

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИТ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ



Директор
академик РАН

Д.М.Маркович

« 2 » января 2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА МОДУЛЯ

Теоретическая и прикладная теплотехника

Научная специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Семестр 3, 4, 5, 6

№	Вид деятельности	Семестр
		3,4,5,6
1	Лекции, час.	192
2	Контактные часы на аттестацию, час	20
3	Консультации, час.	12
4	Самостоятельная работа, час.	208
5	Форма аттестации (экзамен, зачет)	К6 ¹
12	Всего в контактной форме, час	224

Новосибирск 2025

¹ В составе промежуточной аттестации по модулю «Теоретическая и прикладная теплотехника». К- кандидатский экзамен.

1. Аннотация к рабочей программе модуля «Теоретическая и прикладная теплотехника»

Модуль Теплофизика и теоретическая теплотехника составлен в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника утвержденными Минобрнауки России № 349 от 30.03.2023. В состав модуля включены: рабочие программы дисциплин: Термодинамика, элементы статистической физики. Тепло- и массообмен в одно- и многофазных средах. Основы расчета теплообменных аппаратов, рабочая программа практики научной деятельности, План научной деятельности, рабочие программы вариативных дисциплин».

Модуль «Теоретическая и прикладная теплотехника» реализуется в 3,4,5,6 семестрах (2-3 курсы аспирантуры) и является базовой для выполнения научно-исследовательской деятельности, направленной на подготовку диссертации к защите

Перечень основных дисциплины:

Термодинамика, элементы статистической физики

Термодинамика и ее метод. Параметры состояния. Равновесные и неравновесные термодинамические процессы. Идеальный газ и смеси идеальных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Уравнение состояния реальных газов.

Первый закон термодинамики. Работа. Теплота. Внутренняя энергия, энтальпия и другие термодинамические потенциалы.

Второй закон термодинамики. Циклы. Понятие термического КПД. Обратимые и необратимые процессы. Цикл Карно. Теорема Карно. Термодинамическая шкала температур. Энтропия. Изменение энтропии в необратимых процессах. Энтропия и термодинамическая вероятность.

Дифференциальные уравнения термодинамики. Собственные переменные термодинамических потенциалов. Теплоемкости в различных процессах. Квантовая природа теплоемкости. Совершенный газ.

Основные термодинамические процессы: политропный, изохорный, изобарный изотермический, адиабатически. Показатели адиабаты. Эффект Джоуля—Томпсона, дросселирование. Адиабатическое расширение реального газа в вакуум (процесс Гей-Люссака – Джоуля).

Равновесие термодинамических систем и фазовые переходы. Гомогенные и гетерогенные термодинамические системы. Термодинамическое равновесие. Условия фазового равновесия. Фазовые переходы. Уравнение Клапейрона—Клаузиуса. Критическая точка. Фазовые переходы первого и второго рода. Термодинамическая теория Ландау фазовых переходов второго рода. Термодинамика поверхности. Поверхностное натяжение и поверхностное давление. Равновесие между поверхностной фазой и газом. Фазовые переходы при искривленных поверхностях раздела. Теория образования зародышей при фазовых переходах первого рода.

Распространение звука в газе, дисперсия и затухание звука. Вторая вязкость.

Ударные волны. Законы сохранения на фронте ударной волны. Ударная адиабата. Структура ударной волны в газах. Процессы истечения газов и жидкостей. Уравнение Бернулли. Параметры торможения. Простое сопло, сопло Лаваля.

Взаимодействие молекул с поверхностью твердого тела. Адсорбция и хемосорбция. Мономолекулярная и полимолекулярная адсорбция.

Термодинамические циклы тепловых двигателей. Эксергия. Циклы Карно, Отто, Дизеля, Брайтона (газотурбинная установка), Ренкина. Регенерация теплоты в цикле. Обратные тепловые циклы. Холодильные установки. Цикл воздушной холодильной установки. Цикл пароконденсационной холодильной установки. Цикл парожетательной холодильной установки. Цикл абсорбционной холодильной установки. Цикл термоэлектрической холодильной установки. Принцип работы теплового насоса. Термотрансформаторы. Методы сжижения газов.

Основы химической термодинамики. Термохимия. Закон Гесса. Закон Кирхгофа. Химическое равновесие и второй закон термодинамики. Константа равновесия. Тепловой закон Нернста.

