольная работа				
17 – 22 мая.	16	ЗАЧЁТ			

Примечания

Номера задач, помеченные символами «эм» и «опт», указаны по «Сборнику задач по общему курсу физики». Ч. 2. / под ред. В.А. Овчинкина (4-е изд.). — Москва : Физматкнига, 2017. Разделы «Электричество и магнетизм» и «Оптика», соответственно.

Номера задач, помеченные символом «тд» указаны по «Сборнику задач по общему курсу физики». Ч. 1. / под ред. В.А. Овчинкина (4-е изд.). — Москва : Физматкнига, 2017. Раздел «Термодинамика и молекулярная физика».

Задачи разбиты на 3 группы:

Дом. — задачи, которые студент должен решать самостоятельно при подготовке к семинару;

Сем. — задачи, рекомендованные для разбора на семинаре; неразобранные задачи остаются студентам на дом; форма контроля за решением задач остаётся на усмотрение преподавателя;

Мод. — задачи для численного физического моделирования. Могут реализовываться командами по 2-3 студента. Для получения положительной оценки за семестр студент должен реализовать и сдать на положительную оценку не менее 3 программных проектов.

Домашние задачи

01.1. Найдите амплитуду колебаний тока в конденсаторе ёмкостью $C = 200$ мкФ, включённого в бытовую розетку 220 В/50 Гц.

01.2. Элемент цепи с комплексным импедансом $Z = 1 + 2i$ [Ом] подключён к источнику переменного напряжения с амплитудой $U = 1$ В. Найдите потребляемую элементом мощность.

01.3. Вычислите импеданс Z параллельного колебательного LC контура на его резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Выразите ответ через активное сопротивление катушки R и добротность контура Q .

02.1. Каков спектр (набор частот, амплитуд и фаз гармоник) следующих функций: а) $f(t) = \sin \omega t$, б) $f(t) = \sin^2 \omega t$, в) $f(t) = \sin \Omega t \sin \omega t$, г) $f(t) = |\sin \omega t|$.

02.2. Периодическая последовательность прямоугольных импульсов напряжения с периодом T и длительностью импульса $\tau = T/2$ («меандр») подаётся на вход колебательного контура, имеющего резонансную частоту ω_0 . При каких соотношениях между ω_0 и T возможна резонансная раскачка колебаний в контуре?

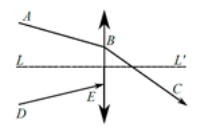
02.3. Согласно спецификации первых версий протокола Wi-Fi, несущие частоты радиовещания лежат в диапазоне 2,412 – 2,472 ГГц, а частота модуляции равна 20 МГц. Сколько возможно непересекающихся каналов вещания Wi-Fi?

03.1. Бесконечная цепочка последовательно соединённых LC -контуров состоит из конденсаторов с ёмкостью $C = \varepsilon_0 l$ и катушек с индуктивностью $L = \mu_0 l$, где l — длина элемента цепочки. Определите скорость волны в цепочке v [м/с] и её волновое сопротивление ρ [Ом].

03.2. Длинный кабель с волновым сопротивлением 100 Ом подключили к разъёму с сопротивлением 50 Ом. Найдите отношение амплитуд отражённой и падающей волн.

03.3. Фазовая скорость волны v на поверхности воды («гравитационные волны») зависит от длины волны λ как $v = \sqrt{g\lambda/2\pi}$, где g — ускорение свободного падения. Найдите скорость распространения пакета волн со средней длиной волны $\lambda = 1$ м.

04.1. На рисунке показаны положение главной оптической оси тонкой линзы LL' и ход проходящего сквозь неё луча ABC . Найдите построением ход произвольного луча DE за линзой.



04.2. Объект рассматривается в лупу — положительную линзу с фокусным расстоянием f . Постройте график положения изображения b в зависимости от расстояния от линзы до предмета a . Отметьте характеристики изображения (прямое/перевернутое, увеличенное/уменьшенное, мнимое/действительное).

04.3. Цилиндрический тонкостенный стакан с жидкостью поставили на стол и рассматривают через боковую стенку. При каком показателе преломления n жидкости поверхность стола под стаканом будет не видна?

