

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Казанский научный центр Российской академии наук**

**Утверждаю**  
Председатель КазНЦ РАН

\_\_\_\_\_ О.Г.Синяшин  
\_\_\_\_\_ 2016г.

**ОСНОВНАЯ РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**Теплофизика и теоретическая теплотехника**

основная образовательная программа подготовки аспиранта  
по направлению 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль программы Теплофизика и теоретическая теплотехника

Уровень высшего образования подготовки научно-педагогических кадров  
в аспирантуре

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Казань 2016

Рабочая программа составлена на основании федеральных государственных образовательных стандартов к основной образовательной программе высшего образования подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РАССМОТРЕНА И ОДОБРЕНА на заседании Ученого совета КазНЦ РАН Протокол № \_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2016 г.

Разработчик

Е.К. Вачагина

## 1. Цели и задачи учебной дисциплины

Рассматриваемая дисциплина является основной в подготовке аспирантов, обучающихся по профилю 03.06.01 Физика и астрономия

**Цели и задачи**, данной дисциплины: получение слушателями комплекса фундаментальных знаний и практических представлений в области закономерностей преобразования энергии в тепловых процессах, тепловых двигателях, машинах, установках и элементах оборудования, а также закономерностей распространения теплоты в твердых телах, жидкостях и газах.

## 2. Место учебной дисциплины в структуре профессиональной подготовке

2.1 Дисциплин «Теплофизика и теоретическая теплотехника» относится к вариативной части междисциплинарного профессионального модуля ООП.

2.2. Данная программа строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов КазНЦ РАН, прошедших успешное обучение по программе подготовки магистров или специалистов. Она основывается на положениях, отраженных в учебных программах указанных уровней. Для освоения дисциплины «Теплофизика и теоретическая теплотехника» требуются знания и умения, приобретенные обучающимися в результате освоения ряда дисциплин (разделов дисциплин), таких как:

- По итогам Физическая термодинамика;
- Тепло- и массообмен;
- Основы расчета теплообменных аппаратов и средств тепловой защиты;
- Теплофизический эксперимент;
- Теплообмен в энергетическом оборудовании;
- Аналитические методы в теории теплопроводности;
- Техническая термодинамика и теплопередача;
- Теплоэнергетика и теплотехника.
- Теоретические основы теплотехники

2.3. Дисциплина «Теплофизика и теоретическая теплотехника» необходима при подготовке к сдаче кандидатского экзамена и выполнении научно-квалификационной работы аспиранта.

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины «Теплофизика и теоретическая теплотехника» направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ООП по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия:

**Профессиональные компетенции:**

**ПК-1** способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

### ***Знать:***

- фундаментальные основы теплофизики и теоретической теплотехники
- нормативные документы для составления заявок, грантов, проектов НИР
- требования к содержанию и правила оформления рукописей к публикации в рецензируемых научных изданиях

### ***Уметь:***

- представлять научные результаты по теме диссертационной работы в виде публикаций в рецензируемых научных изданиях
- готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в области теплофизики и теоретической теплотехники
- представлять результаты НИР (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу

### ***Владеть:***

- методами планирования, подготовки, проведения НИР, анализа полученных данных, формулировки выводов и рекомендаций по направленности Теплофизика и теоретическая теплотехника (01.04.14)
- навыками составления и подачи конкурсных заявок на выполнение научно-исследовательских и проектных работ по направленности подготовки

## **4. Структура и содержание учебной дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц (180 часов).

### **4.1 Структура дисциплины**

	Наименование дисциплины	Объем учебной работы,ч						Вид итогового контроля	
		Всего	Всего аудиторн.	Из аудиторных					Самост. работа
				Лекц.	Лаб.	Практ.	КСР		
	Теплофизика и теоретическая теплотехника	180		36				144	экзамен