Распределение Гиббса. Энтропия. Статистическое обоснование закона возрастания энтропии. Распределение Гиббса для систем с переменным числом частиц. Статистическое описание идеального газа. Распределение Больцмана. Термодинамические свойства двухатомного газа с молекулами одинаковых и разных атомов. Закон равнораспределения. Квантовая статистика идеального газа. Распределение Бозе. Бозе-конденсация. Термодинамика черного излучения. Распределение Ферми. Теплоемкость вырожденного ферми-газа.

Теория флуктуаций. Распределение Гаусса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Корреляция флуктуаций. Флуктуации в критической точке. Корреляция флуктуаций во времени. Уравнения переноса, основы термодинамики необратимых явлений. Соотношение симметрии кинетических коэффициентов Онсагера.

Кинетическое уравнение Больцмана. H – теорема. Вывод уравнения Больцмана на основе баланса числа частиц. Идеи метода Чепмена—Энскога и Грэда. Вывод гидродинамических уравнений из уравнений Больцмана. Вычисление кинетических коэффициентов. Влияние химических реакций и внутренних степеней свободы на явления переноса.

Случайные блуждания и броуновское движение. Уравнение Ланжевена. Уравнение Фоккера—Планка. Релаксационные явления. Основное кинетическое уравнение. Колебательная релаксация. Вращательная релаксация. Кинетика диссоциации и ионизации. Газовые лазеры.

Тепло- и массообмен в одно- и многофазных средах

Конвективный теплообмен в однокомпонентной среде. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии в сплошной среде. Эмпирические законы переноса (Ньютона, Фурье, Фика). Критерии подобия и их физический смысл.

Теплопроводность. Параболическое и гиперболическое уравнения теплопроводности. Механизмы теплопроводности веществ в газообразном и жидком состояниях. Теплоемкость кристаллов. Модели Эйнштейна и Дебая. Механизмы теплопроводности веществ в твердом (кристаллическом и аморфном) состоянии.

Теплопроводность через плоскую стенку. Число Био. Коэффициент теплопередачи. Нестационарное температурное поле в плоской пластине, регулярный режим охлаждения (нагрева) тел.

Аналогия процессов тепло- и массообмена. Аналогия Рейнольдса. Тройная аналогия.

Теплообмен при внешнем обтекании тела. Система уравнений гидродинамического и теплового пограничных слоев. Автомодельное решение Польгаузена. Соотношения для расчета теплообмена при различных числах Прандтля. Условные толщины пограничных слоев.

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. Теплообмен на проницаемой поверхности. Теплообмен при поперечном обтекании одиночного цилиндра и пучков труб.

Теплообмен при течении жидкости в каналах. Начальные гидродинамический и термический участки. Стабилизированный теплообмен при ламинарном и турбулентном течении при граничных условиях 1-го и 2-го рода.

Теплообмен при свободной конвекции. Приближение Буссинеска. Пограничный слой на вертикальной плоской поверхности, расчет коэффициента теплоотдачи. Свободная конвекция на поверхности горизонтального цилиндра и сферы. Свободная конвекция в замкнутых объемах. Понятие смешанной конвекции.

Теплообмен при фазовых превращениях. Неравновесность на межфазных границах. Теплообмен при пленочной конденсации на вертикальной поверхности: решение Нуссельта. 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.

Виды многофазных сред, основные определения и параметры. Газовзвеси, эмульсии, суспензии и газожидкостные течения. Двухфазные газожидкостные и парожидкостные течения в каналах, режимы течения, определяющие параметры. Феноменологические уравнения неразрывности, импульса и энергии. Влияние межфазного обмена импульсом и теплом на скорость звука и декремент затухания.

Совместные процессы тепло- и массопереноса. Общая характеристика процессов переноса массы и энергии. Состав смеси, диффузионные потоки, коэффициент диффузии. Перенос энергии и импульса в смеси. Расчет интенсивности переноса энергии и массы компонента при умеренных и высоких скоростях массообмена. Сублимация поверхности тела, обтекаемого высокотемпературным газовым потоком. Коэффициент аккомодации.

Тепло- и массообмен при химических превращениях. Диффузия, сопровождаемая гомогенной или гетерогенной химической реакцией. Химическое взаимодействие на поверхности тела, обтекаемого высокотемпературным газовым потоком. Термическое разложение тела. Разрушение композиционных материалов в высокотемпературном газовом

потоке. Взаимодействие процессов горения и испарения. Процессы на поверхности тела, обтекаемого гиперзвуковым потоком газа.