05.1. Найдите коэффициент пропускания поверхности стекла с показателем преломления $n = 1,5$ при нормальном падении света.

05.2. На экран падают две плоские монохроматические волны с равными амплитудами под малыми углами $\pm\varphi$ к нормали. Длина волны $\lambda = 500$ нм. Волновые векторы и нормаль к экрану лежат в одной плоскости. Оцените, при каком φ интерференционные полосы можно разглядеть невооружённым глазом (ширина полос не менее $\Delta x \sim 0,1$ мм).



05.3. Плоская монохроматическая волна с длиной λ падает нормально на поверхность стеклянного клина с малым углом раствора $\alpha \ll 1$ и показателем преломления n . Рассматривая интерференцию между волнами, отражёнными от «передней» и «задней» граней клина, найдите положения x_m интерференционных максимумов, наблюдаемых на его передней грани.

06.1. Оцените, с какого расстояния можно увидеть отдельно свет от двух фар автомобиля (ширина автомобиля $D \sim 1,5$ м). Диаметр зрачка человека

в темноте $d \sim 5$ мм, средняя длина волны видимого света $\lambda \sim 500$ нм. Известно, что размер «зерна» сетчатки человеческого глаза приблизительно совпадает с размером дифракционного пятна от зрачка.

6.2. Отверстие диаметром $r = 1$ мм освещается параллельным пучком света с длиной волны $\lambda = 500$ нм. Оцените, на какое расстояние L от отверстия необходимо отодвинуть экран, чтобы в центре картины впервые появился минимум интенсивности.

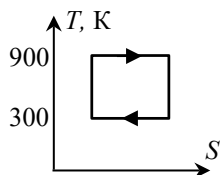
6.3. Лазерный луч с длиной волны $\lambda = 530$ нм направили по нормали на экран смартфона, лежащего на горизонтальном столе. На потолке на высоте $h = 2$ м появилась периодическая структура с периодом $d = 10$ см. Определите размер зерна матрицы экрана.

7.1. Вычислите массу и внутреннюю энергию 1 м^3 сухого воздуха при нормальных условиях ($P = 10^5$ Па, $t = 0^\circ \text{C}$). Состав воздуха: $\text{N}_2 - 78\%$, $\text{O}_2 - 21\%$, $\text{Ar} - 1\%$.

7.2. Идеальный газ расширяется изотермически при температуре T от объёма V_0 до $2V_0$. Начальное давление P_0 . Вычислите работу A , теплоту Q и изменение внутренней энергии ΔU газа. Известна молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме C_V .

7.3. Теплоизолированный сосуд объёма $2V_0$ разделён перегородкой на две равные части. Одна половина заполнена идеальным газом при температуре T_0 и давлении P_0 , во второй — вакуум. Перегородку убирают, и газ заполняет весь объём. Найдите изменение внутренней энергии ΔU и температуры газа ΔT к моменту установления равновесия.

8.1. На диаграмме изображён цикл тепловой машины в координатах энтропия–температура. Работа машины за цикл равна $A = 1$ Дж. Найдите теплоту, полученную рабочим телом от нагревателя $Q_{\text{н}}$ и переданную холодильнику $Q_{\text{х}}$.



8.2. Оцените минимальную стоимость замораживания 1 кг льда в домашнем холодильнике. Температура морозильной камеры $t_{\text{х}} = -19^\circ \text{C}$, температура наружного радиатора $t_{\text{н}} = +35^\circ \text{C}$. Теплота плавления льда $q = 334$ кДж/кг. Стоимость $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ считать известной.

08.3. В условиях задачи ^{07.3} вычислите изменение энтропии ΔS газа и определите, какую работу A необходимо совершить, чтобы вернуть газ в исходное состояние.

09.1. Найдите наиболее вероятную, среднюю и среднеквадратичную скорости молекул азота при $T = 300$ К и сравните полученные значения со скоростью звука.

09.2. Оцените уменьшение атмосферного давления на верхнем этаже небоскрёба высотой $H = 500$ м.

09.2. Молекула может находиться в двух энергетических состояниях: основном и возбуждённом. Разность энергий между ними составляет $\Delta E = 6,0 \cdot 10^{-21}$ Дж. Какова доля молекул, находящихся в возбуждённом состоянии при $t = 250$ °С?