### **4.2. Содержание дисциплины**

#### **4.2.1. Разделы дисциплины и виды занятий**

№ п/п	Наименование разделов и тем	Всего, час.	В том числе			Форма контроля
			лекции	семинары	самостоятельная работа	
<b>1</b>	<b>Основные понятия и законы технической термодинамики</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>24</b>	

№ п/п	Наименование разделов и тем	Всего, час.	В том числе			Форма контроля
			лекции	семинары	самостоятельная работа	
1.1	Предмет и метод термодинамики	10	2	-	9	решение задач
1.2	Первое начало термодинамики	10	2	2	8	Устный групповой опрос, семинар
1.3	Второе начало термодинамики	10	2	2	7	Устный групповой опрос, семинар
<b>2</b>	<b>Циклы тепловых двигателей</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>18</b>	
2.1	Циклы двигателей внутреннего сгорания	9	2	1	9	Устный групповой опрос, семинар
2.2	Газотурбинные установки (ГТУ)	9	2	1	9	Устный групповой опрос, семинар
<b>3</b>	<b>Теплопередача</b>	<b>28</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>25</b>	
3.1	Виды теплообмена	10	4	-	9	решение задач
3.2	Основы массообмена	9	1	1	8	Устный групповой опрос, семинар
3.3	Теплообмен излучением. Основные понятия и определения. Виды лучистых потоков. Законы теплового излучения	9	1	1	8	Устный групповой опрос, семинар
<b>4</b>	<b>Реальные газы</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>22</b>	
4.1	Реальный газы и его свойства	15	3	3	11	Устный групповой опрос, семинар
4.2	Водяной пар, его свойства и характеристики	15	3	3	11	
<b>5</b>	<b>Течение газов и паров</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>23</b>	
5.1	Уравнение первого начала термодинамики для газового потока	15	3	3	9	Устный групповой опрос, семинар
5.2	Уравнение энергии газового потока	9	2	2	7	Устный групповой опрос, семинар
5.3	Обобщенное уравнение Бернулли - уравнение работ	6	1	1	7	Устный групповой опрос, семинар
<b>6</b>	<b>Газовые смеси</b>	<b>28</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>22</b>	
6.1	Смеси идеальных газов	14	3	2	11	Устный групповой опрос, семинар
6.2	Влажный воздух	14	3	2	11	Устный групповой опрос, семинар
<b>7</b>	<b>Паросиловые установки</b>	<b>22</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>21</b>	
7.1	Циклы паросиловых установок.	12	1	1	11	Устный групповой опрос, семинар

№ п/п	Наименование разделов и тем	Всего, час.	В том числе			Форма контроля
			лекции	семинары	самостоятельная работа	
7.2	Теплофикация	10	1	1	10	Устный групповой опрос, семинар
<b>8</b>	<b>Холодильные установки и термотрансформаторы</b>	<b>30</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>25</b>	
8.1	Циклы холодильных установок	18	4	2	14	Устный групповой опрос, семинар
8.2	Тепловой насос. Трансформаторы теплоты.	12	2	2	11	Устный групповой опрос, семинар
<b>Всего</b>		<b>252</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>180</b>	

#### 4.2.2. Содержание дисциплины

##### Раздел 1

##### Основные понятия и законы технической термодинамики

Предмет и метод термодинамики. Техническая термодинамика как основа теплоэнергетики. Значение технической термодинамики в системе подготовки инженера-теплоэнергетика. Первое начало термодинамики. Теплота и работа - форма передачи энергии. Эквивалентность теплоты и работы. Работа изменения объема газа. Понятие положительной и отрицательной работы. Внутренняя энергия тела и ее физический смысл. Второе начало термодинамики. Простейшие равновесные процессы и условия их осуществления. Круговые процессы (циклы). Термический к.п.д. Цикл Карно. Цикл Карно с идеальным газом.

##### Раздел 2

##### Циклы тепловых двигателей

Циклы двигателей внутреннего сгорания. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме. Цикл с подводом теплоты при постоянном давлении. Смешанный цикл. Газотурбинные установки (ГТУ). Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении. Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении и с регенерацией. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме.

