

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

“УТВЕРЖДАЮ”

Заведующий отделом ОПКВК



В.П. Драгунов

17 декабря 2022 г.

ПРОГРАММА - МИНИМУМ

кандидатского экзамена по специальности

1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Степень: кандидат наук

Отрасль науки: технические науки

Новосибирск, 2022 г.

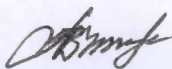
Программа кандидатского экзамена составлена на основании федеральных государственных требований к структуре основной образовательной программы послевузовского профессионального образования (аспирантура) согласно паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Приказ МНиВО Российской Федерации № 118 от 24.02.2021.

Программа кандидатского экзамена обсуждена на заседании
ученого совета факультета летательных аппаратов
протокол № 8 от 26 декабря 2022 г.

Программу разработал

Профессор кафедры ТТФ,

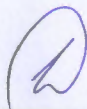
д.т.н., профессор



А.В. Чичиндаев

Декан ФЛА,

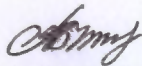
д.т.н., доцент



Д.А. Чинахов

Ответственный за основную
образовательную программу

д.т.н., профессор



А.В. Чичиндаев

ОСНОВНАЯ ПРОГРАММА

Введение

В основу данной программы положены следующие дисциплины: теплофизические свойства веществ, термодинамические процессы, процессы переноса тепла и массы в сплошных и разреженных гомогенных и гетерогенных средах.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по энергетике, электрификации и энергетическому машиностроению при участии Объединенного института высоких температур РАН.

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 парожektorной 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 Польгаузена. 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, среднемассовая 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 среднemasсовой 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 расчета 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, blankets термоядерного реактора. Теплообменные аппараты: рекуперативные, регенеративные, смешительные.

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. Способы тепловой защиты от конвективного и совместного (конвективно-лучистого) нагрева.

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

Список литературы

Основной список

1. Ансельм А. И. Основы статистической физики и термодинамики : [учебное пособие для вузов по физическим и техническим направлениям и специальностям] / А. И. Ансельм. - СПб., 2007. - 423, [3] с. : ил.
2. Теплопередача. Ч. 1 : [учебное пособие] / [В. С. Чередниченко [и др.] ; под ред. В. С. Чередниченко ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2007. - 231 с. : ил.. - Инновационная образовательная программа НГТУ "Высокие технологии".
3. Теплопередача. [В 2 ч.]. Ч. 2 : [учебное пособие / В. С. Чередниченко и др.] ; под общ. ред.: В. С. Чередниченко и А. И. Алиферова ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2007. - 378 с. : ил., табл.. - Инновационная образовательная программа НГТУ «Высокие технологии»
4. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., исп. и доп. - М: Издательство МЭИ. – 2005.
5. Волчков Э. П. Тепломассообмен в пристенных течениях : учебник / Э. П. Волчков, В. П. Лебедев. - Новосибирск, 2003. - 242 с. : ил.
6. Терехов В. И. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках : [монография] / В. И. Терехов, М. А. Пахомов. - Новосибирск, 2008. - 283 с. : ил.

7. Чичиндаев А. В. Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках / А. В. Чичиндаев. - Новосибирск, 2009. - 297 с. : ил.

Дополнительный список

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Болгарский А. В. Термодинамика и теплопередача : [учебник для авиационных специальностей вузов] / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. - М., 1975. - 495 с. : ил., схемы
3. Базаров И. П. Термодинамика : Учебник для физ. спец. ун-тов. - М., 1983. - 344 с. : ил.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
5. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
6. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
7. Чичиндаев А. В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Ч. 1 : учебное пособие [для 2-4 курсов ФЛА (направления 551000, 551013, 551014, специальности 130100, 130300, 131100) дневного отделения] / А. В. Чичиндаев. - Новосибирск, 2003. - 399 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА

