

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)**

---

**«Утверждаю»**

**Зам. директора ОИВТ РАН**

**Д.Ф.М.В. Гавриков А.В.**

« 8 » **августа** 2022 год



**Программа вступительных экзаменов в аспирантуру**

**ОИВТ РАН по направлению**

**03.06.01 –Физика и астрономия;**

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**I. Термодинамика**

1. Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия, теплота. Энтальпия.
2. Второй закон термодинамики. Формулировки второго закона термодинамики (термодинамическая температура). Цикл Карно. Теорема Карно.

Энтропия. Обратимость и производство работы. Энергия. Потеря энергии в необратимых процессах.

Дифференциальные уравнения. Термодинамики. Уравнения Максвелла.

Равновесие термодинамических систем. Критерии равновесия для различных систем. Условия устойчивости и равновесия в однородной системе.

3. Равновесие фаз (для чистого вещества). Условия равновесия фаз. Уравнение Клайперона-Клаузиуса и его интегрирование. Критическая точка. Свойства вещества вблизи критической точки (термодинамическое подобие). Закон соответственных состояний.

4. Термодинамические свойства вещества. Термодинамические и калорические свойства твердых тел, жидкостей, идеальных и реальных газов. Термодинамические диаграммы состояния веществ.

5. Смеси, растворы. Свойства газовых смесей. Химический потенциал. Летучесть. Фазовое равновесие в растворах. Правило фаз. Идеальные растворы. Неидеальные растворы. Азеотропные растворы. Осмотическое давление. Растворы с областью несмесимости. Критические явления в растворах. Примеры диаграмм состояния. Работа разделения.

6. Основы химической термодинамики. Термохимия. Закон Гесса. Уравнение Кирхгофа. Химическое равновесие и второй закон термодинамики. Константа равновесия. Равновесие в гетерогенных химически реагирующих системах. Термодинамические свойства химически реагирующих систем. Третий закон термодинамики. Расчет фазового равновесия с помощью 3-го закона термодинамики.

7. Термодинамика теплового излучения. Закон Кирхгофа. Закон Вина. Закон Стефана-Больцмана.

8. Элементы термодинамики необратимых процессов. Основные положения термодинамики необратимых процессов. Соотношения взаимности. Термоэлектрические явления.

9. Термодинамика потока. Изэнтропическое одномерное стационарное движение газа. Истечение газа из сопла. Скачок уплотнения. Скорости распространения ударной волны и спутного потока за ней. Распространение возмущений конечной интенсивности. Сужающийся сверхзвуковой поток. Расширяющийся сверхзвуковой поток.

## **II. Статистическая термодинамика. Молекулярная физика.**

1. Основные принципы статистики. Статистическое распределение. Теорема Лиувилля. Статистическое распределение в квантовой статистике. Энтропия и вероятность.

2. Распределение Гиббса. Распределение Максвелла. Свободная энергия в распределении Гиббса. Распределение Гиббса с переменным числом частиц. Вывод термодинамических отношений из распределения Гиббса.

3. Распределение Больцмана. Распределение Больцмана в классической статистике. Закон равнораспределения.

4. Распределение Ферми и Бозе. Распределение Ферми. Распределение Бозе. Неравновесные Ферми и Бозе-газы. Вырожденный электронный газ. Черное излучение.

5. Идеальный и неидеальные газы. Разложение по степеням плотности. Уравнение состояния газов и жидкостей. Уравнение Ван дер Ваальса. Взаимодействие молекул. Зависимость межмолекулярной силы и потенциальной энергии от расстояния между молекулами. Вириальные коэффициенты. Разложение по степеням давления. Закон соответственных состояний. Уравнение Ван дер Ваальса для жидкой фазы.

6. Квантовая теория теплоемкости газов. Статистическая сумма двухатомной молекулы. Определение уровней энергии молекул из спектров. Статистические веса. Вырождение.

7. Твердые тела. Структура твердых тел. Кристаллическая решетка. Уравнение состояния твердых тел. Сжимаемость, полная потенциальная энергия кристалла от объема. Теплоемкость твердых тел. Классическая теория теплоемкости. Квантовая теория теплоемкости. Колебания линейной цепочки двухмерной и трехмерной решетки. Теория Дебая. Теплоемкость при очень низких температурах.

8. Кинетическая теория явлений переноса в разреженных газах. Кинетическое уравнение Больцмана и методы его решения. Метод Чепмена-Энскога. Сечения столкновения и интегралы столкновений для разных процессов переноса. Вязкость, теплопроводность и коэффициент диффузии газов.

### **III. Теория теплообмена**

1. Общие сведения. Процессы переноса энергии, количества движения и вещества. Основные процессы теплообмена. Феноменологический метод исследования в теории теплообмена. Проблемы теории теплообмена, выдвигаемые современной техникой, пути их решения.