### **Раздел 3**

#### **Теплопередача**

Виды теплообмена. Теплопроводность. Основные понятия и определения. Основной закон теплопроводности - закон Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Граничные условия. Теплопроводность при стационарном режиме. Теплопроводность через плоскую стенку при граничных условиях первого и третьего рода (ГУ-1, ГУ-3). Теплопроводность через цилиндрическую стенку при ГУ-1 и ГУ-3. Теплопередача. Пути интенсификации теплопередачи. Конвективный теплообмен. Естественная и вынужденная конвекция. Закон Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Теплоотдача однофазной жидкости при ламинарном и турбулентном течении. Вычисление коэффициентов теплоотдачи. Эмпирические формулы. Теплообмен при фазовых превращениях. Основы массообмена. Теплообмен излучением. Основные понятия и определения. Виды лучистых потоков. Законы теплового излучения. Лучистый теплообмен между поверхностями, разделенными диатермичной средой.

### **Раздел 4**

#### **Реальные газы**

Реальный газы и его свойства. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ. Критические параметры. опыты Эндрюса. водяной пар, его свойства и характеристики. Диаграмма  $p-v$  водяного пара и ее использование. Термодинамические процессы в диаграмме  $p-v$  водяного пара. Определение параметров пара по диаграмме  $p-v$  и таблицам. Диаграммы  $T-s$  и  $h-s$  водяного пара. Основные процессы изменения состояния водяного пара. Определение параметров пара по диаграммам  $T-s$  и  $h-s$ .

### **Раздел 5**

#### **Течение газов и паров**

Уравнение первого начала термодинамики для газового потока. Уравнение энергии газового потока. Обобщенное уравнение Бернулли - уравнение работ. Частные случаи уравнения работ.

### **Раздел 6**

#### **Газовые смеси**

Смеси идеальных газов. Способы задания смеси. Теплоемкость смеси. Уравнение состояния смеси идеальных газов. Смешение газов и паров. Влажный воз-

дух. Абсолютная и относительная влажность. Точка росы. Влагосодержание. Диаграмма h-d влажного воздуха. Процессы в диаграмме h-d влажного воздуха.

## **Раздел 7**

### **Паросиловые установки**

Циклы паросиловых установок (ПСУ). Цикл Карно во влажном паре и его недостатки. Основной цикл ПСУ - цикл Ренкина. Полезная работа, термический к.п.д. цикла Ренкина. Влияние параметров пара на термический к.п.д. Общее значение пара высоких параметров. Паросиловые установки с вторичным перегревом пара. Действительный цикл с необратимым расширением пара. Коэффициенты полезного действия ПСУ. Теплофикация. Термодинамические основы теплофикации. Регенеративный цикл ПСУ. Основные схемы регенерации. К.П.Д. и удельный расход пара в регенеративном цикле.

## **Раздел 8**

### **Холодильные установки и термотрансформаторы**

Циклы холодильных установок. Основные характеристики холодильных установок. Обратный цикл Карно. Воздушная холодильная установка. Паровая компрессионная холодильная установка. Абсорбционная холодильная установка. Вихревая холодильная установка. Пароводяная холодильная установка. Тепловой насос. Трансформаторы теплоты.

## **5. Образовательные технологии**

Технология процесса обучения по дисциплине включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа аспирантов;
- в) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию;
- г) зачеты.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор). В учебном процессе предусмотрено широкое использование активных и интерактивных форм проведения занятий (семинаров в диалоговом режиме, дискуссий, компьютерных симуляций, разбора конкретных ситуаций, групповых дискуссий). Одной из основных активных форм обучения, связанных с ведением того вида (видов) деятельности, к которым готовится аспирант (научно-исследовательской и научно-педагогической), является семинар, к работе которого привлекаются ведущие



исследователи и специалисты-практики, и являющийся основой корректировки индивидуальных учебных планов аспиранта. Проверка приобретенных знаний, навыков и умений осуществляется посредством отчетов аспирантов на научных семинарах и индивидуальным обсуждением с руководителем.

