

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

по научной работе

Драгунов В.К.

\_\_\_\_\_ 2022 г.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ  
ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В  
АСПИРАНТУРУ**

Группа научных специальностей – 2.4. Энергетика и электротехника

Научная специальность – 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники

Москва, 2022

## Раздел I. Термодинамика

### *Первый закон термодинамики*

Внутренняя энергия. Теплоперенос и совершение работы – два способа изменения внутренней энергии тела. Обобщенные силы и координаты. Энтальпия, аналитические выражения и формулировки первого закона термодинамики. Уравнение первого закона термодинамики для процессов в объеме и стационарном потоке.

### *Второй и третий законы термодинамики*

Процессы обратимые и необратимые. Термодинамические циклы. Квазициклы и разомкнутые процессы. Коэффициенты преобразования для прямых и обратных циклов. Термический КПД прямого цикла. Обратимые и необратимые циклы. Внешняя и внутренняя необратимость. Цикл Карно. Теорема Карно. Формулировки второго закона термодинамики. Энтропия. Энтропийные диаграммы состояния. Каскадные и регенеративные циклы. Возрастание энтропии в необратимых процессах. Термодинамическая шкала температур. Объединенное уравнение второго и первого законов термодинамики для систем в объеме и в потоке. Энтропия и термодинамическая вероятность. Эксергия. Виды эксергии. Эксергетический баланс системы. Эксергетический КПД.

Тепловая теорема Нернста. Энтропия при абсолютном нуле температур. Следствия из теоремы Нернста. Недостижимость абсолютного нуля.

### *Дифференциальные уравнения термодинамики*

Свойства полного дифференциала функции состояния. Уравнения Максвелла. Частные производные внутренней энергии и энтальпии. Связь между термическими и основными калорическими величинами. Частные производные теплоемкостей. Связь между изобарной и изохорной теплоемкостями.

Расчет термодинамических свойств веществ по термическому уравнению состояния.

### *Равновесие термодинамических систем и фазовые переходы*

Гомогенные и гетерогенные термодинамические системы. Термодинамическое равновесие. Критерии термодинамического равновесия при различных условиях взаимодействия системы с внешней средой. Характеристические функции, Изохорно-изотермический и изобарно-изотермический потенциал. Уравнения Гиббса-Гельмгольца. Химический потенциал, объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики для систем с переменным количеством вещества. Условия устойчивости и равновесия в изолированной системе.

Фазовые переходы в индивидуальных веществах и в растворах. Условия фазового равновесия, правило фаз Гиббса. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.

### *Термодинамические свойства веществ*

Реальные вещества как конденсирующиеся системы. Открытие Эндрюсом и Д.И. Менделеевым критической температуры. Фазовые диаграммы. Тройная и критическая точки, термические и калорические свойства твердых тел, жидкостей и газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Вириальное уравнение состояния, термодинамические свойства индивидуальных веществ на линиях фазовых переходов. Двухфазные системы, переход через двухфазную область. Стабильные и метастабильные состояния. Свойства веществ в критической точке.

Термодинамическое подобие веществ, принцип соответственных состояний. Параметры приведения. Обобщенные диаграммы и уравнения состояния для групп веществ, применение обобщенных диаграмм для малоисследованных веществ.

#### *Термодинамика стационарного потока*

Дросселирование. Эффект Джоуля-Томсона. Кривая инверсии, Адиабатное расширение реального газа с производством работы. Эффект Джоуля. Эксергетический КПД процессов расширения в дросселе и детандере. Процесс сжатия в адиабатных и неадиабатных условиях. Работа сжатия. Эксергетический КПД процессов сжатия.

#### *Специальные вопросы термодинамики*

Фазовые переходы при неодинаковых давлениях фаз. Уравнение Пойнтинга. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела. Уравнение Лапласа. Фазовые переходы второго рода. Уравнение Эренфеста.

Равновесие термодинамических систем, совершающих помимо работы расширения другие виды работы. Условия равновесия в изолированной однородной системе.

Магнетики. Общие сведения. Основные термодинамические соотношения для магнетиков. Термодинамические процессы в магнетиках. Магнитокалорический, магнитострикционный и магнитоупорный эффекты. Прямой и обратный магнитокалорические циклы.

## **Раздел II. Теория тепло- и массоперенос**

### *Теплопроводность*

Основные положения теории теплопроводности. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности, механизм теплопроводности в газах, жидкостях и твердых телах. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Классификация процессов теплопроводности.

Теплопроводность при стационарном режиме, методы расчета переноса тепла в сложных системах. Расчет передачи тепла вдоль стержней и ребер.

