

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
СТЕРЛИТАМАКСКИЙ ФИЛИАЛ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СФ БАШГУ)

**ПРОГРАММА**

вступительных испытаний для поступающих  
на направление подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре  
03.06.01 Физика и астрономия

Стерлитамак 2020

## ПРОГРАММА-МИНИМУМ

вступительного экзамена по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия, программы 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по физико-математическим наукам.

### Введение

В основу настоящей программы положены следующие разделы физики: термодинамика и статистическая физика; теория неравновесных процессов; физика газов и плазмы, фазовые переходы, физика твёрдого тела.

Программа специальной дисциплины отрасли науки и научной специальности (ОД.А.) разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации по физике при участии Московского государственного областного университета.

Программа дисциплины научной специальности по выбору аспиранта (ОДН.А.) разработана на кафедре теоретической физики и методики обучения физике СФ БашГУ.

### 1. Термодинамика и статистическая физика

Законы термодинамики. Термодинамические функции. Термодинамические неравенства. 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.

Условие химического равновесия. Закон действующих масс. Теплота реакции. Термическая диссоциация, ионизация, возбуждение.

Неидеальные газы. Разложения по степеням плотности. Виральные коэффициенты.

Фазовые переходы первого и второго рода. Термодинамическая теория Ландау фазовых переходов второго рода.

Теория флуктуаций. Распределение Гаусса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Корреляция флуктуаций. Флуктуации в критической точке. Корреляция флуктуаций во времени.

Термодинамика поверхности. Поверхностное натяжение и поверхностное давление. Равновесие между поверхностной фазой и газом. Теория образования зародышей при фазовых переходах первого рода.

### 2. Теория неравновесных процессов

Уравнения переноса, основы термодинамики необратимых явлений. Соотношение симметрии кинетических коэффициентов Онсагера. Применения методов неравновесной

термодинамики к явлениям в сплошных средах с одновременным протеканием различных процессов: диффузии, теплопроводности, вязкости, химических реакций.

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 ионизации и диссоциации. Газовые лазеры. Столкновительные механизмы создания инверсной населенности.

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. Истечение газа через сопло.

### **3. Физика газов и плазмы**

Взаимодействие молекул. Источники сведений о межмолекулярных силах. Различные составляющие межмолекулярных сил. Потенциальные функции межмолекулярного взаимодействия. Упругие и неупругие столкновения.

Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Закон соответственных состояний, термодинамическое подобие. Теплоемкость. Сжимаемость. Эффект Джоуля-Томпсона. Методы измерения термодинамических величин.

Явление переноса в газах. Вязкость. Теплопроводность. Диффузия. Термодиффузия. Пристеночные явления в умеренно разреженном газе. Термомолекулярная разность давлений. Кинетические явления в сильно разреженном газе (газ Кнудсена).

Методы исследования явлений переноса. Методы получения сверхнизких и высоких давлений. Диффузионные методы разделения изотопов.

Низкотемпературная плазма. Дебаевский радиус.

Ионизационное равновесие. Формула Саха. Кинетика ионизации.

Явление переноса в плазме. Излучение плазмы.

### **4. Физика жидкостей**

Строение жидкости. Радиальная функция распределения. Изучение структуры жидкости методом рассеяния рентгеновских лучей.

Уравнения состояния жидкости и плотных газов. Плотность, сжимаемость, теплоемкость.

Статистическая теория жидкостей. Частичные функции распределения, методы интегральных уравнений. Модельные теории. Компьютерное моделирование.

Явление переноса и релаксации в жидкости. Вязкость, теплопроводность, диффузия и самодиффузия.

Соппротивление и теплопередача в ламинарном потоке.

Конвективный теплообмен.

Турбулентное движение и турбулентный теплообмен.

Кризис сопротивления.

Модели турбулентности. Методы расчета турбулентных явлений в газе, жидкости и плазме.

Радиационный теплообмен и радиационная газовая динамика.

Изучение теплового движения в жидкостях по рассеянию света и медленных нейтронов.

Пространственно-временная корреляционная функция.

Поверхностные явления. Поверхностное натяжение, смачивание. Осмотическое давление.

Экзотические жидкости, жидкие кристаллы, жидкие металлы. Квантовые жидкости. Сверхтекучесть гелия.

## **5. Фазовые переходы**

Диаграммы состояния. Условия равновесия фаз. Закон Клапейрона-Клаузиуса. Критическая точка и физические свойства системы в окрестности критической точки. Соотношения между критическими показателями. Экспериментальные методы исследования критических состояний. Методы термостатирования и получения низких температур.

Кипение. Кризис кипения. Методы расчета.