## **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов.**

Виды самостоятельной работы: в домашних условиях, в читальном зале библиотеки, на компьютерах с доступом к базам данных и ресурсам Интернет, в лабораториях с доступом к лабораторному оборудованию и приборам. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, учебное и научное программное обеспечение, ресурсы Интернет.

## **7. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

Цель контроля - получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

### **7.1. Текущий контроль**

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляемая на протяжении семестра. Текущий контроль знаний учащихся организован как устный групповой опрос (УГО). Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений аспиранта.

### **7.2. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация осуществляется в конце семестра и завершает изучение дисциплины «Теплофизика и теоретическая теплотехника». Форма аттестации – зачет с оценкой., экзамен

### **Список вопросов для проведения текущего контроля и устного опроса обучающихся(зачет):**

#### **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

##### **Раздел 1. Основные определения и понятия.**

**1.** Что понимается под термодинамической системой? **2.** Какие процессы называются равновесными и какие неравновесными? **3.** Какие процессы называются обратимыми и какие необратимыми? **4.** Дайте формулировку и аналитическое выражение первого закона термодинамики. **5.** Что такое «функция состояния» и «функция процесса»? **6.** Как связано изменение энтропии с теплотой и абсолютной температурой? **7.** В чем сущность второго закона термодинамики?

ки? Приведите его основные формулировки. **8.** Покажите, в чем состоит общность различных формулировок второго закона термодинамики. **9.** Чему равен к.п.д. идеального цикла Карно?

### **Раздел 2. Циклы тепловых двигателей**

**1.** Какой цикл называется идеальным? **2.** Почему процессы сжатия или расширения во всех идеальных циклах тепловых двигателей принимаются адиабатными? **3.** Можно ли по характеру процесса подвода теплоты узнать, какой цикл рассматривается (поршневой или газотурбинный двигатель)? **4.** Циклы каких двигателей характеризует изохорный отвод теплоты и почему? **5.** С ростом какого параметра увеличивается термический КПД любого цикла? **6.** Чем ограничивается степень сжатия у различных типов поршневых двигателей? **7.** Чем ограничивается и как выбирается степень повышения давления у газотурбинных двигателей?

### **Раздел 3. Теплопередача**

**1.** Как передается теплота в процессе теплопроводности? **2.** Сформулируйте основной закон теплопроводности. **3.** Каков закон распределения температуры по толщине плоской и цилиндрической стенок? По какому условию выбирается изоляция трубы? **4.** Сформулируйте основной закон теплоотдачи конвекцией. **5.** Какой критерий характеризует вынужденную конвекцию? **6.** Из каких уравнений выводятся критерии  $Re$ ,  $Gr$ ,  $Pr$  и  $Nu$ ? **7.** Какой критерий характеризует свободную конвекцию. **8.** В чем особенности теплоотдачи при кипении воды и конденсации водяного пара? **9.** Что такое абсолютно черное, абсолютно белое и диатермическое тело? **10.** Сформулируйте закон смещения Вина и объясните его связь с законом Планка. **11.** О чем говорит закон Кирхгофа и каково его практическое применение? **12.** Сформулируйте закон Стефана — Больцмана и объясните его связь с законом Планка. **13.** Дайте определение абсолютно черного и серого тел. **14.** Для чего нужны экраны и какими свойствами они должны обладать? **15.** Каковы особенности излучения газов? **16.** Какие виды теплообменных аппаратов вы знаете? **17.** Где применяют рекуперативные теплообменники? **18.** Когда среднелогарифмический температурный напор можно заменить среднеарифметическим? **19.** Какие преимущества имеет противоточная схема теплообменника перед прямоточной?