Теплообмен излучением. Основные понятия и законы излучения. Природа излучения. Интегральная и спектральная плотности потока излучения. Поглощательная, отражательная и пропускная способности тел. Абсолютно черное тело. Законы теплового излучения (Планка, Вина, Стефана—Больцмана, Кирхгофа, Ламберта). Излучение реальных тел. Радиационные свойства реальных материалов. Теплообмен излучением в диатермической 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 излучающее-поглощающей среде. Собственное излучение газа.

Основы расчета теплообменных аппаратов

Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках.

Оптимизация схем теплоэнергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей.

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

Основы теплогидравлического расчета теплообменников.

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 фильтрующимся охладителем.

Научная практика

Целью освоения научной практики является подготовка аспирантов к профессиональной научной деятельности. Научная практика проводится с целью систематизации, расширения и закрепления профессиональных знаний, формирование у аспирантов навыков ведения самостоятельной научной работы.

Научная деятельность, направленная на подготовку к защите диссертации

Научная деятельность – форма практической работы аспиранта, позволяющая ему изучить научно-техническую информацию по теме кандидатской диссертации, выполнить проектные разработки по теме, провести расчеты по разработанному алгоритму с применением сертифицированного программного обеспечения, участвовать в экспериментах, составлять описания проводимых исследований, анализ и обобщение результатов, положенных в основу кандидатской диссертации.

Вариативные дисциплины

Вариативные дисциплины помогают решить основные задачи, стоящие при изучении данного модуля, а именно, углубленное изучение теоретических вопросов современной механики жидкости и газа, развитие практических навыков решения задач в данной области.

Особое внимание уделяется описанию течений жидкости и газа с доминирующим влиянием диссипативных эффектов, вызванных наличием вязкости. Дается представление об основных методах решения задач, важных для практического использования.

Текущая и промежуточная аттестация

С целью определения уровня качества знаний аспирантов, проводятся текущая и промежуточная аттестации.

Текущий контроль заключается в представлении доклада (в форме презентации) на семинаре по одному из разделов программы курса, по результатам которой выставляется оценка «зачтено» или «не зачтено». Оценка «зачтено» по результатам является одним из условий допуска к прохождению промежуточной аттестации.

Промежуточная аттестация по дисциплинам проводится в виде дифференцированных зачетов, по всему модулю целиком – кандидатский экзамен.

Итоговая аттестация

Итоговая аттестация проводится в форме оценки диссертации на предмет ее соответствия критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ « О науке и государственной научно-технической политике».

Лицам, успешно прошедшим итоговую аттестацию, выдается свидетельство об окончании аспирантуры.

Лицам, не прошедшим итоговой аттестации или получившим неудовлетворительные результаты, выдается справка об обучении (периоде обучения).

При освоении дисциплины аспиранты выполняют следующие виды учебной работы: лекции, консультации, самостоятельная работа.

Самостоятельная работа включает: самостоятельное изучение теоретического материала по разделам дисциплины, подготовку доклада по одному из разделов программы дисциплины, включающего обзор литературы на заданную тематику за последние 5 лет.

Общий объем дисциплины – 432 академических часа.

Подготовка аспирантов включает в себя следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинары, консультации с преподавателем в период занятий, сдача дифференцированных зачетов по дисциплинам, входящим в структуру модуля Теплофизика и теоретическая теплотехника, самостоятельная подготовка студента по программе кандидатского экзамена, консультации с преподавателем, сдача кандидатского экзамена.

2. Технология обучения

В ходе реализации учебного процесса по дисциплине проводятся лекционные и практические (семинарские) занятия. Материал лекционного курса увязывается с передовыми исследованиями всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки аспирантов.

Специально указываются темы, активно обсуждающиеся в текущей профессиональной научной литературе. По темам, рассматриваемым на лекциях и изучаемым самостоятельно, проводятся консультации.