Теплопроводность при нестационарном режиме. Классификация нестационарных процессов. Анализ нагрева (охлаждения) полуограниченного массива, пластины, цилиндра и шара. Основы теории регулярного теплового режима. Температурные волны и периодические тепловые процессы. Принципы моделирования процессов теплопроводности.

### *Конвективный теплообмен*

Классификация и характеристика процессов конвективного теплообмена. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Основные понятия и соотношения теории пограничного слоя.

Теплообмен при внешнем обтекании тел. Анализ гидродинамики и теплообмена при продольном обтекании пластины на основе соотношений теории пограничного слоя. Расчет теплоотдачи при ламинарном движении теплоносителя в пограничном слое. Теплоотдача пластины при турбулентном пограничном слое. Аналогия Рейнольдса и ее современные модификации.

Теплоотдача в трубах и каналах. Анализ теплообмена при ламинарном режиме движения. Начальный тепловой участок и зона стабилизации теплообмена. Закономерности теплообмена при турбулентном течении.

Теплообмен при естественной (свободной) конвекции. Условие отсутствия естественной конвекции. Анализ теплообмена на основе соотношений теории пограничного слоя. Основные закономерности при ламинарном режиме для вертикальных пластин и горизонтальных труб. Теплоотдача при турбулентном движении теплоносителя в пристенном слое. Анализ процесса естественной конвекции в узких зазорах, методы расчета.

Закономерности теплообмена при поперечном обтекании труб и пучков труб. Основные особенности теплообмена при высоких скоростях движения теплоносителя. Специфика теплообмена жидких металлов. Закономерности теплообмена в сверхкритической области состояния вещества.

Основы теории подобия и моделирования. Свойства подобных процессов. Критерии подобия и уравнения подобия. Обобщение экспериментальных данных и методы моделирования процессов конвективного теплообмена. Теория размерностей.

### *Теплообмен излучением*

Основные понятия и законы. Спектр излучения черного тела - закон Планка. Интегральное излучение черного тела. Закон Стефана-Больцмана. Излучательная способность и степень черноты. Закон Кирхгофа. Интенсивность излучения и закон Ламберта.

Теплообмен излучением в диатермической среде. Перенос тепла в системе, ограниченной серыми поверхностями. Теплообмен излучением между произвольно расположенными в пространстве поверхностями.

Тепловое излучение газов. Особенности излучения и поглощения. Основное уравнение переноса лучистой энергии в поглощающей среде. Спектральная и интегральная степень черноты объема газа. Метод расчета лучистого теплообмена между газовым объемом и поверхностью твердого тела.

Сложный теплообмен как совокупность процессов теплопроводности, конвекции и излучения.

### *Теплообмен при фазовых превращениях*

Общие положения. Классификация процессов фазовых превращений. Соотношения баланса полных потоков вещества, импульса и энергии на границе

раздела фаз при фазовых переходах. Молекулярно-кинетическая интерпретация процессов фазового превращения.

Теплообмен при конденсации пара. Пленочный и капельный режимы конденсации. Теория Нуссельта и ее последующие уточнения. Теплообмен при турбулентном режиме течения конденсатной пленки. Особенности конденсации пара внутри труб.

Теплообмен при кипении жидкости. Режимы кипения. Механизм и теплоотдача при пузырьковом режиме кипения. Гидродинамическая теория первого кризиса кипения, механизм и теплоотдача при пленочном режиме кипения. Второй кризис процесса кипения.

Особенности теплообмена при плавлении и сублимации. Упрощенные схемы процессов. Анализ условий переноса тепла и закономерности теплообмена.

### *Процессы тепло- и массообмена*

Классификация процессов тепло- и массообмена. Закон Фика. Коэффициент диффузии, механизм диффузии в газах и жидкостях, молекулярный перенос энергии в бинарных системах.

Система дифференциальных уравнений конвективного тепло- и массообмена. Граничные условия на проницаемых поверхностях, диффузионный пограничный слой.

Закономерности совместного переноса массы, импульса и энергии. Анализ процессов переноса на основе соотношений теории пограничного слоя. Аналогия процессов переноса массы, импульса и энергии (тройная аналогия).

Влияние поперечного потока вещества на интенсивность процессов переноса. Приближенный расчет процессов теплообмена, массообмена и трения в условиях значительных поперечных потоков. Основные закономерности и соотношения.

## **Раздел III. Основы криофизики**

### *Принципы физики конденсированных систем*

Параметры конденсированного тела. Параметр взаимодействия. Параметр де Бройля. Концепция элементарных возбуждений. Энергетический спектр конденсированного тела. Кристаллическая решетка. Коллективные колебания кристаллической решетки. Фононы. Акустические и оптические фононы.

