

**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 – 1.3. Физические науки

Научная специальность – 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Москва, 2022

Программа специальной дисциплины по кафедрам АЭС, ИТФ, НТ, ОФиЯС, ТОТ

1. Термодинамика

Термодинамика и ее метод. Параметры состояния. Понятие о термодинамическом процессе. Идеальный газ. Законы идеального газа. Смеси идеальных газов.

Первый закон термодинамики. Теплота. Опыт Джоуля. Эквивалентность теплоты и работы. Закон сохранения и превращения энергии. Внутренняя энергия и внешняя работа. Энтальпия. Обобщенные силы и обобщенные координаты. Уравнение первого закона термодинамики.

Второй закон термодинамики. Циклы. Понятие термического КПД. Источники теплоты. Обратимые и необратимые процессы. Формулировка второго закона термодинамики. Цикл Карно. Теорема Карно. Термодинамическая шкала температур. Энтропия. Изменение энтропии в необратимых процессах. Объединенное уравнение первого и второго законов термодинамики. Энтропия и термодинамическая вероятность.

Дифференциальные уравнения термодинамики. Основные математические методы термодинамики. Уравнение Максвелла. Частные производные внутренней энергии и энтальпии. Теплоемкости.

Равновесие термодинамических систем и фазовые переходы. Гомогенные и гетерогенные термодинамические системы.

Термодинамическое равновесие. Условия фазового равновесия. Фазовые переходы. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела.

Термодинамические свойства веществ. Термические и калорические свойства жидкостей. Критическая точка. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Термические и калорические свойства реальных газов и влажного воздуха. Уравнение состояния реальных газов. Термодинамические свойства веществ на линии фазовых переходов и в критической точке. Термодинамические свойства вещества в метастабильном состоянии.

Основные термодинамические процессы. Изохорный процесс. Изобарный процесс. Изотермический процесс. Политропные процессы. Дросселирование, эффект Джоуля — Томпсона. Адиабатическое расширение реального газа в вакуум (процесс Джоуля). Процесс смешения. Процессы сжатия в компрессоре.

Процессы истечения газов и жидкостей. Параметры торможения. Сопло, диффузор. Полное и статическое давление. Уравнение Бернулли. Число Маха. Показатель адиабаты.

Термодинамические циклы. Термический КПД. Эксергия. Циклы Карно, Отто, Дизеля, Брайтона, Ренкина. Регенерация теплоты в цикле.

Холодильные циклы. Обратные тепловые циклы и процессы. Холодильные установки. Цикл воздушной холодильной установки. Цикл парокомпрессионной холодильной установки. Цикл парозжекторной холодильной установки. Понятие о цикле абсорбционной холодильной установки. Цикл термоэлектрической холодильной установки. Принцип работы теплового насоса. Методы сжижения газов.

Основы химической термодинамики. Термохимия. Закон Гесса. Уравнения Кирхгофа. Химическое равновесие и второй закон термодинамики. Константы равновесия и степень диссоциации. Тепловой закон Нернста.

2. Тепло- и массообмен

Теплопроводность. Уравнение сохранения энергии, закон Фурье, краевые условия задач теплопроводности. Механизм теплопроводности веществ в твердом (кристаллическом и аморфном), жидком и газообразном состояниях. Теплопроводность через плоскую стенку. Число Био. Коэффициент теплопередачи. Теплопроводность через цилиндрическую стенку, критический диаметр изоляции. Нестационарное температурное поле в плоской пластине, регулярный режим охлаждения (нагрева) тел. Метод перемножения решений.

Конвективный теплообмен в однокомпонентной среде. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в сплошной среде. Эмпирические законы переноса (Ньютона, Фурье, Фика). Приведение уравнений к безразмерному виду, критерии подобия. Физический смысл чисел подобия конвективного тепло- и массообмена. Тройная аналогия.

Теплообмен при внешнем обтекании тела. Система уравнений теплового пограничного слоя. Анализ теплообмена при ламинарном течении в пограничном слое методами размерностей. Автомодельное решение Польшаузена. Соотношения для расчета теплообмена при различных числах Прандтля. Условные толщины пограничного слоя. Интегральные уравнения импульса и энергии.