Метастабильные состояния. Перегрев, переохлаждение. Давление насыщенных паров над раствором.

Плавление, кристаллизация. Возгонка и сублимация.

Теплообмен и сопротивление в многофазных средах.

## **6. Физика твердого тела**

Строение твердых тел: кристаллические и аморфные твердые тела. Пространственная решетка кристалла. Трансляционная симметрия. Дефекты в кристаллах: точечные дефекты и дислокации.

Колебание решетки, спектральная плотность колебаний решетки. Ангармонизм и тепловое расширение. Теплоемкость кристаллов. Модели Эйнштейна и Дебая.

Электронные состояния кристаллов. Модели свободных электронов. Зонная структура энергетического спектра кристаллов. Проводники, полупроводники и диэлектрики. Электронная теплоемкость.

Термодинамика твердых тел. Уравнение состояния твердых тел. Термодинамическое описание термоупругих свойств.

Теплопроводность и вязкость твердых тел. Уравнение теплопроводности в твердых телах, теплопроводность кристаллов. Механизмы теплопроводности в диэлектриках и металлах. Вязкость и ее проявление при поглощении звука в твердых телах.

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

## ПРОГРАММА-МИНИМУМ

вступительного экзамена по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия, программы 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по техническим наукам

### 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 парожетторной 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, 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, blanket 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. Способы тепловой защиты от конвективного и совместного (конвективно-лучистого) нагрева.

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

### **Основная литература**

1) Статистическая физика и термодинамика: учебное пособие / К. С Ефремов. - М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015.-208 с.; [Электронный ресурс]. - URL:[http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=428682](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=428682)

2) Лукин С. В. Физическое моделирование процессов передачи теплоты: Учеб. пособие. - Череповец: ЧГУ, 2015. - 112 с. [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=434810](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=434810)

3) Кузнецов, С.И. Элементы физической кинетики. Курс физики с примерами решения задач: учебное пособие [Электронный ресурс]: учебное пособие / С.И. Кузнецов, В.В. Каплин, С.Р. Углов. — Электрон. дан. — Томск: ТПУ (Томский политехнический университет), 2011. — 79 с. — Режим доступа: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=10275](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=10275) — Загл. с экрана.

4) Архипов В. Физико-химические основы процессов тепломассообмена: учебное пособие // Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2015. 199 с. [Электронный ресурс]. – URL: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=442086&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=442086&sr=1)

5) Нигматуллин Р.И. Механика сплошной среды. Кинематика. Динамика. Термодинамика. Статистическая динамика: учеб. для студ. // М. : ГЭОТАР-Медиа, 2014. 639с. Кол-во экземпляров: всего – 5

6) Базаров И.П. Термодинамика. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 2010.



### Дополнительная литература

- 1) [Ландау Л. Д.](#), [Лифшиц Е. М.](#) Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т. Т. 5. Статистическая физика, Ч. 1; [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=83401>
- 2) . Скрипов В.П., Файзуллин М.З. Фазовые переходы кристалл-жидкость-пар и термодинамическое подобие // М.: Издательство "Физматлит", 2003. 160 с. [Электронный ресурс]. – URL: [https://e.lanbook.com/book/59358#book\\_name](https://e.lanbook.com/book/59358#book_name)
- 3) Булидорова Г. В. , Галяметдинов Ю. Г. , Ярошевская Х. М. , Барабанов В. П. , Шилова С. В. Фазовые равновесия в однокомпонентных системах: учебное пособие // Казань: Издательство КНИТУ, 2014. 93 с. [Электронный ресурс]. – URL: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=427849&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=427849&sr=1)

### Интернет-ресурсы

1. База данных периодических изданий (на платформе EastViewEBSCO), договор с ООО «ИВИС» № 85-Пот 10.06.2016
2. Электронно-библиотечная система издательства «Лань», договор с ООО «Издательство «Лань» № 691 от 01.08.2016
3. База данных периодических изданий на платформе Научной электронной библиотеки (eLibrary), Договор с ООО «РУНЭБ» № 1051 от 18.11.2015
4. Электронно-библиотечная система ZNANIUM.COM, договор с ООО «Научно-издательским центром ИНФРА-М» № 1606-эбс от 21.03.2016.
5. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online», договор с ООО «Нексмедиа» № 690 от 26.07.2016
6. Оператор «Национальной электронной библиотеки» (НЭБ), договор № 101/НЭБ/1438 от 13.04.2016
7. Электронно-библиотечная система «Электронный читальный зал», договор с ООО «Библиотех» № 059 от 13.09.2010
8. Электронно-библиотечная система «ЭБ БашГУ», договор с ООО «Открытые библиотечные системы» № 095 от 01.09.2014