I. Техническая термодинамика

1. Основные термодинамические понятия. Термодинамические системы, окружающая среда, взаимодействие между ними. Равновесное состояние. Параметры (функции) состояния. Внутренняя энергия. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные процессы.
2. Первый закон термодинамики как форма закона сохранения и превращения энергии. Виды энергии и формы обмена энергией. Механическая работа и другие виды работ. Теплота как форма обмена энергией. Выражение количества работ и теплоты в равновесных процессах через параметры системы и их изменение в бесконечно малых и конечных процессах. Работа и теплота как функция процессов. Понятие о термодинамических координатах и потенциалах взаимодействия. Энтропия как термическая координата состояния. Основное термодинамическое равенство для равновесных процессов. Уравнение первого закона термодинамики для проточной системы. Энтальпия, работа проталкивания, техническая работа, располагаемая работа.
3. Уравнения состояния термодинамических систем. Термические и калорические уравнения состояния. Общие свойства уравнений состояния. Термические коэффициенты: изотермической сжимаемости, термической упругости, термического расширения. Условие механической стабильности. Понятие о термодинамической поверхности и линиях термодинамических процессов. Уравнения Клапейрона-Менделеева и Ван-дер-Ваальса как примеры уравнений состояния.
4. Понятие теплоемкости. Зависимость теплоемкости от характера термодинамического процесса. Выражение изохорной и изобарной теплоемкостей через производные от энергии и энтальпии по температуре. Мольная, массовая и объемная удельные теплоемкости. Зависимость теплоемкости идеальных газов от температуры. Истинная и средняя теплоемкости. Теплоемкость смеси идеальных газов.
5. Второй закон термодинамики. Термодинамическая обратимость и необратимость. Изменение энтропии в необратимых процессах. Термодинамическое неравенство.

- Условия взаимного превращения теплоты и работы в прямых и обратных термодинамических циклах. Термический коэффициент прямого цикла и холодильный коэффициент обратного цикла. Цикл и теорема Карно. Формулировки второго закона термодинамики. Термодинамическая шкала температур. Понятие о вероятности термодинамического состояния и связь вероятности состояния с энтропией.
6. Термодинамика твердых тел. Формула Дебая. Уравнение состояния и теплоемкость. Плавление.
 7. Влияние необратимости на эффективность термодинамических циклов. Характеристические термодинамические функции. Понятие о характеристических термодинамических функциях. Характеристические функции как термодинамические потенциалы. Внутренняя энергия, энтальпия, изохорно-изотермический потенциал, изобарно-изотермический потенциал как характеристические функции. Возможность выражения термических и калорических свойств системы через характеристические функции. Уравнения Гиббса-Гельмгольца. Соотношения Максвелла.
 8. Дифференциальные соотношения термодинамики в частных производных. Дифференциальные выражения для внутренней энергии, энтальпии и энтропии через температуру, объем и давление как независимые переменные. Понятие о вычислении значений термодинамических функций идеального газа и реальных веществ. Внутренняя энергия, энтальпия и энтропия идеального газа. Дифференциальные соотношения для теплоемкостей. Связь между изобарной и изохорной теплоемкостями. Зависимость изобарной теплоемкости от давления и изохорной теплоемкости от объема. Использование данных о теплоемкостях для установления эмпирических уравнений состояния.
 9. Термодинамическое равновесие. Сложные термодинамические системы с фазовой и химической неоднородностью. Основное уравнение термодинамики для сложной системы. Химический потенциал. Условия равновесия сложной системы при различных сопряжениях с окружающей средой. Принцип минимальности характеристических функций. Связь принципа минимальности с принципом возрастания энтропии в неравновесных процессах. Условия термодинамического равновесия в гомогенных химически неоднородных системах. Условия термодинамического равновесия в многофазных многокомпонентных системах. Правило фаз Гиббса. Фазовые переходы первого рода. Условия равновесия фаз. Критическая точка. Фазовые диаграммы чистого вещества. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Понятие о фазовых переходах второго рода. Термодинамическая теория Ландау фазовых переходов второго рода.
 10. Термодинамические свойства чистых веществ. Качественные отличия свойств реальных газов от идеальных. Диаграмма Амага и точки Бойля. Изотермы Эндрюса. Критическое термодинамическое состояние. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Метастабильные состояния, правило Максвелла. Приведенные параметры состояния, приведенные уравнения Ван-дер-Ваальса. Принцип соответственных состояний и термодинамическое подобие. Понятие о коэффициенте сжимаемости и критическом коэффициенте. Понятие об общей форме уравнения состояния реальных газов - Майера-Боголюбова и о вириальных уравнениях состояния.
 11. Неидеальные газы. Разложения по степеням плотности. Вириальные коэффициенты.
 12. Термодинамические свойства веществ на линии фазовых переходов. Термодинамические свойства перегретого пара и влажного пара. Форма пограничных кривых. Понятие о методах расчета энтропии, энтальпии и внутренней энергии реальных веществ с использованием данных о термических свойствах. Термодинамические диаграммы состояния объем - давление, объем - температура, энтропия - энтальпия, давление - энтальпия.
 13. Основные термодинамические процессы. Объем расчета термодинамического процесса. Процессы: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный,

