

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур  
Российской академии наук**

Принято на Ученом совете  
ОИВТ РАН  
Протокол № 5 от 21.06.2022

**«Утверждаю»**  
Директор ОИВТ РАН



\_\_\_\_\_ академик Петров О.Ф.

\_\_\_\_\_ 2022 год

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**

кандидатского экзамена по специальности

**1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»**

по техническим наукам

Направление подготовки **«Физика и астрономия» 03.06.01**

Москва

2022 год



## Введение

В основу настоящей программы положены следующие разделы физики: термодинамика и статистическая физика; теория неравновесных процессов; физика газов и плазмы, фазовые переходы, физика твёрдого тела.

Программа составлена на основе паспорта соответствующей научной специальности номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021г. №118.

### **1. Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств чистых веществ и их смесей в широкой области параметров состояния.**

Термодинамические свойства вещества. Однокомпонентное вещество. Идеальный газ: термические и калорические свойства, их зависимость от параметров состояния. Уравнение изоэнтропы (адиабата Пуассона). Скорость звука.

Неидеальный газ - вириальные коэффициенты. Определение второго вириального коэффициента через потенциал взаимодействия. Различные виды уравнений состояния газов и жидкостей. Изотермы уравнения Ван-дер-Ваальса. Кривые Бойля и инверсии. Вычисление калорических свойств (энергия, энтальпия, теплоемкость) через уравнение состояния.

Термодинамическое подобие. Закон соответственных состояний для вириального уравнения и уравнения Ван-дер-Ваальса.

Смеси и растворы. Идеально-газовые смеси. Смеси реальных газов. Жидкие и твердые растворы.

Термодинамика твердого тела. Приближение Дебая. Определение температуры Дебая. Термодинамические функции в приближении Дебая.



Термодинамические свойства твердых тел при высоких параметрах. Сжатие холодного вещества. Трехчленное уравнение состояния.

## **2. Аналитические и численные исследования теплофизических свойств веществ в различных агрегатных состояниях.**

### **Термодинамика – основные понятия и законы.**

Первое начало термодинамики: внутренняя энергия и внешняя работа, уравнение первого начала. Энтальпия, баланс энергии для потока.

Формулировки второго начала термодинамики. Термодинамическая трактовка понятий «энтропия» и «температура». Объединенное уравнение первого и второго начал термодинамики. Изменение энтропии в необратимых процессах. Свободная энергия Гельмгольца и Гиббса. Дифференциальные соотношения для внутренней энергии, энтальпии, свободной энергии Гельмгольца и Гиббса. Соотношения Максвелла между производными термодинамических величин.

Третье начало термодинамики – тепловой закон Нернста.

Цикл Карно, максимальный КПД тепловой машины. Максимальная работа, извлекаемая из системы во внешней среде.

Элементы статистической физики. Микро- и макросостояния, функция распределения. Энтропия и температура в статистической физике. Канонический ансамбль Гиббса. Распределение Максвелла. Связь термодинамики и статистической физики: определение свободной энергии через статистическую сумму.

Статистическая сумма для молекул идеального газа. Вклад поступательного, вращательного и колебательного движений.

Черное излучение – распределение Планка для чисел заполнения. Спектральное распределение энергии. Пределы низких и высоких частот. Термодинамические величины излучения: свободная энергия, энергия, энтропия, теплоемкость.



### **3. Исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии.**

Термодинамика потока. Первое начало термодинамики для потока. Уравнение адиабатного течения. Истечение из суживающегося сопла. Сопло Лаваля. Дросселирование, эффект Джоуля-Томсона.

Работоспособность термодинамических систем. Производство работы в условиях неравновесности. Понятие об эксергии как максимальной полезной работе. Эксергия теплоты. Потери эксергии за счет неравновесных процессов.

Теплосиловые паровые циклы: цикл Карно, цикл Ренкина. Теплосиловые циклы прямого преобразования теплоты в электроэнергию.

Холодильные циклы. Обратные тепловые циклы и процессы. Холодильные установки. Цикл воздушной холодильной установки. Цикл абсорбционной холодильной установки. Тепловой насос.

### **4. Экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом.**

Экстремальные состояния вещества: их классификация, статические и динамические методы генерации. Модели вещества в экстремальном состоянии.

Неидеальная плазма, основные представления: дебаевский радиус, параметр вырождения, параметр неидеальности. Методы генерации неидеальной плазмы. Ионизационное равновесие слабоионизованной плазмы: термическая ионизация, ионизационное равновесие, формула Саха, снижение потенциала ионизации, расходимость и ограничение статистической суммы. Термодинамика плазмы с развитой ионизацией. Взаимодействие интенсивных лазерных и корпускулярных потоков с плазмой.



**5. Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей.**

Теплопроводность. Варианты граничных условий. Зависимость температуры поверхности от характера изменения теплового потока. Регулярный и квазистационарный режим прогрева.

Ламинарный режим теплообмена при внешнем обтекании. Уравнения для пограничного слоя в окрестности передней критической точки затупленного тела. Критериальный закон ламинарного теплообмена в окрестности критической точки затупленного тела, на пластине и клине. Зависимость толщин пограничных слоев от чисел Рейнольдса, Прандтля и Льюиса. Температура восстановления.

