

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.Ломоносова**

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ПЛАН

ИЗУЧЕНИЯ РАЗДЕЛА

«МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»

КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Москва 2025

ПЛАН ЛЕКЦИЙ

Лекторы: профессор А.Л.Клавсюк,
профессор Ю.А.Кокшаров

Лекция 1.

Предмет молекулярной физики. Основные положения молекулярно-кинетической теории. Примеры явлений, обусловленных тепловым движением молекул. Агрегатные состояния вещества. Характерные размеры и массы атомов и молекул. Моль как единица измерения количества вещества. Постоянная Авогадро. Статистический и термодинамический подходы к описанию молекулярных явлений в макроскопических системах.

Лекция 2.

Основные понятия классической равновесной термодинамики. Макроскопические (термодинамические) параметры. Нулевое начало термодинамики. Состояние термодинамического равновесия. Температура как характеристика состояния равновесия. Термическое уравнение состояния. Методы измерения температуры. Идеально-газовая шкала температур. Эмпирические температурные шкалы. Квазистатические (квазиравновесные) процессы. Термодинамические коэффициенты и уравнение их связи. Явление теплового расширения для газов, жидкостей и твердых тел.

Лекция 3.

Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия термодинамической системы. Понятие функции состояния термодинамической системы. Калорическое уравнение состояния. Связь изменения внутренней энергии с работой и количеством теплоты как закон сохранения энергии в тепловых процессах. Опыт Джоуля по определению механического эквивалента теплоты. Интенсивные и экстенсивные термодинамические величины. Теплоёмкость. Понятия удельной и молярной теплоемкости. Характерные значения теплоемкости при нормальных условиях для газов, жидкостей и твердых тел (экспериментальные данные).

Лекция 4.

Термодинамика идеального газа. Закон Менделеева-Клапейрона как пример термического уравнения состояния. Основные виды квазистатических процессов в идеальном газе. Термодинамические коэффициенты для идеального газа. Закон Дальтона (закон парциальных давлений). Первое начало термодинамики в применении к процессам в идеальном газе. Политропические процессы и их примеры. Формула Майера. Применение первого начала термодинамики к неравновесному адиабатическому процессу в идеальном газе («расширение в пустоту»).

Лекция 5.

Циклические процессы. Тепловые машины. Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины. Принцип работы холодильной машины и теплового насоса. Двигатели внутреннего сгорания.

КПД идеальной (обратимой) тепловой машины Карно. Использование цикла Карно для реализации термодинамической шкалы температур.

Обратимые и необратимые процессы. Первая и вторая теоремы Карно.

Лекция 6.

Исторические формулировки второго начала термодинамики. Формулировка Томсона (Кельвина) и формулировка Клаузиуса. Их эквивалентность. Равенство и неравенство Клаузиуса. Принцип максимального количества теплоты и принцип максимальной работы. Энтропия как функции состояния термодинамической системы. Закон неубывания энтропии в адиабатически изолированной системе как возможная формулировка второго начала термодинамики. Формула для изменения энтропии идеального газа в равновесном процессе.

Лекция 7.

Третье начало термодинамики. Тепловая теорема Нернста. Поведение энтропии и теплоемкости вблизи абсолютного нуля температуры. Недостижимость абсолютного нуля температуры. Основные методы получения низких температур. Зависимость теплоемкости от температуры для газов, жидкостей и твердых тел (экспериментальные данные).

Лекция 8.

Основное термодинамическое тождество и примеры его применения в термодинамике. Вывод формулы связи термического и калорического уравнений состояния. Вывод формулы связи изобарической и изохорической теплоемкости в общем случае.

Термодинамические потенциалы: внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия (потенциал Гельмгольца), потенциал Гиббса. Соотношения Максвелла. Термодинамические потенциалы и условия равновесия (устойчивости) термодинамических систем при различных внешних условиях.

Лекция 9.

Математические основы статистического подхода к описанию молекулярных явлений. Случайные физические величины. Вероятность случайной дискретной величины и плотность вероятности случайной непрерывной величины. Среднее значение и дисперсия случайной величины.

Схема Бернулли. Биномиальное распределение.

Лекция 10.

Применение биномиального распределения для описания пространственного распределения молекул газа, процессов диффузии и броуновского движения. Распределение Пуассона и распределение Гаусса. Условия применимости и вывод из биномиального распределения. Примеры использования для описания молекулярных явлений.

Лекция 11.

Распределение Максвелла по проекции и модулю скорости для молекул идеального равновесного газа. Вывод распределения Максвелла. Принцип детального равновесия. Характерные скорости распределения Максвелла (наивероятнейшая, средняя, среднеквадратичная). Эксперименты, подтверждающие распределение Максвелла.

Лекция 12.

Примеры применения распределения Максвелла к описанию молекулярных явлений. Явление эффузии. Явление конденсации (испарения) молекул. Распределение Максвелла по импульсу и по кинетической энергии. Характерные энергии (наивероятнейшая, средняя). Частота ударов молекул газа о поверхность стенки сосуда.

Лекция 13.

