Уважаемые аспиранты, соискатели, а также все те, которые по каким-либо причинам интересуются программой кандидатского экзамена по специальности 1.3.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника (В настоящее время плавно переходит в специальность 2.4.6 - Теоретическая и прикладная теплотехника)

Вашему вниманию предлагается конспект лекций, подготовленный автором с учетом его многолетнего опыта преподавателя и экзаменатора.

При подготовке использовались материалы учебников, учебных пособий, список которых приведен.

В данном курсе

- предпринята попытка совместить математическую строгость используемых законов (строгость, конечно, «умеренную», для физиков) с наглядной физической интерпретацией различных ситуаций
- большое внимание уделяется конкретным примерам и задачам для лучшего дедуктивного усвоения материала

Предполагается, что «слушатели», изучающие данный курс, знакомы с основами математического анализа, линейной алгебры, уравнений математической физики и векторного анализа (тензорного исчисления), общей физики.

Очевидный тезис: Чем «слушатели» более подготовлены, тем меньше им потребуется дополнительной литературы для усвоения программы.

Автор приносит заранее извинения за возможную фрагментарность и неоднородность в представлении материала.

Большая просьба - при обнаружении, описок, неточностей, ошибок или, тем более, вопиющих ошибок, сообщить автору (lezhninsi@gmail.com)

С уважением,
Лежнин С.И.

P.S.: 1) Курс не завершен, находится в развитии и будет дополняться автором и (или) его коллегами по Кафедре физики неравновесных процессов НГУ и ИТ СО РАН.

2) Лекции «подгружаются» на сайт ИТ постепенно. При этом при каждой «подгрузке» возможна коррекция предыдущих презентаций

Кратко из истории

При Советской власти существовали две специальности, программы которых «пересекались»:

1) специальность 01.04.14 –Теплофизика и молекулярная физика

2) специальность 05.14.05 -Теоретические основы теплотехники

Разделы ПРОГРАММЫ-МИНИМУМ кандидатского экзамена по специальности 1.04.14 “Теплофизика и молекулярная физика”	**Разделы ПРОГРАММЫ-МИНИМУМ кандидатского экзамена по специальности 05.14.05 “Теоретические основы теплотехники”**
1. Термодинамика и статистическая физика **2. Теория неравновесных процессов** **3. Физика газов и плазмы** **4. Физика жидкостей** **5. Фазовые переходы** **6. Физика твердого тела**	**1. Термодинамика** **2. Тепло- и массообмен** **3. Основы расчета теплообменных аппаратов и средств тепловой защиты**

Видно, что программы составляли разные люди, и их структурирование принципиально различается.

Потом, в результате реорганизации, решили объединить специальности, назвав общую специальность **01.04.14 - Теплофизика и теплотехника**.

Для удобства программы решили оставить, только 1-ю - для физико-математических наук, 2-ю - для технических наук)

С 2021 года номер этой специальности – 1.3.14.

С 2025 года прекращен набор на специальность 1.3.14 , поскольку ее «присоединили» к специальности **2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.** При этом в 2.4.6 появилась опция «физико-математические науки», которой раньше не было

Самые значимые части обеих программ специальности 1.3.14, при этом, сохранились.

На сегодняшний день программа для обновленной специальности **2.4.6** состоит из 3-х разделов:

1. Термодинамика, элементы статистической физики
2. Тепло- и массообмен в одно- и многофазных средах
3. Основы расчета теплообменных аппаратов

Для удобства восприятия материала

- Курс разделен на презентации, в состав каждой из которых включены по две стандартные лекции

- Вначале каждой презентации приводятся конкретные пункты из программ ВАК, которые полностью или частично отражены в презентации и содержание лекций

- Обозначения предлагаются естественные, как правило, общепринятые, и могут изменяться (полная оптимизация не производилась).

Например:

площадь S там, где фигурирует энтропия, может обозначаться как A;

λ - коэффициент теплопроводности или коэффициент сопротивления в трубах;

σ - коэффициент поверхностного натяжения, уд. проводимость или сечение рассеяния;

P - может быть и давлением, и импульсом, и парковкой автотранспорта

Далее предлагается

- Список рекомендованной и используемой в процессе подготовки курса литературы (**по необходимости, в презентациях будут сделаны ссылки**)

- Содержание курса

Рекомендованная литература

для 3.1.14 - по разделам «Термодинамика и статистическая физика» (ф.м.науки), «Термодинамика» (т.науки),

для 2.4.6 - по разделу «Термодинамика и статистическая физика»

Лекции 1-10

(эти книги или более поздние издания, как правило, можно скачать из Инета)

1. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики. - М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1973.

2. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. - М.: Машиностроение, 1972.

3. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. - М.: Наука, 1979.

4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика, ч.1 (Теоретическая физика, Т. 5). - М: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1976.