- политропный. Определение параметров состояния, изменения термодинамических функций в процессе, количества теплоты, работы, располагаемой работы в случае идеального газа и реальных веществ.
14. Использование диаграмм для расчета процессов. Процессы смешения газов в потоке и в объеме.
 15. Дросселирование. Описание процесса. Эффект Джоуля-Томсона. Дифференциальный и интегральный дроссель-эффекты. Точки и кривая инверсии.
 16. Термодинамика одномерного потока. Основные допущения. Уравнение энергии потока в термической и механической формах. Адиабатическое течение без трения. Связь скорости течения с энтальпией, температурой и давлением в потоке. Параметры торможения. Течение по каналам переменного сечения. Критический перепад давления, переход через скорость звука. Сопло Лаваля. Понятие об обращении воздействий. Исследование процессов течения газов и паров с помощью энтропийных диаграмм.
 17. Термодинамический анализ работы компрессоров. Идеальный и реальный поршневой компрессоры. Работа привода компрессора. Многоступенчатые компрессоры. Выбор степени повышения давления в ступени. Изображение рабочих процессов компрессора в энтропийных диаграммах. Понятие о работе центробежных и осевых компрессоров. Влияние трения на показатели работы компрессора.
 18. Силовые термодинамические циклы. Циклы двигателей внутреннего сгорания. Влияние параметров циклов на их термический КПД. Цикл с внешним подводом тепла (Стирлинга). Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей. Регенеративные циклы, паросилового цикл Ренкина. Влияние давления и перегрева пара на термический КПД. Понятие о теплофикационном цикле. Понятие о цикле МГД установки.
 19. Холодильные (обратные) циклы. Циклы холодильной машины и теплового насоса. Показатели эффективности обратных циклов. Циклы воздушной и парокомпрессионной холодильных установок. Понятие о методах получения сжиженных газов.
 20. Влажный воздух. Характеристики состояния влажного воздуха. Абсолютная и относительная влажность. Диаграмма состояний влажного воздуха. Подсчет параметров состояния влажного воздуха. Процессы нагревания, охлаждения, увлажнения и осушки.
 21. Элементы химической термодинамики. Применение первого закона термодинамики к химическим процессам. Закон Гесса. Уравнение Кирхгофа. Применение условий термодинамического равновесия к химическим реакциям. Константа равновесия для гомогенных газовых реакций, закон действующих масс. Степень диссоциации и ее связь с константами равновесия. Термическая диссоциация, ионизация, возбуждение. Понятие о максимальной работе химической реакции. Понятие о тепловом законе Нернста.

II. Теплопроводность

1. Основные положения учения о теплопроводности. Тепловой поток. Методы изучения физических явлений. Гипотеза Фурье. Коэффициент теплопроводности. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности для процессов теплопроводности.
2. Теплопроводность при стационарном режиме. Краевые задачи для простейших тел. Объемные и поверхностные источники тепла.
3. Передача тепла через плоскую стенку при граничных условиях I, II и III рода.
4. Передача тепла через цилиндрическую стенку при граничных условиях I, II и III рода. Критический диаметр цилиндрической стенки. Передача тепла через шаровую стенку.

Обобщенный метод решения задач теплопроводности в плоской, цилиндрической и шаровой стенках. Теплопроводность в стержне постоянного поперечного сечения. Теплопередача через ребристую плоскую стенку. Теплопроводность плоской полуограниченной пластины. Теплопроводность пористой охлаждаемой пластины. Теплопроводность при наличии внутренних источников тепла.

5. Нестационарные процессы теплопроводности. Методы решения линейных краевых задач. Простейшие задачи для конечных и бесконечных областей. Нестационарная теплопроводность неограниченной пластины. Определение количества тепла, отданного пластиной в процессе охлаждения. Нестационарная теплопроводность бесконечно длинного цилиндра. Определение количества тепла, отданного цилиндром в процессе охлаждения. Охлаждение шара. Охлаждение (нагревание) тел конечных размеров. Регулярный режим охлаждения (нагрева) тел. Приближенные методы решения задач теплопроводности. Исследование процессов теплопроводности методом аналогий.
6. Нелинейные задачи теплопроводности. Автомодельные решения. Тепловые волны. Приближенные и численные методы решения задач теплопроводности. Явные и неявные конечно-разностные схемы.