10.1. Груз массой 1 г подвешен на лёгкой нити длиной 1 м. Оценить среднеквадратичное отклонение груза от положения равновесия из-за тепловых флуктуаций при комнатной температуре.

10.2. Оцените, при каком давлении в вакуумной установке относительная флуктуация числа частиц в объёме $V = 1$ л станет равна 1%. Температура газа $T = 300$ К.

10.3. N независимых частиц могут находиться каждая в одном из M состояний с одинаковой энергией. Какова энтропия системы?

11.1. Перемещаясь по лесу в пасмурную погоду, человек каждый шаг случайно отклоняется на угол $\Delta\alpha = 1^\circ$ от исходного направления. Оцените, через какой число шагов человек будет идти в направлении, обратном исходному.

11.2. Теплопроводность азота при комнатной температуре равна $\kappa \approx 2 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м · К). Оцените по порядку величины диаметр молекулы азота.

11.3. Используя данные предыдущей задачи, оцените количество тепла в расчёте на 1 м², теряемое комнатой в единицу времени через однокамерный стеклопакет, когда разность температур между комнатой и улицей составляет $\Delta T = 30$ °С. Расстояние между стёклами $h = 23$ мм.

Текстовые семинарские задачи

Т1. Электрический чайник, включённый в розетку, потребляет из бытовой сети (действующее напряжение $U = 220$ В, частота $\nu = 50$ Гц) мощность $P = 3$ кВт. В попытке обмануть электросчётчик, хозяин дома включил параллельно в другую розетку конденсатор ёмкостью $C = 200$ мкФ. Какую мощность покажет счётчик устаревшей модели, измеряющий потребляемую мощность как произведение действующих значений тока и напряжения в цепи? Изменится ли реально потребляемая мощность? Считать, что чайник имеет только активное сопротивление, прочими потребителями электроэнергии пренебречь. Источник напряжения считать идеальным.

Т2. В кабелях, используемых для высокоскоростной передачи данных (например, HDMI), на высоких частотах сильно возрастает его сопротивление. Это происходит из-за того, что ток концентрируется в тонком слое толщиной δ на поверхности жилы кабеля («скин-эффект»), величина которого определяется формулой $\delta \approx 5 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{\rho}{\nu}}$ (ед. СИ). Оцените максимальную рабочую длину кабеля HDMI, если несущая частота $\nu = 340$ МГц, радиус жилы $r = 0,2$ мм, удельное сопротивление $\rho = 0,02$ Ом \cdot мм²/м. Волновое сопротивление кабеля HDMI равно $R_w = 100$ Ом.

Т3. В природе часто встречается (электромагнитные волны в плазме, в том числе в ионосфере Земли, волны в волноводах и др.) следующий закон дисперсии волн: $\omega(k) = \sqrt{\omega_0^2 + k^2 c^2}$, где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, ω_0 — константа, c — скорость света в пустоте. Найдите связь между фазовой и групповой скоростью таких волн.

Т4. У некоторого близорукого человека дальняя граница области, в которой он видит предметы резко, находится на расстоянии $L = 0,5$ м от глаза. Очки какой оптической силы ему следует носить, чтобы эта граница переместилась в бесконечность?

Т5. Широкий лазерный луч с длиной волны $\lambda = 530$ нм освещает щель шириной $D = 0,1$ мм. По центру щели поместили волос толщиной $d = 50$ мкм. Найдите угловое распределение интенсивности на удалённом экране.

Т6. В лекционной демонстрации производится поджиг пироксилиновой ваты при адиабатическом сжатии воздуха, исходно находящегося при комнатной температуре и нормальном давлении. Вычислите работу A , которую

должен совершить демонстратор, если температура возгорания пироксилина равна 160°C . Начальный объём сосуда $V_0 = 0,1$ л. Воздух считать смесью идеальных двухатомных газов.

T7. Два одинаковых твёрдых тела с температурами 300 К приведены в соприкосновение. Оцените вероятность того, что одно из тел самопроизвольно охладится на $\Delta T = 0,1$ К (а второе на столько же нагреется). Теплоёмкости тел равны $C = 1$ кДж/К.