Теплоемкость кристаллической решетки. Модель Дебая. Плавление конденсированного тела. Критерий Линдемана. Теплопроводность кристаллической решетки (диэлектрики). Электроны в конденсированном теле. Электроны как квазичастицы. Теорема Блоха. Статистика и термодинамика электронов в конденсированном теле. Теплоемкость электронов. Зонная структура конденсированных тел.

### *Основы физики сверхпроводимости*

Основные опытные факты. Тепловые свойства сверхпроводников. Феноменологические теории сверхпроводимости: Термодинамическая теория Гортера-Казимира. Двухжидкостная модель Лондонов. Теория Гинзбурга-Ландау.

Два типа сверхпроводников. Сверхпроводники I рода в магнитном поле. Промежуточное состояние. Сверхпроводники II рода в магнитном поле: смешанное состояние, квантование магнитного потока и вихри Абрикосова. Резистивное состояние сверхпроводников и пиннинг. Жесткие сверхпроводники. Эффекты Джозефсона. Высокотемпературная сверхпроводимость.

### *Элементы физической кинетики*

Основные понятия и определения: потенциалы взаимодействия, функция распределения молекул газа по скоростям, моменты функции распределения. Связь микроскопического и макроскопического уровней описания. Кинетическое уравнение Больцмана. Основные допущения при выводе. Моменты интеграла столкновений. H-функция и H-теорема. Постановка задачи для уравнения Больцмана. Методы решения кинетического уравнения Больцмана. Решение линеаризованной одномерной стационарной задачи о переконденсации. Получение выражения для плотности потока массы  $j$ . Его асимптотики. Решение одномерной стационарной линеаризованной задачи о теплопереносе через слой разреженного газа. Выражение для теплового потока  $q$ . Его асимптотики. Кинетическое описание задач интенсивного испарения и конденсации.

### *Криовакуумная техника*

Преимущества и недостатки безмасляных средств вакуумной откачки. Характеристики традиционных сорбентов. Криооткачка трудноконденсируемых газов на слоях десублиматов. Откачка смесей трудноконденсируемых газов. Форвакуумная криооткачка.

Использование вакуумной техники и технологии в установках управляемого термоядерного синтеза, имитаторах космического пространства, установках для исследований в области физики твердого тела.

### *Основы физики сверхтекучести и процессы переноса в HeII*

Гелий – квантовая жидкость. Опытные факты и наблюдения. Термомеханический и механотермический эффекты в He-II. Соотношение Лондона. Двухскоростная модель Л.Д.Ландау : допущения (предположения) и математическое описание. Распространение звука в He-II. Система уравнений, описывающая это явление. Скорость первого и второго звука. Изменение давления и температуры в монохроматической волне 1-го и 2-го звука. Третий и четвертый звуки. Отражение звука от межфазной поверхности сверхтекучего гелия. Физическая постановка и математическое описание. Коэффициент отражения звука от межфазной поверхности сверхтекучего гелия. Предельные значения. Зависимость от коэффициента конденсации. Коэффициент проницаемости границы раздела фаз.

Постановка задачи о расчете теплообмена в He-II. Режим сопротивления П.Л.Капицы. Описание стационарного теплопереноса в He-II при ламинарном движении нормальной компоненты. Вывод уравнения, описывающего стационарный теплоперенос в He-II на основе уравнений двухскоростной гидродинамики. Критические скорости в He-II. Сила взаимного

трения Гортера-Меллинка. Физическая сущность. Качественный вывод выражения для силы. Расчет теплопереноса с учетом взаимного трения компонент сверхтекучего гелия. Расчет «восстановительного» теплового потока в He-II. Физическая постановка. Математическое описание. Результаты для цилиндрических нагревателей малого и большого диаметров.

Сверхтекучесть и бозе-конденсация. Расчет температуры начала бозе-конденсации.

#### *Физические основы охлаждения и получения низких температур*

Термомеханические эффекты. Изоэнтропное расширение. Дросселирование сжатого газа. Эффект Джоуля-Томпсона. Расширение из постоянного объема. Десорбционное охлаждение. Охлаждение с помощью откачки паров.

Магнитное охлаждение. Механокалорический эффект. Свойства парамагнитных солей. Адиабатное размагничивание. Ядерное размагничивание. Магнито- и электрокалорические методы охлаждения. Намагничивание сверхпроводников.

### **Раздел IV. Механика двухфазных потоков**

#### *Основы механики двухфазных систем*

Общая формулировка законов сохранения. Интегральная и дифференциальная формы. Законы сохранения массы, импульса, энергии для чистых веществ и бинарных смесей. Взаимодействие на границе раздела фаз: скорость движения границы раздела фаз, универсальные и специальные условия совместности.