Переход ламинарного течения в турбулентное. Влияние на переход степени и масштаба турбулентности внешнего потока и шероховатости стенки. Турбулентный режим теплообмена при внешнем обтекании. Логарифмический профиль скорости в пограничном слое. Кажущаяся (турбулентная) вязкость.

Теплообмен при кипении жидкости. Пузырьковый и пленочный режимы кипения. Зависимость теплового потока от температурного напора (кривая кипения). Кризисы кипения в большом объеме.

**6. Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях.**

Фазовая диаграмма чистого вещества. Линия насыщения, кривые плавления и сублимации. Тройная и критическая точки. Уравнение Клаузиуса-Клапейрона. Различные случаи фазового равновесия (жидкость-пар, твердое тело-пар, твердое тело – жидкость). Физические свойства вещества в



окрестности критической точки: Ван-дер-ваальсова и флуктуационная теории критической точки. Фазовые переходы 2 рода.

Условие равновесия фаз. Правило фаз Гиббса. Энтропия смешения.

Жидкие растворы. Слабые растворы. Осмотическое давление.

Соприкосновение фаз растворителя. Равновесие относительно растворенного компонента. Тепловые и объемные эффекты растворения.

## **7. Экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси.**

Молекулярная физика и свойства переноса. Распределение Больцмана и барометрическая формула, распределение Максвелла. Теплоемкость идеальных газов (одно-, двух- и многоатомных), теорема о равномерном распределении по степеням свободы. Средняя длина свободного пробега молекул. Диффузия в газах, вычисление коэффициента диффузии. Теплопроводность газов. Вязкость газов (внутреннее трение). Соотношения между коэффициентами переноса.

Равновесие при переменном числе частиц, понятие о химическом потенциале. Химическое равновесие. Закон действующих масс. Константа равновесия и степень диссоциации, термическая ионизация, ионизационное равновесие, формула Саха.

## **8. Разработка методов исследования и расчета радиационного теплообмена в прозрачных и поглощающих средах.**

Теплообмен излучением. Интегральные и спектральные радиационные характеристики. Законы теплового излучения черного тела. Излучение реальных тел, закон Кирхгофа. Угловые коэффициенты излучения. Радиационный теплообмен между твердыми телами, разделенными диатермичной средой. Защитные экраны. Радиационный теплообмен между произвольно расположенными элементами поверхностей нагрева. Солнечное



излучение. Радиационный теплообмен в полупрозрачных средах. Характеристики объемного излучения, поглощения и рассеяния энергии. Лучистый теплообмен между газом и окружающей его оболочкой.

Излучение пламени. Особенности расчета радиационного теплообмена в камерах сгорания. Сложный теплообмен. Радиационно-кондуктивный и радиационно-конвективный механизмы теплообмена. Радиационный теплообмен между потоком излучающего газа и стенками канала.

## **9. Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты.**

Интенсификация теплообмена коэффициентом теплоотдачи. Механизмы переноса импульса, тепла и вещества, соотношение между ними и их влияние на интенсивность конвективного теплообмена. Влияние режима течения на интенсивность теплообмена. Способы целенаправленного изменения структуры потока с целью интенсификации теплоотдачи. Интенсификация теплоотдачи за счет нанесения искусственной шероховатости, сужения и расширения канала, спиральных вставок и т.п. Геометрия интенсификаторов. Влияние чисел Рейнольдса и Прандтля на интенсивность теплоотдачи.

Интенсификация теплообмена развитием поверхности. Оребрение, коэффициент оребрения и коэффициент эффективности ребра. Теплопроводность и теплопередача в ребрах. Контактный теплообмен и его интенсивность. Условия, тормозящие процесс интенсификации теплопередачи и методы воздействия на них.

Комбинированные методы интенсификации теплообмена. Вибрация поверхности и жидкости. Перемешивание жидкости. Вдув и отсос. Воздействие электростатическим и акустическим полем. Использование фазовых переходов: кипения, испарения, конденсации.



Тепловая защита. Механизм разрушения теплозащитных материалов в условиях радиационного и конвективного теплового воздействия. Эффективная энтальпия разрушения теплозащитного покрытия. Пористое охлаждение. Газовые завесы.

## **Литература**

1. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. М. Энергия, 1977.
2. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. Москва «Энергоатомиздат» 1983.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, Т. 5, М.: Наука, 2001.
4. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Изд-во «Наука», М. 1966.
5. Фортов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. УФН, 2007, том 177, №4, с.347.
6. Фортов В.Е. Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. М., Физматлит, 2008.
7. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2004.
8. Теория тепломассообмена: учебник для вузов/Исаев С.И. и др./; под ред. А.И. Леонтьева. Москва, изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
9. Ерофеев В.Л., Пряхин А.С., Семенов П.Д. Теплотехника. Том 1. Термодинамика и теория теплообмена. Учебник для бакалавриата и магистратуры. Москва, Юрайт, 2017.
10. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. Изд-во «Наука». Москва, 1976.



11. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. М.: Теплотехник, 2011.

12. Белозерцев В.Н. и др. Интенсификация теплообмена: учебное пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018.

13. Полежаев Ю. В., Фролов Г. А. Тепловое разрушение материалов. Киев: Из-во ИПМ НАНУ, 2005.

14. Полежаев Ю. В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. Под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1976.

СОГЛАСОВАНО:

Ученый секретарь ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.

Амиров Р.Х.

Заведующая аспирантурой, к.ф.-м.н.

Мартынова И.А.