Переход ламинарного течения в турбулентное, влияние на турбулентный переход параметров набегающего потока, массовых сил, характеристик обтекаемой поверхности. Теоретические и экспериментальные аспекты перехода ламинарного течения в турбулентное. Осредненные уравнения движения и энергии для турбулентного течения. Кажущиеся напряжения турбулентного трения,

турбулентный тепловой поток. Структура пристенной турбулентной области. Аналогия Рейнольдса для теплообмена при турбулентном течении в пограничном слое, ее модернизированный вариант (двухслойная схема), расчетные соотношения для теплоотдачи. Конвективный теплообмен при высоких скоростях течения. Адиабатическая температура стенки, коэффициент восстановления, методы расчета теплоотдачи. Теплообмен на проницаемой поверхности. Теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра и пучков труб.

Теплообмен при течении жидкости в каналах. Математическое описание, среднемаассовая скорость и температура. Стабилизированный теплообмен при граничных условиях 2-го рода. Профили скорости, температуры, теплового потока при ламинарном и турбулентном течении, интеграл Лайона. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в начальном термическом участке круглой трубы. Начальный гидродинамический участок. Стабилизированный теплообмен при ламинарном течении. Стабилизированный теплообмен при турбулентном течении, результаты исследований для неметаллических жидкостей и жидких металлов, расчетные формулы. Влияние переменности свойств жидкости на теплообмен при течении капельных жидкостей и газов в трубах.

Теплообмен при свободной конвекции. Механизм и математическое описание, приближение Буссинеска. Развитие пограничного слоя на вертикальной плоской поверхности, расчет коэффициента теплоотдачи. Свободная конвекция на поверхности горизонтального цилиндра и сферы. Свободная конвекция в замкнутых объемах; теплопередача через прослойку.

Теплообмен при фазовых превращениях. Математическое описание и модели двухфазных сред. Универсальные условия совместности на межфазных границах. Специальные условия совместности для процессов тепло- и массообмена. Неравновесность на межфазных границах, квазиравновесное приближение.

Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной поверхности: решение Нуссельта, анализ основных допущений. Конденсация на поверхности горизонтального цилиндра. Конденсация движущегося пара. Качественные закономерности капельной конденсации.

Кипение жидкостей. Условия зарождения парового зародыша в объеме перегретой жидкости и на твердой поверхности нагрева. Основные закономерности роста и отрыва паровых пузырьков. «Кривая кипения». Теплообмен при пузырьковом кипении в большом объеме, теплообмен при пленочном кипении. Кризисы кипения в большом объеме.

Режимы течения двухфазных потоков в трубах. Характер изменения среднемаассовой температуры жидкости, температуры стенки, расходного массового паросодержания по длине обогреваемого канала. Кипение жидкости,

недогретой до температуры насыщения. Кризис теплоотдачи при кипении в трубах.

Совместные процессы тепло- и массопереноса. Общая характеристика процессов переноса массы и энергии. Состав смеси, диффузионные потоки, коэффициент диффузии. Перенос энергии и импульса в смеси.

Аналогия процессов тепло- и массообмена. Расчет интенсивности переноса энергии и массы компонента при умеренных и высоких скоростях массообмена.

Тепло- и массообмен при химических превращениях. Диффузия, сопровождаемая гомогенной или гетерогенной химической реакцией. Процессы на поверхности тела, обтекаемого гиперзвуковым потоком газа.

Сублимация поверхности тела, обтекаемого высокотемпературным газовым потоком. Коэффициент аккомодации. Зависимость скорости сублимации от температуры поверхности тела.

Термическое разложение тела, обтекаемого высокотемпературным потоком химически активного газа.

Химическое взаимодействие на поверхности тела, обтекаемого высокотемпературным газовым потоком.

Разрушение композиционных материалов в высокотемпературном газовом потоке. Взаимодействие процессов горения и испарения.

Теплообмен излучением. Основные понятия и законы излучения, Природа излучения. Интегральная и спектральная плотности потока излучения. Поглощательная, отражательная и пропускательная способности тел. Абсолютно черное тело.

Законы теплового излучения (Планка, Вина, Стефана — Больцмана, Кирхгофа, Ламберта). Излучение реальных тел. Радиационные свойства реальных материалов.

Теплообмен излучением в диатермичной среде. Геометрия излучения (локальные и средние угловые коэффициенты). Зональный метод расчет теплообмена в системе тел, разделенных прозрачной средой.