#### *Механика простых газожидкостных структур*

Установившиеся движения дискретных частиц в жидкости. Особенности анализа простых газожидкостных структур, математическое описание. Предельные случаи при больших и малых числах Рейнольдса.

Потенциальное течение жидкости. Уравнение Лапласа для идеальной несжимаемой жидкости. Потенциал скоростей для обтекания сферы идеальной жидкостью. Парадокс Даламбера. Обтекание сферы вязкой жидкостью при малых числах Рейнольдса. Формула Стокса.

Неустановившееся движение газовой полости в жидкости. Уравнение Рэлея для расширяющейся газовой полости, его динамическая и энергетическая формы. Закономерности роста паровых пузырьков в объеме перегретой жидкости, анализ предельных схем.

#### *Двухфазные адиабатные потоки в каналах*

Режимы течения двухфазных потоков. Кинематические модели для пузырькового, снарядного и эмульсионного режимов течения. Расчет истинного объемного паросодержания. Уравнение движения одномерного двухфазного потока. Анализ составляющих гидравлического сопротивления.

Эмпирические методы расчета гидравлического сопротивления двухфазных потоков.

Особенности дисперсно-кольцевого режима течения. Уравнение движения для вертикального кольцевого режима. Расчет толщины пленки. Качественные закономерности кольцевых течений в горизонтальных каналах.

Гидравлическая неустойчивость при движении газожидкостных потоков в одиночном канале и в системе параллельных каналов.

#### *Неадиабатные двухфазные потоки в каналах*

Изменение паросодержания и смена режимов течения по длине обогреваемых каналов. Балансовое и действительное паросодержание в неравновесных потоках. Уравнение энергии для равновесного потока. Влияние изменения паросодержания на гидравлическое сопротивление. Кризис кипения в каналах. Особенности гидродинамики и теплообмена при захлаживании трубопроводов потоком криогенной жидкости.

### **Раздел V. Основы низкотемпературной трансформации тепла**

#### *Термодинамические основы низкотемпературной трансформации тепла*

Роль и назначение трансформаторов тепла.

#### *Парожидкостные компрессионные трансформаторы тепла*

Основные особенности схем и процессов реальных парожидкостных компрессионных трансформаторов тепла и их отличия от идеальных. Схемы одноступенчатых и многоступенчатых установок и области их применения. Удельные энергзатраты и КПД парожидкостных компрессионных трансформаторов. Холодильные коэффициенты и коэффициенты трансформации.

#### *Абсорбционные трансформаторы тепла*

Принцип действия и основные схемы абсорбционных трансформаторов тепла. Схемы и процесс работы реальных абсорбционных трансформаторов тепла непрерывного действия.

#### *Газожидкостные трансформаторы тепла*

Низкотемпературное разделение газовых смесей. Особенности криорефрижераторов, систем сжижения и замораживания. Криорефрижераторы с различными сочетаниями ступеней предварительного и окончательного охлаждения. Свойства газовых смесей и характеристики методов их разделения. Идеальные процессы низкотемпературного разделения газовых смесей, технические процессы низкотемпературного разделения смесей.

### **Рекомендуемая литература**

#### **Основная литература**

1. Техническая термодинамика /В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А.Е. Шейндлин. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 496 с.
2. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. Учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 542с.



3. Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. –М.: Физматлит, 2014. 731с.
4. Дмитриев А.С. Основы криофизики конденсированных систем. Учебное пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2006. 134с.
5. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
6. Крюков А.П. Процессы переноса в существенно неравновесных системах. М.: МЭИ, 2013. 124с.
7. Справочник по вакуумной технике и технологиям. Под ред. Д.Хоффман, Б.Сингха, Дж.Томаса III. Перевод с английского Ю.Л.Цвирко под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова. М.: ТЕХНОСФЕРА. 2011. 736с.

#### **Дополнительная литература**

8. Красникова О.К. Витые теплообменные аппараты криогенных и теплоэнергетических установок. М.: КолосС, 2008. 176 с.
9. Применение многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературной технике / Лунин А. И., Могорычный В. И., Коваленко В. Н. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. 100с.
10. Холодильные машины: Учебник /Под ред. Л.С. Тимофеевского. СПб.: Изд-во «Политехника», 1997.
11. Теплотехника / Под общей редакцией А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 792 с.
12. Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Формы межфазных поверхностей при переносе массы, импульса, энергии. М.: Издательство МЭИ, 2015.
13. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.:БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 790с.
14. Некоторые задачи теплообмена в однофазных и двухфазных системах, М.: Изд-во МЭИ. 2015 – 80с.

«Согласовано»  
Директор ИТАЭ  
д.т.н., член-кор РАН

Дедов А.В.