III. Тепло- и массообмен

1. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена и массообмена и условия однозначности. Система уравнений гидродинамического, теплового и диффузионного пограничного слоя. Турбулентный перенос количества движения, тепла и массы.
2. Теория подобия и метод анализа размерностей в теплопередаче. Вывод критериев подобия и критериальных уравнений теплообмена. Условия подобия физических процессов. Метод анализа размерностей.
3. Теплообмен при свободной конвекции. Теплоотдача при свободном ламинарном движении вдоль вертикальной пластины. Теплоотдача при турбулентном движении. Теплоотдача при свободном движении около горизонтальной трубы. Теплообмен при свободном движении жидкости в ограниченном пространстве.
4. Теплоотдача при вынужденном ламинарном течении жидкости. Ламинарное течение жидкости в трубе. Теплоотдача плоской пластины при постоянной температуре поверхности. Учет переменности физических параметров. Автомодельные решения уравнений ламинарного пограничного слоя. Приближенные методы для произвольных законов изменения скорости и температуры стенки. Интегральные соотношения импульсов и энергии. Закон теплообмена. Особенности теплообмена при течении газа со сверхзвуковыми скоростями. Коэффициент восстановления. Закон теплообмена.
5. Теплоотдача при вынужденном турбулентном течении жидкости. Переход ламинарного течения в турбулентное. Полуэмпирические теории турбулентности. Интегральное уравнение теплоотдачи для стабилизированного течения жидкости в трубе. Законы теплообмена для турбулентного пограничного слоя. Влияние переменных физических свойств на законы теплообмена. Теплообмен в турбулентном пограничном слое при внешнем обтекании тел. Гидродинамическая аналогия Рейнольдса. Влияние шероховатости на теплоотдачу.
6. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб. Теплоотдача при поперечном омывании одиночной круглой трубы. Теплоотдача при поперечном омывании пучка труб.
7. Теплоотдача в разреженных газах. Коэффициент аккомодации. Коэффициент скольжения. Области течения. Теплообмен в свободном молекулярном потоке и в области течения со скольжением.
8. Теплообмен при конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной стенке. Конденсация на горизонтальной трубе. Теплообмен при пленочной конденсации движущегося пара

внутри труб, на горизонтальных одиночных трубах и пучках труб. Теплообмен при конденсации пара из парогазовой смеси. Тройная аналогия между процессами переноса импульса, тепла и массы. Диффузионный пограничный слой. Теплообмен при капельной конденсации пара.

9. Теплообмен при кипении однокомпонентных жидкостей. Режимы кипения жидкости. Механизм процесса теплообмена при пузырьковом кипении жидкости. Возникновение активной паровой фазы. Отрывной диаметр пузыря. Скорость роста и частота отрыва пузырей от поверхности нагрева. Зависимость теплового потока от температурного напора. Зависимость теплоотдачи от давления и теплофизических свойств. Влияние скорости циркуляции. Теплоотдача при пузырьковом кипении жидкости в условиях свободного движения. Структура двухфазного потока и теплообмена при кипении жидкости внутри труб.
10. Кризисы кипения. Механизм теплообмена при пленочном кипении жидкости. Теплоотдача при ламинарном движении паровой пленки. Теплоотдача при турбулентном движении паровой пленки.
11. Тепло- и массообмен при химических превращениях. Основные сведения о химических превращениях. Система уравнений пограничного слоя. Теплообмен между газовой смесью и поверхностью раздела фаз. Тепло- и массообмен при сублимации и испарении с поверхности теплообмена.
12. Теплообмен излучением. Основные законы теплового излучения. Закон Планка. Закон Стефана-Больцмана. Закон Кирхгофа. Закон Ламберта. Лучистый теплообмен между телами. Теплообмен излучением при наличии экранов. Излучение между телом и оболочкой. Теплообмен излучением между телами, произвольно расположенными в пространстве. Угловые коэффициенты излучения. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах. Оптическая толщина среды и режимы излучения. Особенности излучения газов и паров. Лучистый теплообмен между газовой средой и оболочкой. Сложный теплообмен. Критерии радиационного подобия.
13. Теплообменные аппараты. Тепловой расчет рекуперативных теплообменных аппаратов. Средняя разность температур и методы ее вычисления. Расчет конечных температур и методы ее вычисления. Расчет конечных температур рабочих жидкостей. Тепловой расчет регенеративных теплообменных аппаратов.