Теплообмен излучением в поглощающих и излучающих средах. Излучение и поглощение в газах. Основной закон переноса энергии излучения в излучающе-поглощающей среде. Собственное излучение газа. Методы расчета теплообмена.

3. Основы расчета теплообменных аппаратов и средств тепловой защиты

Современные теплообменные системы: парогенераторы тепловых электрических станций, ядерные энергетические реакторы, камеры сгорания ракетных двигателей, бланкет термоядерного реактора. Теплообменные аппараты: рекуперативные, регенеративные, смесительные.

Уравнения теплового баланса и теплопередачи. Средний температурный напор. Расчет поверхности теплообмена, конечной температуры теплоносителей. Основы гидравлического расчета теплообменников. Определение мощности, затрачиваемой на прокачку теплоносителей.

Особенности выбора средств и методов тепловой защиты. Способ тепловой защиты от конвективного и совместного (конвективно-лучистого) нагрева.

Проникающее охлаждение. Эффект вдува. Теплообмен между пористой матрицей и фильтрующимся охладителем.

4. Теплогидравлические процессы в современных и перспективных энергетических установках и методы их интенсификации

Теплообмен в элементах термоядерных реакторов в условиях высокоинтенсивных тепловых потоков. Теплообмен и гидродинамика в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов нового поколения. Интенсификация теплообмена при конденсации пара на горизонтальных и вертикальных трубах.

Теплообмен при струйном натекании теплоносителя на стенку. Теплообмен и гидродинамика в пористых вставках. Теплообмен и гидродинамика при кипении недогретой воды в каналах малого размера.

Характеристики теплообмена при кипении наножидкостей. Методы модификации поверхности теплообмена. Кипение на поверхности с рельефом.

Методы интенсификации теплообмена в высокоэффективных компактных теплообменных аппаратах. Влияние витых труб, лунок и накатки на теплоотдачу, гидравлическое сопротивление и отложения в теплообменниках. Интенсификация теплообмена при обтекании поверхности высокотемпературным потоком газа.

Усовершенствование термостабилизатора круглогодичного действия за счет интенсификации теплообмена в его испарителе. Использование в термостабилизаторе круглогодичного действия термоэлектрического модуля. Требуемые характеристики ТКД для условий вечномерзлых грунтов.

Методы интенсификации теплообмена в испарителях. Влияние пористого покрытия на теплоотдачу при кипении в условиях пониженных давлений и массовых скоростей. Интенсификация теплообмена в спиральных трубах.

Теплообмен и гидродинамика при до- и сверхзвуковом обтекании поверхности с лунками. Охлаждение нагретых тел в наножидкостях. Влияние микропористых покрытий на характеристики охлаждения нагретых тел.

5. Современные методы и средства исследования теплофизических свойств веществ

Классические современные стационарные методы исследования коэффициента теплопроводности, изобарной и изохорной теплоемкости. Методы получения P-V-T данных в широкой области параметров, включая критическую точку. Методы измерения скорости звука.

Методы регулярного и монотонного режимов и их практическая реализация. Динамические методы измерения теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности материалов. Комплексные динамические методы.

Особенности поведения вещества при импульсном тепловом воздействии. Методы, использующие импульсный нагрев проводящих материалов электрическим током. Методы с лазерным локальным импульсным нагревом. Методы и средства измерения быстроизменяющихся высоких температур и других параметров в импульсном эксперименте.

Дисперсные материалы. Факторы, влияющие на свойства. Методы исследования эффективных свойств дисперсных материалов. Методы исследования свойств малых количеств материалов. Исследование свойств таких материалов, как графен. Теплоизоляционные материалы, методы исследования свойств. Методы исследования агрессивных материалов.

Примеры отечественных и зарубежных c , λ - калориметров, вискозиметров, пьезометров, пирометров и термографов.

6. Процессы тепломассопереноса при фазовых превращениях

Математическое описание и модели двухфазных систем. Количественные характеристики двухфазных потоков и режимы течения в вертикальных, горизонтальных и наклонных каналах. Определение границ режимов течения. Гидравлическое сопротивление двухфазных потоков квазигомогенной структуры. Кольцевые двухфазные течения. Эмпирические методы расчета двухфазных потоков.