Барометрическая формула. Распределение Больцмана молекул равновесного газа в поле силы тяжести и в поле центробежных сил. Формула распределения Максвелла-Больцмана. Опыты Перрена по исследованию закона распределения молекул в поле силы тяжести. Применение центрифуг в науке и технике. Экспериментальные данные по распределению молекул газов воздуха по высоте в атмосфере Земли.

Лекция 14.

Основы статистической физики. Понятие фазового пространства. Микро- и макросостояния. Постулат равновероятности микросостояний равновесной термодинамической системы. Эргодическая гипотеза. Статистическое определение температуры равновесного состояния. Статистический смысл энтропии. Формула Больцмана для энтропии. Статистическое обоснование Планком третьего начала термодинамики.

Лекция 15.

Теорема Больцмана о равномерном распределении средней кинетической энергии теплового движения по степеням свободы молекул равновесного газа. Поступательные, вращательные и колебательные степени свободы молекул. Классическая теория теплоемкостей газов и пределы её применимости. Представление о «замороженных» степенях свободы. Закон Дюлонга-Пти для теплоемкости металлов. Поступательное и вращательное броуновское движение. Формула Эйнштейна для поступательного броуновского движения. Опыты Перрена по исследованию броуновского движения.

Лекция 16.

Молекулярные процессы (явления) переноса. Уравнения переноса: закон Фика (диффузия), Фурье (теплопроводность), Ньютона (вязкость). Условия их применимости.

Характерные значения коэффициентов переноса (коэффициента диффузии, коэффициента теплопроводности, коэффициента вязкости) для различных агрегатных состояний при нормальных условиях.

Самодиффузия и взаимная диффузия. Формула Эйнштейна для диффузии.

Лекция 17.

Теплопроводность. Закон Фурье. Уравнение теплопроводности. Коэффициенты температуропроводности и теплоотдачи. Стационарные и нестационарные процессы переноса. Конвекция и излучение как примеры макроскопических процессов переноса. «Быстрые» и «медленные» процессы переноса.

Понятие о реологии. Условия применимости уравнения Ньютона для вязкости. Неньютоновские жидкости.

Лекция 18.

Элементарная теория процессов переноса в газах. Длина и время свободного пробега молекул газа. Опыт Борна. Коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности газа, связь между ними и зависимость от температуры.

Понятие о физической кинетике. Понятие о кинетическом уравнении Больцмана.

Лекция 19.

Реальные газы (термодинамический подход). Изотермы реального газа выше и ниже критической точки. Сжижение газа под давлением. Опыты Эндрюса. Понятие о двухфазном состоянии.

Уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса. Изотермы, изобары и изохоры газа Ван-дер-Ваальса. Критическая точка для газа Ван-дер-Ваальса. Внутренняя энергия и энтропия газа Ван-дер-Ваальса. Приведенные параметры и приведенное уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса. Закон соответственных состояний.

Лекция 20.

Реальные газы (молекулярный подход). Разновидности сил взаимодействия между молекулами. Понятие о видах химической связи. Зависимость энергии парного межмолекулярного взаимодействия. Модель межмолекулярного взаимодействия Леннарда-Джонса (потенциал «6-12»). Физическая интерпретация параметров уравнения газа Ван-дер-Ваальса при молекулярном подходе. Качественное объяснение явления теплового расширения и аномалий теплового расширения.

Лекция 21.

Процесс (эффект) Джоуля-Томсона. Изменение энтальпии и энтропии в процессе Джоуля-Томсона. Дифференциальный и интегральный эффект Джоуля-Томсона для газа Ван-дер-Ваальса. Температура инверсии эффекта Джоуля-Томсона. Применение процесса Джоуля-Томсона для получения низких температур.

Лекция 22.

Поверхностные явления. Адгезия и когезия. Смачиваемость и несмачиваемость. Краевой угол. Термодинамическое определение коэффициента поверхностного натяжения. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры. Избыточное давление вблизи искривленной поверхности жидкости. Формула Лапласа. Капиллярные явления. Давление насыщенного пара вблизи искривленной поверхности жидкости.

Лекция 23.

Фазовые переходы. Фаза и агрегатное состояние вещества. Фазовые диаграммы. Тройная и критическая точка. Классификация фазовых переходов по непрерывности потенциала Гиббса и его производных. Условие равновесия фаз. Понятие о химическом потенциале.

Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Фазовый переход жидкость-газ. Правило рычага.

Описание фазового перехода I рода жидкость-газ с помощью уравнения Ван-дер-Ваальса. Правило Максвелла. Метастабильные состояния. Перегретая жидкость и переохлажденный газ.

Лекция 24.

Понятие о современной теории фазовых переходов. Непрерывные фазовые переходы. Критические явления. Поведение термодинамических коэффициентов в критической точке. Явление критической опалесценции. Сверхкритическое состояние вещества.

Понятие о теории фазовых переходов Ландау. Параметр порядка. Переход «ферромагнетик-парамагнетик» как пример непрерывного фазового перехода.

Лекция 25.