IV. Специальные вопросы теории тепло- и массообмена

1. Уравнения Навье-Стокса.
2. Обтекание пластины ламинарным потоком. Решение Блазиуса.
3. Ползущие течения. Ячейки Хил-Шоу.
4. Уравнения пограничного слоя Прандтля.
5. Уравнения пограничного слоя в интегральной форме. Метод Польгаузена.
6. Уравнения энергии пограничного слоя. Граничные условия $T_w = \text{const}$, $q_w = \text{const}$.
7. Тройная аналогия Рейнольдса.
8. Асимптотическая теория турбулентного пограничного слоя ($Re \rightarrow \infty$).
9. Модель пути смешения Прандтля. Модель турбулентности Кармана.
10. Пористый вдув вещества в пограничный слой. Критические параметры вдува.
11. Отсос пограничного слоя. Асимптотические параметры отсоса.
12. Совместное влияние неизотермичности и проницаемости поверхности.
13. Влияние неизотермичности и сжимаемости на сопротивление, тепломассоперенос.
14. Течение с продольным градиентом давления. Положительный и отрицательный градиент давления.
15. Диффузорные течения. Отрыв пограничного слоя.
16. Ускоренные потоки. Явление ламинаризации пограничного слоя.
17. Лучистый теплообмен. Степень черноты. Абсолютно черное тело.

- 18 Пристенные газовые завесы.
- 19 Пограничный слой за участком интенсивного теплообмена.
- 20 Щелевая газовая завеса.
- 21 Теплообмен при пленочной конденсации. Задача Нуссельта.
- 22 Пузырьковое и пленочное кипение. Кризисы теплоотдачи.
- 23 Влияние неконденсирующихся примесей на законы теплообмена.
- 24 Проблемы интенсификации теплообмена.
- 25 Влияние внешней турбулентности.
- 26 Течение и теплообмен в трубах.
- 27 Теплоотдача на начальном и стабилизированном участках.
- 28 Внешнее обтекание труб.
- 29 Параметры, характеризующие интенсификацию. Рост сопротивления.
- 30 Модели теплообменных устройств.
- 31 Компактные теплообменники.

Список литературы

Основной список

1. Ансельм А. И. Основы статистической физики и термодинамики : [учебное пособие для вузов по физическим и техническим направлениям и специальностям] / А. И. Ансельм. - СПб., 2007. - 423, [3] с. : ил.
2. Теплопередача. Ч. 1 : [учебное пособие] / [В. С. Чередниченко [и др.] ; под ред. В. С. Чередниченко ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2007. - 231 с. : ил.. - Инновационная образовательная программа НГТУ "Высокие технологии".
3. Теплопередача. [В 2 ч.]. Ч. 2 : [учебное пособие / В. С. Чередниченко и др.] ; под общ. ред.: В. С. Чередниченко и А. И. Алиферова ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2007. - 378 с. : ил., табл.. - Инновационная образовательная программа НГТУ «Высокие технологии»
4. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., исп. и доп. - М: Издательство МЭИ. – 2005.
5. Волчков Э. П. Тепломассообмен в пристенных течениях : учебник / Э. П. Волчков, В. П. Лебедев. - Новосибирск, 2003. - 242 с. : ил.
6. Терехов В. И. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках : [монография] / В. И. Терехов, М. А. Пахомов. - Новосибирск, 2008. - 283 с. : ил.
7. Чичиндаев А. В. Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках / А. В. Чичиндаев. - Новосибирск, 2009. - 297 с. : ил.

Дополнительный список

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Болгарский А. В. Термодинамика и теплопередача : [учебник для авиационных специальностей вузов] / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. - М., 1975. - 495 с. : ил., схемы
3. Базаров И. П. Термодинамика : Учебник для физ. спец. ун-тов. - М., 1983. - 344 с. : ил.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
5. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
6. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 320 с.
7. Чичиндаев А. В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Ч. 1 : учебное пособие [для 2-4 курсов ФЛА (направления 551000, 551013, 551014, специальности 130100, 130300, 131100) дневного отделения] / А. В. Чичиндаев. - Новосибирск, 2003. - 399 с.