T8. В цепи течёт постоянный ток $I = 1$ мА. Оцените среднеквадратичную флуктуацию этого тока из-за эффекта «дробового шума». Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

T9. Пользуясь теоремой о равномерном распределении энергии по степеням свободы, определите среднеквадратичную величину тепловых флуктуаций тока и напряжения в электрическом колебательном контуре с индуктивностью $L = 1$ мГн и ёмкостью $C = 1$ мкФ.

T10. Оцените, за какое время молекула воды в воздухе при комнатной температуре смещается от исходного положения на расстояние ~ 10 см. Размеры всех молекул принять одинаковыми и равными $r \sim 10^{-10}$ м.

T11. «Пьяный матрос» совершает случайные блуждания по площади, смещаясь каждые $\tau = 1$ с на расстояние $\lambda = 0,5$ м в случайном направлении. Найти среднеквадратичное смещение матроса от исходного положения $\sqrt{\Delta r^2}$ за $t = 1$ час и определить коэффициент диффузии D толпы пьяных матросов, не взаимодействующих между собой.

Задачи для физического моделирования

*Во всех задачах, помимо программной реализации, необходимо провести **сравнение результатов** с известными теоретическими решениями (для тех частных случаев, когда оно может быть получено). Параметры физической системы должны быть изменяемы, а программа должна стабильно работать и давать физически корректный результат при различных значениях параметров.*

По согласованию с преподавателем студенты могут предлагать и реализовывать любые задачи в рамках тем курса.

*Звёздочкой * отмечены варианты заданий повышенной сложности.*

M1. Спектральный анализ. Выполните одно из заданий ниже (А, Б).

M1А. Передача и приём сигнала. Смоделируйте схему работы пары радиопередатчик-радиоприёмник. Исходный цифровой сигнал (например, цифровая аудиозапись) модулируется передатчиком на некоторой несущей частоте. Приёмник, используя высокочастотный колебательный контур, настраивается в резонанс с несущей частотой и принимает сигнал от передатчика. Информация восстанавливается с помощью выпрямляющего детектирования (сигнал пропускается через идеальный диод). Подбирая параметры схемы, постарайтесь воспроизвести исходный сигнал с минимальными искажениями.

* Учтите, что в процессе распространения сигнала к нему примешиваются случайные высокочастотные помехи (сгенерируйте их). Для устранения помех приёмник использует фильтр низких частот (например, RC-ячейку).

M1Б. Спектральные фильтры. Используя спектральный метод, реализуйте программу расчёта отклика электрической цепи на произвольный периодический входной электрический сигнал. Проверьте работу различных фильтров: ФНЧ, ФВЧ, узкополосного. Рассмотрите прохождение через цепь различных сигналов (гармонический, последовательность импульсов, цуги, модулированные колебания и др.).

M2. Длинная линия. Реализуйте численно расчёт распространения волны по длинной цепочке последовательно соединённых LC-ячеек. Этапы: 1) получите стоячую волну в цепочке при отражении от замкнутого накоротко конца, 2) рассмотрите отражение волн от некоторой активной нагрузки, убедитесь что при согласованной нагрузке отражённая волна отсутствует; 3)* учтите сопротивление линии и рассмотрите эффекты затухания волн; 4)* предположив некоторую зависимость индуктивности/ёмкости ячейки от частоты, рассмотрите эффекты дисперсии: отличие групповой скорости от фазовой и искажение формы сигнала.

М3. Геометрическая оптика. Смоделируйте ход лучей света (их преломление и отражение) в некоторой модели некоторого оптического прибора (лупа, микроскоп, подзорная труба). Постройте наблюдаемое изображение некоторого предмета. В качестве элементов оптической системы используйте 1) тонкие линзы, 2)* реальные (толстые) сферические линзы.
* Учтите потери интенсивности при преломлении/отражении на границах раздела.

М4. Волновая оптика. Используя принцип Гюйгенса–Френеля, реализуйте расчёт распространения световых (электромагнитных) волн в пустом пространстве при наличии различных препятствий (непрозрачных и полупрозрачных плоских экранов). Выполните одно из заданий ниже (А, Б).