### **Раздел 4. Реальные газы**

**1.** При каких условиях для описания термодинамического поведения газов следует использовать уравнение Ван-дер Вальса? **2.** Чем отличается реальный газ от идеального? **3.** Какое состояние газа называется критическим? **4.** Чем отличаются экспериментальные изотермы Эндрюса от изотерм Ван-дер-Вальса? **5.** Какой пар называется сухим насыщенным? **6.** Каков физический смысл пограничных кривых? Какой пар называется перегретым и что такое степень перегрева? **7.** Какой пар называется влажным насыщенным и что такое степень сухости? **8.** Как определить удельный объем, энтальпию, энтропию влажного пара? **9.** Как изменяется теплота парообразования с увеличением давления? **10.** Чем характерна критическая точка? **11.** Какими параметрами можно охарактеризовать состояние влажного, сухого и перегретого пара? **12.** Приведите формулы для определения работы, теплоты,  $\Delta i$ .

## **Раздел 5. Течение газов и паров**

**1.** Какие допущения принимаются при составлении уравнения 1го начала термодинамики для потока газов или жидкостей? **2.** Какая работа называется работой проталкивания? **3.** Какая работа называется технической? **4.** Какими членами отличается уравнение 1го начала термодинамики для потока газа от первого начала для неподвижного газа? **5.** В чем состоит энергетический смысл уравнения Бернулли для идеального газа? **6.** Чем отличается уравнения Бернулли для идеального газа и для вязкого газа?

## **Раздел 6. Газовые смеси**

**1.** Что называется парциальным давлением газа в смеси идеальных газов? **2.** Какие характеристики определяют состав газовой смеси? **3.** От каких величин зависит массовая теплоемкость смеси идеальных газов? **4.** Какие существуют способы смешения газов? **5.** Какими параметрами характеризуются состояние влажного воздуха? **6.** В чем измеряется абсолютная влажность воздуха? **7.** В чем измеряется относительная влажность воздуха? **8.** Какой пар называется насыщенным? **9.** Что такое точка росы? **10.** Чем отличается влагосодержание от абсолютной и относительной влажности? **11.** Какая величина называется температурой мокрого термометра? **12.** Для чего нужна  $h$ - $d$  диаграмма влажного воздуха?

## **Раздел 7. Циклы паросиловых установок**

**1.** Как изображается работа насоса в  $p$ - $v$ -диаграмме для цикла Ренкина и цикла Карно? **2.** От каких параметров и как зависит  $\eta_t$  цикла Ренкина? **3.** Как меняется степень сухости пара за турбиной при увеличении давления пара перед турбиной при постоянной начальной температуре? В чем вред работы турбины на паре с большой степенью влажности? **4.** Как влияет начальная температура перегретого пара на степень сухости его при выходе из турбины? **5.** Для чего применяется вторичный перегрев пара? **6.** Что дает и как осуществляется регенеративный подогрев питательной воды? **7.** Что дает применение парогазовых циклов? **8.** Как влияет на к.п.д. цикла Ренкина и степень сухости пара за турбиной процесс дросселирования перед турбиной?

## **Раздел 8. Циклы холодильных машин, теплового насоса (обратные термодинамические циклы)**

**1.** Какой параметр характеризует эффективность холодильной установки? **2.** Каковы основные недостатки воздушной компрессорной холодильной установки? **3.** Изобразите в  $T$ - $s$ - диаграмме цикл воздушной компрессорной холодильной установки и эквивалентный ей обратный цикл Карно. **4.** Почему в паровых холодильных установках целесообразно применять процесс дросселирования, а в воздушных — адиабатное расширение в турбине? **5.** Какими свойствами должны обладать хладагенты?

## 8. Перечень контрольных мероприятий и вопросы к экзаменам кандидатского минимума

### 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 пароконденсационной холодильной установки. Цикл парожетторной холодильной установки. Понятие о цикле абсорбционной холодильной установки. Цикл термоэлектри-

ческой 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 жид-

ких 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. По-

глощательная, 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, бланкет 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 фильтрующимся охладителем.