5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика (Теоретическая физика, Т. 6). - М: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1986.

6. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. - М.: Наука, Глав. редакция физ.-мат. лит-ры, 1977. (**или ….. Учебное пособие - Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000**)

7. Лежнин С.И., Кувшинов Г.Г.,. Техническая термодинамика: - Новосибирск: Изд-во НГТУ. - 2000.

Рекомендованная литература по всем разделам, кроме
для 3.1.14 - «Термодинамика и статистическая физика» (ф.м.науки), «Термодинамика» (т.науки),
для 2.4.6 - «Термодинамика и статистическая физика»

Лекции от 11 и далее

(эти книги или более поздние издания, как правило, можно скачать из Инета)

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. - М: Физматгиз, 1959.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М: Высшая школа, 1967.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М: Наука, Глав. редакция физ.-мат. лит-ры, 1974.
4. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. - М: Атомиздат, 1979.
5. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. - М.: Химия, 1974.
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, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1986.

8. Алексеенко С.В., Лежнин С.И. Теория процессов переноса в сплошных средах: Учеб. пособие- Новосибирск: НГУ, ИТ СО РАН, 2006.

9. Жуков В,И., Лежнин С.И., Кувшинов Г.Г., Массообменные процессы и аппараты, Часть I. - Новосибирск: Изд-во НГТУ. - 2007.

10. Лежнин С.И., Кувшинов Г.Г. Процессы переноса в сплошных средах: - Новосибирск: Изд-во НГТУ. - 2008.

11. Гогонин И.И. Исследование теплообмена при пленочной конденсации пара. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015.

12. Гешев П.И. Основы гидродинамики : Учеб. пособие- Новосибирск: НГУ, 2021.

Содержание лекций 1 и 2:

Параметры термодинамической системы.

Термодинамические процессы

(Термическое) уравнение состояния f(P,V,T) = const

Смеси идеальных газов

Работа и теплота. 1-е начало термодинамики

Термодинамические потенциалы

Теплоемкость

Рабочая и тепловая диаграммы

Дифференциал функции двух переменных. Якобианы

Политропические процессы

Примеры

1) Внутренняя энергия совершенного газа
2) Уравнение адиабаты для газа Ван-дер-Ваальса
3) Расчет теплоемкости в заданном процессе для совершенного газа
4) $C_P - C_V$ для газа Ван-дер-Ваальса
5) Равновесные и неравновесные процессы

Еще о потенциалах для идеальных, реальных газов…

Уравнения состояния (уточнение определений)

Формуляция IAPWS 95 (Fredericia, Denmark, September 1996)

Содержание лекций 3 и 4:

Поверхностное натяжение. Термодинамика поверхности
- Краевой угол, Капилляры (капиллярные трубки)

2-е начало (2-й закон) термодинамики. Направление термодинамических процессов

Цикл Карно. Обратимая тепловая машина

Теорема Карно

Эквивалентность формулировок Томпсона и Клаузиуса

Закон возрастания энтропии

Экстремальный свойства термодинамических потенциалов

Изменение энтропии при тепловом контакте двух тел с постоянными теплоемкостями

Изменение энтропии идеального (совершенного) газа в неравновесных процессах

Максимальная работа. Обратимая тепловая машина с холодильником и нагревателем конечной теплоемкости. Эксергия

Обобщенный цикл Карно. Процессы с регенерацией теплоты

Дросселирование газов и паров
- Пример: Дросселирование газа Ван-дер-Ваальса

Адиабатическое расширение реального газа в вакуум (процесс Гей-Люссака – Джоуля)

Содержание лекций 5 и 6:

Дифференциал функции двух и трех переменных

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Зависимость термодинамических потенциалов от массы системы

Равновесие фаз. Фазовые переходы 1-го рода

- Правило фаз Гиббса
- Условия равновесия внешне изолированной системы, состоящей из двух подсистем (вначале без фазовых переходов)
- Условия равновесия внешне изолированной системы, состоящей из двух фаз как двух подсистем

Приближенная аналитическая зависимость $P(T)$ на линии насыщения

Теплоемкость насыщенного пара (пар на линии насыщения)

«Школьный» вывод формулы Клапейрона-Клаузиуса

Давление насыщенных паров при разных давлениях жидкости и пара

Метастабильные состояния

Закон соответственных состояний

Физика «метастабильности»

- Переохлаждение пара
- Перегрев жидкости

Содержание лекций 7 и 8:

Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

- Цикл Отто
- Цикл Дизеля
- Цикл Сабатэ – Тринклера
- Сравнение циклов двигателей внутреннего сгорания

Цикл Брайтона

1) Газотурбинная установка
   Циклы реактивных двигателей
2) Прямоточный воздушно-реактивный двигатель
3) Компрессорный турбореактивный двигатель