* Учтите поляризацию волн.

М4А. Интерференция. Численно рассчитать результат интерференционного опыта по схеме Юнга. Предусмотрите возможность задания спектра излучения источника и его геометрических размеров, а также размеров и положений щелей.

*Проведите аналогичный расчёт, если вместо щелей использованы малые круглые отверстия.

**Реализуйте расчёт интерференционной картины, считая точки источника независимыми излучателями случайных цугов.

М4Б. Дифракция. Получите численное решение задачи дифракции плоской монохроматической волны на различных препятствиях (щель, круглое отверстие, несколько щелей, дифракционная решётка). Необходимо обеспечить возможность вычисления в различных предельных случаях: дифракция Фраунгофера, дифракция Френеля, геометрическая оптика.

** Вместо принципа Гюйгенса–Френеля реализуйте численно метод Рэлея (метод пространственного преобразования Фурье).

М5. Молекулярное моделирование. Реализуйте программу, рассчитывающую индивидуальное движение большого числа молекул (не менее, чем $N = 10^3$) в закрытом сосуде с неподвижными теплоизолированными стенками. Молекулы считать твёрдыми шариками, испытывающими упругие столкновения друг с другом и со стенками. Убедитесь в том, что при заданных параметрах (объём, давление, температура или внутренняя энергия), газ приходит в равновесное состояние, соответствующее уравнению состояния идеального газа. *Выполните одно из заданий ниже (А, Б, В).*

*Реализуйте возможность считать стенки сосуда не теплоизолированными, задавая в качестве граничных условий их температуру.

M5A. Адиабатический процесс. 1) С помощью созданной модели, рассмотрите поведение идеального газа под поршнем квазистатическом адиабатическом процессе, проверьте справедливость уравнения адиабаты Пуассона; 2) задав малые колебания поршня, наблюдайте распространение звуковой волны в газе, сравните скорость волны с теоретической; 3) создайте резкое изменение параметров системы (например, давления или объёма) и наблюдайте последующий переход системы к состоянию равновесия, найдите конечные параметры газа и сравните их с теоретическими.

M5B. Неидеальный газ. Задав некоторую модель взаимодействия молекул (притяжения и отталкивания), реализуйте расчёт состояния неидеального газа. Рассмотрите поведение газа в различных процессах и сравните результаты с моделью газа Ван-дер-Ваальса.

* Рассмотрите два теплоизолированных сосуда, один из которых изначально заполнен газом, а другой — пустой. Сосуды сообщаются через небольшое число малых отверстий («пористую перегородку»). Рассмотрите процесс просачивания неидеального газа из одного сосуда в другой (*процесс Джоуля—Томсона*) и сравните результат с теоретическим.

M5B. Статистика идеального газа. Рассмотрите вертикальный сосуд в поле тяжести, в котором в начальном состоянии все молекулы расположены вблизи дна и имеют одинаковую кинетическую энергию (или любое другое неравновесное начальное состояние). Считая сосуд теплоизолированным (или задав постоянную температуру стенок), рассмотрите процесс установления равновесия в системе. Получите вероятностные функции распределения (плотности вероятности) молекул по скоростям и по высоте. Сравните результат с распределением Максвелла—Больцмана.

* Рассмотрите движение отдельной молекулы и убедитесь на её примере в справедливости «эргодической гипотезы» (статистика отдельной молекулы такая же, как статистика ансамбля из большого числа молекул).

M6. Фазовые переходы. *Выполните одно из заданий ниже (А, Б).*

M6A.* «Клеточные автоматы». Смоделируйте процесс замерзания воды в лёд в следующей постановке. Сосуд с водой разбивается на множество мелких неподвижных ячеек, каждая из которых может находиться либо в жидком, либо в твёрдом состоянии и имеет некоторую температуру. Если температуры соседних ячеек разные, они обмениваются теплом между собой

по закону Фурье (количество переданного тепла пропорционально разности температур), изменяя свою температуру соответственно. Если температура ячейки падает ниже температуры плавления $T_{\text{пл}}$, то у неё появляется вероятность того, ячейка на следующем шаге сменит жидкое состояние на твёрдое. Причём, эта вероятность тем больше, чем больше отличие температуры ячейки от $T_{\text{пл}}$, а также чем больше *ближайших соседей* уже находятся в твёрдом состоянии (ячейка замерзает с вероятностью 1, только если она окружена льдом со всех сторон). При замерзании, ячейка поглощает теплоту плавления, забирая её у соседей. Исследуйте характер замерзания воды в зависимости от параметров модели.

