

**Приложение 10**  
**УТВЕРЖДЕНО**  
**приказом ФИЦ КазНЦ РАН**  
**22.04.2019 № 17-А**

Разработано и рекомендовано к утверждению  
Ученым советом ИЭПТ - структурного  
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН  
12 апреля 2019 г., протокол № 3

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«Термодинамика»**

Уровень высшего образования  
Подготовка кадров высшей квалификации  
Направление подготовки

#### **01.06.01 МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

Направленность подготовки:

Механика жидкости, газа и плазмы (01.02.05)

Квалификация выпускника:

Исследователь. Преподаватель-исследователь

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения, трудоемкость дисциплины.
2. Перечень планируемых результатов обучения.
3. Место дисциплины в структуре образовательной программы.
4. Содержание дисциплины.
5. Учебно-тематический план занятий
6. Формы текущего и итогового контроля, критерии оценки.
7. Перечень учебной литературы и ресурсов сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины.
8. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины.

## **1. ВИДЫ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, СПОСОБ И ФОРМЫ ЕЕ ПРОВЕДЕНИЯ, ТРУДОЕМКОСТЬ ДИСЦИПЛИНЫ**

Виды учебной деятельности: аудиторные занятия – 0,5 зачетных единиц труда (18 часов), самостоятельная работа – 2 зачетные единицы труда (72 часа), всего – 2,5 зачетных единиц труда (90 часов).

Форма проведения аудиторных занятий – лекции, семинары, консультации.

В рамках часов самостоятельной работы по указанию преподавателя аспиранты прорабатывают темы и осваивают теоретические вопросы, излагаемые в лекционном курсе, а также самостоятельно изучают другие вопросы программы.

Формой итогового контроля является зачет.

## **2. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ**

В результате освоения дисциплины выпускник должен обладать следующими компетенциями:

### **2.1 Универсальные компетенции:**

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2).

### **2.2 Обще-профессиональными компетенциями:**

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);
- готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

### **2.3 Профессиональными компетенциями:**

- способность собирать и анализировать мировые научные знания о фундаментальных основах современной механики жидкости, газа и плазмы и формулировать направления самостоятельных исследований (ПК-1);
- владение основами современных методов экспериментальной механики жидкости, газа и плазмы (ПК-2).

## **3. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ**

Дисциплина «Термодинамика» является дисциплиной по выбору и включена в Блок № 1 программы аспирантуры, относящийся к вариативной части основной профессиональной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика. Обучение проводится на втором курсе.

Дисциплина направлена на подготовку к кандидатскому экзамену по дисциплине «Механика жидкости, газа и плазмы».

Данная дисциплина базируется на знаниях и умениях, выработанных при прохождении общих профессиональных курсов физики, математического анализа, теоретической газовой динамики, технической термодинамики и теории математического моделирования в рамках магистерской программы образования или специалитета. Владением данными знаниями и умениями устанавливается в ходе вступительных испытаний в аспирантуру.

Аспирант должен обладать навыками самостоятельного освоения изучаемого материала.

В результате освоения дисциплины аспирант должен получить дополнительные знания, умения и навыки. Аспирант должен:

***Знать:***

- первый и второй законы термодинамики,
- уравнения состояния идеальных и реальных газов,
- соотношения для расчета термодинамических параметров в основных термодинамических процессах в открытых системах,
- характеристики эффективности термодинамических циклов,
- термодинамические основы работы и циклы двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных и теплосиловых установок, холодильных машин и термотрансформаторов.

***Уметь:***

- определять термодинамические параметры в процессах идеальных газов,
- производить расчеты термодинамических процессов, циклов двигателей внутреннего сгорания и теплосиловых установок.

***Владеть:***

- навыками расчета цикла теплоэнергетической установки,
- навыками составления технико-экономического анализа,
- навыками сбора и статистической обработки полученной экспериментальной информации.

## **4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **4.1. Основные понятия и законы технической термодинамики**

Тема 4.1.1. Предмет и метод термодинамики. Техническая термодинамика как основа теплоэнергетики.

Тема 4.1.2. 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.