Понятие «конденсированные среды». Ближний и дальний порядок в жидкостях и твердых телах. Аморфные и кристаллические твердые тела. Поликристаллы. Трансляционная и точечная симметрия в кристаллах. Кристаллическая решетка. Элементарная ячейка. Решетки Браве. Обозначение плоскостей и направлений в кристалле. Индексы Миллера. Изоморфизм и полиморфизм. Дефекты в кристаллах. Дислокации. Понятие о жидких кристаллах.

Тепловые колебания кристаллической решетки. Представление о фононах. Модели теплоемкости твердых тел Эйнштейна и Дебая.

Лекция 26.

Элементы термодинамики необратимых процессов. Потоки и термодинамические силы. Принцип симметрии кинетических коэффициентов Онсагера. Термодиффузия. Термоэлектрические явления. Эффекты Зеебека, Пельтье, Томсона.

Лекция 27.

Растворы. Теплота растворения. Взаимная растворимость жидкостей. Диаграммы состояния. Равновесие жидкость – пар для бинарных смесей. Законы Генри и Рауля. Изменение температуры кипения и замерзания по сравнению с чистым растворителем. Осмотическое давление. Закон Вант-Гоффа.

Лекция 28.

Химические реакции. Теплота реакции. Химическое равновесие. Закон действующих масс. Сильные и слабые электролиты. Энергия активации химической реакции. Цепные реакции.

Лекция 29. Дополнительный материал по выбору лектора.

Лекция 30. Резервная.

План семинаров.

Семинар 1. Основы молекулярно-кинетической теории. Оценки характерных размеров межатомных расстояний для различных агрегатных состояний вещества. Температура и эмпирические температурные шкалы. Тепловое расширение и термоупругие свойства вещества.

Семинар 2. Первое начало термодинамики. Теплоемкость. Политропические процессы. Уравнения процессов в идеальном газе.

Семинар 3. Процессы в идеальном газе. Основные составляющие энергетического баланса.

Семинар 4. Циклические процессы. Обратимые циклы. КПД циклов.

Семинар 5. Энтропия. Второе и третье начала термодинамики.

Семинар 6. Изменение энтропии в необратимых процессах. Энтропия и внутренняя энергия как термодинамические функции.

Семинар 7. Применение T - S диаграмм для анализа циклов и расчета КПД тепловых машин.

Семинар 8. Контрольная работа по разделу I.

Семинар 9. Статистический подход к молекулярным явлениям. Основные понятия теории вероятностей. Элементы комбинаторики.

Семинар 10. Статистическая система. Биномиальное распределение. Плотность вероятности.

Семинар 11. Распределения Пуассона и Гаусса.

Семинар 12. Термодинамические статистические системы. Состояние термодинамического равновесия. Температура. Распределение по энергии.

Семинар 13. Распределение Максвелла по скоростям. Характерные скорости теплового движения молекул газа.

Семинар 14. Распределение Максвелла по скоростям. Частота ударов молекул о стенку сосуда. Давление газа.

Семинар 15. Закон Дальтона. Распределение энергии по степеням свободы. Броуновское движение.

Семинар 16. Контрольная работа по разделу II.

Семинар 17. Распределение Больцмана. Газ в потенциальном поле Земли.

Семинар 18. Распределение Больцмана. Газ в потенциальном поле сил инерции. Система с двумя уровнями энергии.

Семинар 19. Молекулярно-кинетические характеристики газов, жидкостей и твердых тел.

Семинар 20. Стационарные явления переноса. Коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности газов. Вязкость.

Семинар 21. Стационарные явления переноса. Теплопроводность.

Семинар 22. Явления переноса: диффузия. Нестационарные явления переноса. Времена релаксации.

Семинар 23. Контрольная работа по разделу III.

Семинар 24. Реальные газы и жидкости. Уравнение Ван-дер-Ваальса.

Семинар 25. Реальные газы и жидкости. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Критические параметры.

Семинар 26. Охлаждение и сжижение газов. Эффект Джоуля – Томсона. Энтальпия.

Семинар 27. Поверхностные явления. Свободная энергия Гельмгольца.

Семинар 28. Фазовые переходы. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса.

Семинар 29. Энтропия и теплоемкость систем при фазовых переходах. Потенциал Гиббса.

Семинар 30. Контрольная работа по разделу IV.

ЛИТЕРАТУРА

Учебники и учебные пособия

1. Алешкевич В.А. Молекулярная физика. М., Физматлит, 2016.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М., Высшая школа, 1987.
3. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. СПб, Лань, 2007.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. М., Наука, 2011.
5. Рейф Ф. Статистическая физика. М., Наука, 1986.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып.4. Кинетика, теплота, звук. М., Мир, 1977.

Сборники задач

1. Васильева О.Н., Салецкий А.М. Молекулярная физика и термодинамика. Сборник задач. М., Физический факультет МГУ, 2018.
2. Миронова Г.А., Брандт Н.Н., Салецкий А.М. Молекулярная физика и термодинамика. Методика решения задач. М., Физический факультет МГУ, 2017.
3. Сборник задач по общему курсу физики. Термодинамика и молекулярная физика. Под ред. Д.В. Сивухина. М., Физматлит, 2006.
4. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. СПб, Лань, 2005.