2. Теория теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье. Начальные и граничные условия. Основные методы решения задач теплопроводности. Теплопроводность при нестационарном режиме. Теорема Дюамеля.

Применение метода аналогий к расчету температурных полей.

3. Основные уравнения динамики вязкой жидкости и конвективного теплообмена. Уравнения неразрывности, движения и энергии для несжимаемой вязкой жидкости. Начальные и граничные условия в задачах о движении жидкости и конвективном теплообмене.

Уравнения движения и энергии для пограничного слоя в сжимаемой жидкости.

Интегральные соотношения количества движения и энергии для пограничного слоя.

4. Методы подобия и размерности. Структура вторичных единиц измерения, Пи-теорема. Приведение математического описания процесса к безразмерному виду. Числа и критерии подобия.

5. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в трубах. Теплообмен в круглой трубе при граничных условиях первого и второго рода.

6. Теплообмен и сопротивление при ламинарном пограничном слое в несжимаемой жидкости и потоке газа высокой скорости. Продольное обтекание пластинки и тел с продольным градиентом давления. Теплоотдача пластинки и тел другой формы в вынужденном потоке. Обтекание и теплоотдача вертикальной пластинки и горизонтального цилиндра при свободной конвекции. Адиабатическая температура, теплоотдача и сопротивление трения пластинки в потоке газа высокой скорости.

7. Основы теории турбулентности. Переход ламинарного течения в турбулентное в трубах и пограничном слое.

Турбулентность как случайный процесс. Осредненные уравнения неразрывности, движения и энергии для турбулентных потоков. Коэффициенты турбулентного переноса импульса и тепла, турбулентное число Прандтля. Теория пути перемещения. Универсальный профиль скорости.

8. Теплообмен и сопротивление при турбулентном движении жидкости в трубах. Теплообмен в круглых трубах при течении несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами. Влияние переменных свойств на теплообмен и сопротивление.

9. Теплообмен и сопротивление при турбулентном пограничном слое и несжимаемой жидкости и потока газа высокой скорости. Структура турбулентного пограничного слоя. Закон стенки, закон дефекта скорости и обобщенный закон распределения скорости. Теплоотдача и сопротивление пластинки при турбулентном пограничном слое в несжимаемой жидкости. Адиабатическая температура, теплоотдача и сопротивление пластинки в потоке газа высокой скорости.

10. Тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах. Основные сведения о диффузии: перенос вещества и энергии в газовых смесях. Уравнение сохранения массы отдельных компонентов и уравнение энергии для двухкомпонентных сред. Тепло- и массоотдача. Диффузионные числа подобия и тройная аналогия. Понятие о диффузионном пограничном слое. Учет химических превращений в уравнениях сохранения. Характерные случаи тепло- и массообмена при химических

превращениях.

11. Обтекание и теплоотдача тел в разреженном газе. Число Кнудсена. Взаимодействие молекул с твердыми поверхностями. Коэффициенты аккомодации. Критерии подобия. Режимы течения, их зависимость от  $Kn$ ,  $\mu$  и  $M$ . Течение при малых числах Кнудсена. Скольжение и температурный скачок. Пограничный слой с учетом скольжения и скачка температур. Течение при больших числах Кнудсена. Свободномолекулярные течения в трубах. Истечение в вакуум.

12. Теплообмен при кипении жидкости. Механизм преобразования при пузырьковом кипении. Теплоотдача при пузырьковом кипении в условиях свободной конвекции. Критическая тепловая нагрузка. Теплообмен при пленочном кипении. Режимы течения и структура двухфазного потока при кипении в трубах. Теплоотдача при кипении жидкости в трубах. Кризис теплоотдачи при кипении в трубах.

13. Теплообмен при конденсации пара. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара. Теплообмен при капельной конденсации пара. Тепло- и массообмен при конденсации пара парогазовой смеси.

14. Основные понятия и законы теплового излучения. Тепловое излучение и его свойства. Основные характеристики теплового излучения. Закон теплового излучения.

15. Теплообмен излучением в системах тел. Угловые коэффициенты излучения и способы их определения. Теплообмен излучением в простейших замкнутых системах серых тел.

Уравнение переноса излучения. Теплообмен излучением между газом и оболочкой.

## Литература

1. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Наука, 1969.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Б.М. Теоретическая физика. Т-5. М.: Наука, 1976.
3. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1983.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
5. Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Термодинамика растворов. М.: Энергия, 1980.
6. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. М.: Химия, 1981.
7. Жирифалько Л. Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975.
8. Хуанг К. Статистическая механика. М.: Мир, 1966.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978.

10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
11. Глихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
12. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979.
13. Петухов Б.С., Тенин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1974.
14. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. М.: Энергия, 1977.
15. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967.