Тема 4.1.3. Термодинамика идеального газа. Основные законы идеальных газов. Термическое уравнение состояния. Термические коэффициенты. Уравнение состояния идеального газа. Газовая постоянная.

Тема 4.1.4. 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. Формулировка и аналитическое выражение первого начала термодинамики. Внутренняя энергия как функция состояния. Различие в содержании понятий теплота, работа и энергия. Энтальпия и ее физический смысл.

Тема 4.1.5. Теплоемкость. Теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$ , связь между ними. Формулы для определения внутренней энергии и энтальпии идеальных газов. Связь  $c_p$  и  $c_v$  для идеального газа. Формулы для определения количества теплоты, передаваемой в процессе. Интерполяционные формулы. Связь между средней и истинной теплоемкостями. Формулы для определения количества теплоты по табличным значениям средней теплоемкости. Элементы молекулярно-кинетической и квантовой теорий теплоемкости.

Тема 4.1.6. Основные газовые процессы. Задачи и методы исследования процессов. Изохорный, изобарный, изотермный и адиабатный процессы. Исследование политропного процесса.

Тема 4.1.7. Второе начало термодинамики. Простейшие равновесные процессы и условия их осуществления. Круговые процессы (циклы). Термический к.п.д. Цикл Карно. Цикл Карно с идеальным газом.

Тема 4.1.8. Характеристические функции и дифференциальные уравнения термодинамики. Характеристические функции как потенциалы. Общие условия термодинамического равновесия. Вывод зависимостей калорических величин от термодинамических параметров. Составление уравнения состояния по экспериментальным данным для зависимости изобарной теплоемкости от температуры. Метод определения термодинамических величин по уравнению состояния.

## **4.2. Реальные газы**

Тема 4.2.1. Реальный газы и его свойства. Свойства реальных газов. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ. Критические параметры. Опыты Эндрюса.

Тема 4.2.2. Водяной пар. 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.

Тема 4.2.3. Диаграммы  $T-s$  и  $h-s$  водяного пара. Основные процессы изменения состояния водяного пара. Определение параметров пара по диаграммам  $T-s$  и  $h-s$ .

## **4.3. Течение газов и паров**

Тема 4.3.1. Термодинамика газового потока. Уравнение первого начала термодинамики для газового потока. Уравнение энергии газового потока. Обобщенное уравнение Бернулли - уравнение работ. Частные случаи уравнения работ. Уравнение неразрывности потока. Дросселирование. Инверсионная кривая.

Тема 4.3.2. Сопло и диффузор. Сопло Лавая. Тепловое сопло. Расходное цилиндрическое сопло. Максимальный расход и критическая скорость.

#### **4.4. Газовые смеси**

Тема 4.1. Смеси идеальных газов. Способы задания смеси. Теплоемкость смеси. Уравнение состояния смеси идеальных газов. Смешение газов и паров.

Тема 4.2. Влажный воздух. Абсолютная и относительная влажность. Точка росы. Влажосодержание. Диаграмма  $h-d$  влажного воздуха. Процессы в диаграмме  $h-d$  влажного воздуха.

#### **4.5. Циклы поршневых компрессоров**

Тема 4.5.1. Газовые циклы. Компрессор. Работа одноступенчатого компрессора. Вредное пространство компрессора. Изотермное, адиабатное и политропное сжатие.

Тема 4.5.2. Поршневые компрессоры. Циклы компрессорных машин. Индикаторная диаграмма и работа идеального одноступенчатого поршневого компрессора. Объемный к.п.д. компрессора. Критическое отношение давлений.

#### **4.6. Циклы двигателей внутреннего сгорания**

Тема 4.6.1. Циклы двигателей внутреннего сгорания. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме. Цикл с подводом теплоты при постоянном давлении. Смешанный цикл. Расчет параметров в характерных точках циклов. К.п.д. циклов двигателей внутреннего сгорания. Удельная работа циклов, расход теплоты и топлива.

#### **4.7. Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей**

Тема 4.7.1. 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. Методы повышения к.п.д. циклов газотурбинных установок. Замкнутый цикл ГТУ.

Тема 4.7.2. Циклы реактивных двигателей.