Паротурбинные установки

- ПТУ на цикле Карно
- ПТУ на цикле Ренкина

Холодильные циклы

- Воздушная холодильная установка
- Паровая компрессорная холодильная установка

Содержание лекций 9 и 10:

Холодильные циклы (продолжение)
- Пароэжекторная холодильная установка
- Абсорбционная холодильная установка (АБХУ)
- Абсорбционная холодильная установка на LiBr (АБХМ)
- Термоэлектрическая холодильная установка

Тепловой насос

Термотрансформаторы
- Термотрансформатор для выработки холода
- Понижающий трансформатор
- Повышающий трансформатор

Методы сжижения газов
1) Метод Пикте
2) Метод Линде
3) Метод Клода

Топливный элемент
- Принцип работы топливных элементов
- Преимущества водородных Т.Э.
- Некоторые типы Т.Э.

Содержание лекций 11 и 12:

Конвективный тепломассообмен. Основные положения

Элементы тензорной алгебры. Дифференциальные операторы

Уравнения переноса (баланса)

Перенос импульса

Перенос кинетической энергии

Перенос полной энергии

Квазиодномерное стационарное течение в канале.
Различные виды баланса полной энергии

Дальнейшие упрощения

Перенос внутренней энергии

Гипотеза Фурье для молекулярного потока энергии

Коэффициенты теплопроводности для различных веществ

Теплоемкость и теплопроводность газов

Теплоемкость и теплопроводность жидкостей

Содержание лекций 13 и 14:

- Теплоемкость и теплопроводность твердых тел
  - Теплоемкость по «Эйнштейну»
  - Теплоемкость по «Дебаю»
  - Теплопроводность диэлектриков
  - Теплопроводность металлов
- Уравнение переноса тепла + гипотеза Фурье
  - Гиперболическое уравнение теплопроводности
- Анализ размерностей и критерии подобия
  - π -теорема Бэкингема
  - Сопротивление при обтекании тел
  - Сопротивление при сверхзвуковом обтекании тел
  - Критерии подобия, характеризующие нестационарность
- Понятие вынужденной и свободной конвекции
- Основные критерии подобия при переносе импульса и энергии
  - Физический смысл критерия Грасгофа
- Коэффициент теплоотдачи. Число Нуссельта

Содержание лекций 15 и 16:

Распространение звука в газе

Слабонелинейные волны

- Уравнение Бюргерса

Дисперсия и затухание звука. Вторая вязкость

Ударные волны. Поверхности разрыва

- УВ в совершенном (политропном) газе

Адиабатический процесс истечения газов. Сопло Лаваля

- Аналитические зависимости (для совершенного газа) давления, плотности и температуры от скорости потока

Истечение из сосуда через простое сопло

Расчетные и нерасчетные режимы истечения через сопло Лаваля

Содержание лекций 17 и 18:

Теплопроводность через плоскую стенку. Коэффициент теплопередачи. Число Био

Краевые условия для уравнения теплопроводности

Охлаждение (нагревание) неограниченной пластины (метод разделения переменных)

Регулярный режим охлаждения (нагревания) тел

«Тепловые волны»

Уравнения динамического пограничного слоя ($\mathrm{Re} \to \infty$)

Уравнения теплового (температурного) пограничного слоя ($Pe \to \infty$)

Теплообмен для вынужденной конвекции при различных числах Прандтля

- Малые числа Прандтля
- Большие числа Прандтля

Содержание лекций 17 и 18:

Пограничные слои на искривленной стенке и на теле вращения

- Уравнение и решение Швеца
- Пограничный слой на плоской (или искривленной) стенке
- Пограничный слой на теле вращения (любые β)
- Задача обтекания твердой сферы в «стоксовском режиме» ($\mathbf{Re} < 1$) и при $\boldsymbol{Pe} >> 1$

Отрыв пограничного слоя

Содержание лекций 19 и 20:

- Ламинарные и турбулентные течения
  - Полуэмпирические гипотезы для расчета турбулентных течений
  - Гипотеза «пути смешения» Прандтля
- Универсальный (логарифмический) профиль скорости
- Сопротивление при течении в трубах
  - Влияние шероховатости
- Аналогия Рейнольдса для теплообмена. Число Стантона
- Турбулентный режим обтекания пластины
- Теплоотдача при турбулентном обтекании пластины

Содержание лекций 21 и 22:

Возникновение конвекции в горизонтальном слое жидкости, подогреваемом снизу (конвекция Рэлея-Бенара)

Приложение: «мягкий» и «жесткий» режимы неустойчивости (или самовозбуждения)