Методы интенсификации теплообмена при конденсации пара и парогазовой смеси. Конденсация пара на оребренных трубах: механизм интенсификации теплообмена, расчет коэффициентов теплоотдачи.

Теплообмен при капельной и псевдокапельной конденсации. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при конденсации движущегося пара в оребренных трубах. Методы интенсификации теплообмена при кипении жидкости в большом объеме и в условиях вынужденного движения в трубах.

7. Численные методы расчета и моделирование тепломассообменных процессов в современном энергетическом и промышленном оборудовании

Законы сохранения массы, импульса, энергии, массы компонента в смеси как частные случаи общего закона сохранения. Обобщенное уравнение переноса (ОУП), выражающее закон сохранения в дифференциальной форме. Физический смысл отдельных членов ОУП. Особенности системы уравнений Навье-Стокса, записанной в естественных переменных, с позиций их численного решения. Решение уравнений гидродинамики в переменных «завихренность — функция тока». Получение уравнения Пуассона для давления. Преимущества и недостатки численного решения уравнений гидродинамики, записанных относительно различных переменных.

Методы конечных разностей, взвешенных невязок, вариационный метод. Физический смысл и достоинства консервативного метода контрольного объема (МКО) как частного случая метода взвешенных невязок. Дискретизация пространства и времени. Методы построения расчетной сетки. Узловые точки и грани контрольных объемов (КО). Интегрирование ОУП по КО и интервалу времени. Выбор базисных (интерполяционных) функций. Явные и неявные схемы. Линеаризация источникового члена ОУП.

Центрально-разностная схема и схема с разностями «против потока» для аппроксимации компонент вектора полного потока на гранях КО. Решение ОУП с разрывными коэффициентами для одномерной стационарной задачи конвекции и диффузии. Устойчивость численных схем. Локальноодномерные аппроксимации для компонент вектора полного потока в многомерных задачах. Дискретный аналог ОУП для задач конвекции и диффузии. Алгоритм SIMPLE. Уравнение для поправки давления. Краевые условия для поправки давления. «Мягкие» выходные условия. Особенности алгоритмов SIMPLER, SIMPLEC, PISO. Метод нижней релаксации для получения сходящегося решения. Схемная диффузия. Причины возникновения схемной диффузии. Методы подавления схемной диффузии. Методы решения сопряженных задач тепломассообмена в областях сложной геометрической формы. Метод заблокированных контрольных объемов. Аналогия между итерационным методом и методом установления при решении стационарных задач гидродинамики и тепломассообмена.

История создания CFD-кодов, их классификация. Архитектура современных CFD-кодов: Препроцессор, Генератор сетки, Решатель (Солвер), Постпроцессор. Открытые и коммерческие CFD-коды. Краткая характеристика открытого кода OpenFOAM. Представление полей искомых переменных. Структурное хранение сеточных переменных и неструктурная сетка. Неструктурное хранение в виде дерева.

Метод поправки и отложенной коррекции. Линейные «солверы» при структурном хранении сеточных переменных. Линейные «солверы» при неструктурном хранении. Параллельные вычисления. Методы распараллеливания. Декомпозиция расчетной области. Инструменты для параллельного программирования OpenMP и MPI.

Криволинейные системы координат. Многоблочные сетки. Адаптивные сетки. Полностью неструктурные сетки. Дробные КО.

Архитектура кода ANES. Классы моделируемых задач тепломассообмена. Используемые расчетные сетки для описания геометрически сложных объектов. Описание физических свойств веществ, включая коэффициенты переноса. Задание источниковых членов. Задание краевых условий. Выбор реализованных в коде алгоритмов и математических моделей. Мониторинг процесса решения. Представление результатов расчета.

Краткий обзор экспериментальных данных о структуре турбулентных течений. Пристеночная турбулентность. Проблемы численного моделирования турбулентности. Методы прямого моделирования турбулентных течений (DNS). Моделирование крупных вихрей (LES).

Классификация математических моделей турбулентности. Алгебраические, одно- и многопараметрические модели. Стандартная диссипативная k-ε модель турбулентности для высоких турбулентных чисел Рейнольдса. Метод пристеночных функций. Современные k-ε модели для низких турбулентных чисел Рейнольдса. Дифференциальные модели. Аппроксимация диффузионных и источниковых членов. Алгебраические модели Лондера.

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

Дедов А.В.