М6Б.* Ферромагнетизм в «нейросетях». В теории ферромагнетиков изучается модель образования спонтанной намагниченности некоторых материалов (например, железа), называемая *моделью Изинга* (частный случай *нейросетей Хопфилда*, за изучение которых была выдана Нобелевская премия по физике 2024 г.). В узлах однородной кристаллической решётки (одномерной, двумерной или трёхмерной) зафиксированы точечные частицы, каждая из которых может обладать только одним из двух значений проекции магнитного момента («спина»): $s_i = \pm 1$, $i = 1 \dots N$, а энергия всей системы N «спинов» определяется формулой $E = -A \sum s_i s_j$, где $i \neq j$, суммирование ведётся по всем парам соседних «спинов», A — константа (энергия связи). Используя «метод Монте-Карло» (метод случайной генерации положений спинов), исследуйте зависимость состояния системы от её температуры T . Определите температуру T_0 фазового перехода в ферромагнитное состояние. Исследуйте зависимость суммарной намагниченности $S = \sum s_i$ от разности $T - T_0$ вблизи температуры перехода.

М7.* Тепловой шум. Протекание электрического тока через сопротивление во многом аналогично течению идеального газа по трубе. Пользуясь этой аналогией — моделируя электроны в проводнике как идеальный газ, «молекулы» которого испытывают неупругие столкновения со стенками кристаллической решёткой, находящейся при температуре T , — реализуйте модель тепловых шумов в электрической цепи. Рассмотрите тепловые шумы в RC -ячейке и в RLC -колебательном контуре (элементы L и C считайте идеальными). Исследуя параметры шумов, сравните результат с *формулой Найквиста*.

М8. Случайные блуждания и флуктуации.

Выполните одно из заданий ниже (А, Б, В).

М8А. Охлаждение радиатора. С помощью метода случайных блужданий, применённого к теплопередаче (случайные блуждания порций энергии),

проведите расчёт охлаждения компьютерного процессора через пассивный радиатор (геометрию радиатора задайте самостоятельно) в отсутствие конвекции воздуха (без вентилятора).

М8Б. Броуновское движение. Реализуйте расчёт траектории броуновских частиц (например, пылинок в воздухе комнаты) под действием хаотичных ударов молекул окружающей среды. Масса и размер частицы много больше соответственно массы молекул и их длины свободного пробега. Движение пылинки можно описывать в одном из двух вариантов: 1) с помощью *уравнения Ланжевена* (случайная сила + сила трения, пропорциональная скорости); либо 2) моделируйте движение пылинки как результат *прямого соударения* молекул газа с ней. Проведите расчёт траектории одной частицы, проверьте что среднеквадратичное смещение частицы подчиняется закону Эйнштейна–Смолуховского. Рассмотрите поведение облака большого числа пылинок, и убедитесь, что поток частиц подчиняется уравнению диффузии (закону Фика), проверьте связь между коэффициентом диффузии и подвижностью частицы (соотношение Эйнштейна).

М8В.* Нестандартные блуждания. Исследуйте нестандартные случайные блужданий частицы (отдельной частицы и/или облака частиц), задав 1) вероятность длины «прыжка» l частицы в случайном направлении на каждом временном шаге, как случайно распределённую величину со степенным (*распределение Парето*) законом плотности вероятности: $p(l) \sim 1/l^\alpha$ ($l > l_{\min}$, где l_{\min} — минимальный шаг, α — константа), 2) вероятность на каждом шагу застрять в «ловушке» на некоторое время t , определяемое вероятностным законом $p(t) \sim 1/t^\beta$ ($t > \tau$, где τ — время шага). Изменяя параметры α и β , выясните, при каких его значениях закон Эйнштейна–Смолуховского остаётся применим.