- «Мягкий» режим неустойчивости
- «Жесткий» режим неустойчивости

Свободная конвекция у вертикальной пластины

Свободная конвекция у горизонтального цилиндра

Свободная конвекция в ограниченном объеме

Турбулентный режим свободной конвекции

- Умеренные и большие числа Прандтля
- Малые числа Прандтля
- Сравнение «универсальной» формулы с предельными ламинарными зависимостями
- Сравнение «универсальной» формулы с предельными турбулентными зависимостями
- Ламинарный, турбулентный режимы (газы)

Смешанная конвекция

- Теплоотдача шара при совместном влиянии вынужденной и свободной конвекций
- Смешанная конвекция у вертикальной пластины в ламинарном режиме
- Режимы свободной, вынужденной и смешанной конвекции при течении в горизонтальных и вертикальных трубах

Содержание лекций 23 и 24:

Процессы переноса при фазовых превращениях

Теплообмен при конденсации. Конденсация чистого пара

Кинетика фазовых переходов на границе «пар-жидкость»

Ламинарная пленка при конденсации неподвижного пара. Формула Нуссельта

- Конденсации на вертикальной изотермической стенке
- Определения

Конденсация неподвижного пара на горизонтальном цилиндре

- Конденсация на горизонтальном цилиндре (иллюстрации)

Вернемся к конденсации на вертикальной поверхности

- Естественная эволюция волновой пленки (без конденсации при фиксированном Re)

Конденсация движущегося пара

- Качественная модель. Оценки
- Конденсация на горизонтальном цилиндре движущегося сверху пара
- Конденсация движущегося пара внутри вертикальной трубы
- Автоколебания при внутритрубной кондесации (пар движется против гравитации)

Влияние уноса капель на теплообмен

Капельная конденсация

Содержание лекций 25 и 26:

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ

Пузырьковое и пленочное кипение чистой жидкости

Флуктуационный механизм образования пара в перегретой жидкости

- Температура предельного перегрева

Модель роста парового пузырька

- Предельные аналитические решения

Взрывное вскипание на пленочном нагревателе

- Инерционная стадия роста ($P = P_0$)

Модель кризиса кипения. Критерий устойчивости двухфазных систем

- Кривая кипения в координатах (q , ΔT). Уточнение
- Влияние на режимы кипения способа обогрева поверхности
- Сосуществование пузырькового и пленочного режимов кипения
- Гидродинамическая модель 1-го кризиса Кутателадзе С.

Содержание лекций 27 и 28:

Зависимость критического теплового потока при кипении на трубке (проволоке) от ее диаметра

Зависимость критического теплового потока от физических свойств жидкости

Вторая критическая плотность теплового потока

Теплообмен при пузырьковом кипении. Критерии подобия

- Модель Кутателадзе С.С.
- Модель Кружилина Г.Н. – Лабунцова Д.А.

Различные факторы, влияющие на процесс пузырькового кипения

- Скорость роста пузырьков (тепловая схема)
- Отрывной диаметр пузырьков
- Модели «отрыва» пузырьков
- Эмпирическая зависимость отрывного диаметра пузыря от расходной скорости жидкости (капилляр на стенке вертикального канала)
- Формирование и отрыв пузырей при различных скоростях жидкости и расходах газа (капилляр в центре канала)
- Частота отрыва пузырьков
- Влияние давления на теплообмен при пузырьковом кипении
- Влияние вынужденной конвекции на пузырьковое кипение
- Влияние теплофизических свойств материала поверхности нагрева на теплоотдачу
- Особенности кипения щелочных металлов
- Влияние шероховатости материала

Содержание лекций 29 и 30:

Возникновение пленочного кипения, минуя стадию пузырькового

Кризисы кипения 1-го и 2-го рода

Структура парожидкостного потока при кипении в вертикальной обогреваемой трубе

Наиболее часто «используемые» эмпирические формулы

ПЕРЕНОС В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ

Уравнение переноса в двухкомпонентной среде. Закон Фика

Замечания к закону Фика

Критерии подобия в процессах диффузии

Краевые условия для уравнения диффузии

Особенности задач диффузии в жидких и газовых смесях

Диффузионный пограничный слой. Аналогия процессов теплообмена и массообмена

Тройная аналогия

Содержание лекций 31 и 32:

Влияние поперечного потока вещества на трение

Влияние поперечного потока вещества на теплообмен

Конденсация неподвижного пара из парогазовой смеси

Влияние наличия неконденсируемого газа и вынужденной конвекции на конденсацию

Испарение в парогазовую смесь

- Процесс адиабатического испарения

Массообменные процессы между жидкостью и жидкостью (газом или паром)

- Изотермическая пленочная абсорбция

Массообменные процессы между жидкостью (газом или паром) и твердым телом

- Свободная (или кнудсеновская) диффузия внутри пор
- Поверхностная диффузия

Адсорбция

Изотерма адсорбции (изотерма сорбции)

- Изотермы Лэнгмюра и Фрейндлиха
- Изотерма полимолекулярной адсорбции