3. Программное обеспечение

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

4. Материально-техническое обеспечение

№	Наименование	Назначение
1	Презентационное оборудование (мультимедиа-проектор, экран, компьютер для управления) Ноутбук, мультимедиа-проектор, экран. Программное обеспечение для демонстрации презентаций. Рабочее место с выходом в Интернет. Библиотечный фонд ИТ СО РАН.	Для проведения лекционных
2	Компьютерный класс (с выходом в Internet)	Для организации самостоятельной работы обучающихся

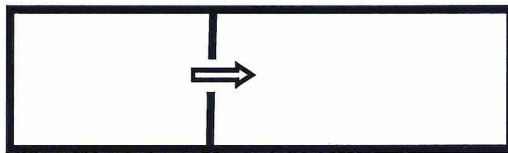
5. Литература

Основная литература

1. Темперли Г., Роулинсон Дж., Рашбрук Дж. (ред.). Физика простых жидкостей. Статистическая теория - М.: Мир, 1971.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: Пер. с немецк. - М.: Наука, Глав. редакция физ.-мат. лит.-ры, 1974.
3. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. - М.: Наука, Глав. редакция физ.-мат. лит.-ры, 1977.

4. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. - М.: Наука, 1979.
5. Гордиев Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М.: Наука, 1980.
6. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика (Теоретическая физика, Т. 6). - М.: Наука, 1986.
8. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Изд-во ФИАН, 1998.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 2001.
10. Квасников И.А. Теория равновесных систем. Т. 1: Термодинамика; Т. 2: Статистическая физика. М.: Изд-во УРСС, 2002.
11. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Уч. пособие для вузов, М: Издательство МЭИ, 2003.
12. Дзюбенко Б.В., Кузьма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах, под ред. Кузьма-Кичты Ю.А. М: «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008.
13. S.J. Blundell and K.M. Blundell Concepts of Thermal Physics, Department of Physics, University of Oxford, UK Second Edition, 2010 Oxford, University Press.
14. Филатова Е.С., Филиппова Л.Г. Сборник задач с решениями по термодинамике и статистической: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во НГУ, 1981, 88 с.
15. Лежнин С.И., Кувшинов Г.Г. Химическая термодинамика: - Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2000, 80 с.
16. Лежнин С.И., Заварухин С.Г. Сборник заданий по курсу «Процессы переноса в сплошных средах»: Методическое пособие - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 26 с.
17. Алексеенко С.В., Лежнин С.И. Теория процессов переноса в сплошных средах: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006.

Распространение звука в газе, дисперсия и затухание звука. Вторая вязкость. Ударные волны. Законы сохранения на фронте ударной волны. Ударная адиабата. Структура ударной волны в газах. Процессы истечения газов и жидкостей. Уравнение Бернулли. Параметры торможения. Простое сопло, сопло Лаваля.



$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U = \frac{P-T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V}{C_V} \quad \beta_V = P^{-1}\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \quad \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U = -\frac{a}{V^2} < 0$$

$$T_2 - T_1 = \int_{V_1}^{V_2} \frac{P-T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V}{C_V} C_V \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U \leq 0 \quad \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U < 0$$

β_V


10. Квасников И.А. Теория равновесных систем. Т. 1: Термодинамика; Т. 2: Статистическая физика. М.: Изд-во УРСС, 2002.
11. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. Уч. пособие для вузов, М: Издательство МЭИ, 2003.
12. Дзюбенко Б.В., Кузьма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах, под ред. Кузьма-Кичты Ю.А. М: «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008.
13. S.J. Blundell and K.M. Blundell Concepts of Thermal Physics, Department of Physics, University of Oxford, UK Second Edition, 2010 Oxford, University Press.
14. Филатова Е.С., Филиппова Л.Г. Сборник задач с решениями по термодинамике и статистической: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во НГУ, 1981, 88 с.
15. Лежнин С.И., Кувшинов Г.Г. Химическая термодинамика: - Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2000, 80 с.
16. Лежнин С.И., Кувшинов Г.Г. Техническая термодинамика: - Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2000, 100с.
17. Лежнин С.И., Заварухин С.Г. Сборник заданий по курсу «Процессы переноса в сплошных средах»: Методическое пособие - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 26 с.
18. Алексеенко С.В., Лежнин С.И. Теория процессов переноса в сплошных средах: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006.

Программа разработана:

д.ф.-м.н., профессор


 С.В. Лежнин

д.ф.-м.н., профессор РАН

 В.В. Терехов

Согласовано:

Зам. директора по научной работе
к.ф.-м.н.

 Д.Ф. Сиковский

Утверждено на Ученом совете

*Протокол № 12-2024
от 26 декабря 2024 г.*