### **Критерии оценивания ответа аспиранта в ходе экзамена**

«Отлично»	Минимум 3 вопроса имеют полные ответы. Содержание ответов свидетельствует об отличных знаниях обучающего и о его умении решать профессиональные задачи, соответствующие его будущей квалификации.
«Хорошо»	Минимум 2 вопроса имеют полные ответы. Содержание ответов свидетельствует о хороших знаниях обучающего и о его умении решать профессиональные задачи, соответствующие его будущей квалификации
«Удовлетворительно»	Минимум 1 вопрос) имеет полный и правильный ответ, 2 вопроса раскрыты не полностью. Содержание ответов свидетельствует о недостаточных, но удовлетворительных знаниях и о его ограниченном умении решать профессиональные задачи

«Неудовлетворительно»	Три вопроса (из трех) не имеют ответа. Содержание ответов свидетельствует об отсутствии знаний обучающегося и о его неумении решать профессиональные задачи
-----------------------	---

## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **Основная литература**

1. Леонтович, Михаил Александрович. Введение в термодинамику. Статистическая физика : учеб. пособие / М. А. Леонтович. - 2-е изд., стер. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2008. - 432 с.
2. Т. Бахшиева, Б. П. Кондауров, А. А. Захарова, В.С. Салтыкова ; под ред. А. А. Захаровой. Техническая термодинамика и теплотехника : учеб. пособие для студ. вузов / Л. - 2-е изд., испр. - М. : Академия, 2008. - 272 с.
3. В. П. Бурдаков [и др.] Термодинамика: в 2-х ч. : учеб. пособие для студ. вузов /. - М. : Дрофа Ч.1 : Основной курс. - 2009. - 479 с.
4. В. П. Бурдаков [и др.] Термодинамика: в 2-х ч. : учеб. пособие для студ. вузов /. - М. : Дрофа Ч.2 : Специальный курс. - 2009. - 361 с.
5. М. Г. Шатров [и др.] ; под ред. М. Г. Шатрова. Теплотехника : учебник для студ. вузов/ - М. : Академия, 2011. - 288 с.
6. А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.Н. Афанасьев и др.; под общ. ред. проф. А.М. Архарова, проф. В.Н. Афанасьева Теплотехника : учебник для вузов /. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 712 с.

### **Дополнительная литература**

7. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия в 4-х кн. / под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. - 3-е изд., перераб. и доп. Кн.1 : Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы : справочник / М.С. Алхутов, А.А. Амосов, Т.Ф. Басова и др.; под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. - М. : Изд-во МЭИ, 2000.
8. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия. В 4-х кн. / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. - 3-е изд., перераб. и доп. Кн. 2 : Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент : справочник / А.А. Александров, Б.С. Белосельский, А.Г. Вайнштейн и др.; под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. - М. : Изд-во МЭИ, 2001. - 564 с.
9. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия в 4- кн. / под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. - 3-е изд., перераб. и доп. Кн. 3 : Тепловые и атомные электростанции : справочник / М.С. Алхутов, А.Н. Безгрешнов, Р.Г. Богоявленский; под ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. - М. : Изд-во МЭИ, 2003. - 648 с.
10. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия в 4-х кн. / под общ.ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. - 3-е изд., перераб. и доп.



Кн. 4 : Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / Б.Г. Борисов, К.Б. Борисов, В.М. Бродянский и др.; под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. - М. : Изд-во МЭИ, 2004. - 632 с.

11. К.В. Глаголев, А.Н. Морозов. Физическая термодинамика : учеб. пособие для студ. вузов / - 2-е изд., испр. - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. - 272 с.

12. А.Н. Алабовский, И.А. Недужий Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для технол. спец. вузов /. - 3-е изд., перераб. и доп. - Киев : Выща школа, 1990. - 255 с.

## **9. Материально- техническое обеспечение**

Казанский научный центр РАН располагает материально-технической базой, соответствующей санитарно-техническим нормам и обеспечивающей проведение всех видов теоретической и практической подготовки, предусмотренных учебным планом аспиранта, а также эффективное выполнение диссертационной работы.