#### **4.8. Паросиловые установки**

Тема 4.8.1. Циклы паросиловых установок (ПСУ). Цикл Карно во влажном паре и его недостатки. Основной цикл ПСУ - цикл Ренкина. Цикл Ренкина в  $p-v$ ,  $T-s$  и  $h-s$  – диаграммах. 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. Методы повышения к.п.д. цикла Ренкина.

Тема 4.8.2. Теплофикация. Термодинамические основы теплофикации. Регенеративный цикл ПСУ. Основные схемы регенерации. К.п.д. и удельный расход пара в регенеративном цикле. Вторичный перегрев пара.

#### **4.9. Холодильные установки и термотрансформаторы**

Тема 4.9.1. 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.

Тема 4.9.2. Тепловой насос. Трансформаторы теплоты.

## 5. УЧЕБНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН ЗАНЯТИЙ

№ п/п	Наименование темы	Аудиторные занятия	Самост. работа	Всего часов
4.1.	Основные понятия и законы технической термодинамики	2	8	10
4.2.	Реальные газы	2	8	10
4.3.	Течение газов и паров	2	8	10
4.4.	Газовые смеси	2	8	10
4.5.	Циклы поршневых компрессоров	2	8	10
4.6.	Циклы двигателей внутреннего сгорания	2	8	10
4.7.	Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей	2	8	10
4.8.	Паросиловые установки	2	8	10
4.9.	Холодильные установки и термотрансформаторы	2	8	10
<b>ИТОГО</b>		<b>18</b>	<b>72</b>	<b>90</b>

## 6. ФОРМЫ ТЕКУЩЕГО И ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ

**6.1. Текущий контроль:** текущий контроль освоения дисциплины проводится регулярно, начиная со второй недели обучения, в форме контроля посещаемости, устного опроса по изучаемой теме. Формой итогового контроля по дисциплине является зачет.

### *Вопросы к зачету*

1. Что называется рабочим телом?
2. Что называется термодинамическим параметром?
3. Назовите основные термодинамические параметры, характеризующие состояние однородного тела.
4. Что такое абсолютный нуль температуры? Как объясняется его наличие физически?
5. Что такое абсолютное, избыточное и атмосферное давление и как они связаны между собой?
6. Что называется состоянием термодинамического равновесия? Приведите примеры равновесного и неравновесного состояния.

7. Что называется термодинамическим процессом?
8. Что такое равновесный и неравновесный термодинамический процесс?
9. Что называется обратимым и необратимым процессом?
10. Что называется идеальным и реальным газом?
11. Каким основным законам подчиняются идеальные газы? Как записать эти законы в виде формул?
12. Что называется уравнением состояния? Как записывается уравнение состояния в общем виде?
13. Что такое термические коэффициенты?
14. Что такое энергия?
15. Что называется работой и теплотой?
16. По каким формулам вычисляется элементарная и полная работа изменения объема?
17. Какие наиболее распространенные устные формулировки первого начала термодинамики вы знаете?
18. На какие виды разделяется полная энергия  $E$ ?
19. Что такое внутренняя энергия тела  $U$  и что входит в ее состав?
20. Как записывается аналитическое выражение первого начала термодинамики в интегральной и дифференциальной форме?
21. Что такое теплоемкость?
22. Что такое средняя и истинная теплоемкости?
23. Какова формула, связывающая среднюю и истинную теплоемкости?
24. Что такое удельная теплоемкость? Какие удельные теплоемкости вы знаете?
25. Что называется теплоемкостью  $c_v$  при постоянном объеме?
26. Что называется теплоемкостью  $c_p$  при постоянном давлении?
27. Какова связь между теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$  для реального и идеального газов? Как записывается уравнение Майера для удельных теплоемкостей  $c_v$  и  $c_p$ ?
28. Что называется энтальпией (теплосодержанием)? От каких параметров состояния зависят внутренняя энергия и энтальпия идеального газа, по каким формулам они определяются?
29. Как выглядит график изохорного процесса в диаграмме  $p-v$  для случаев нагревания и охлаждения? Каковы формулы, выражающие соотношение между параметрами в процессе, формулы для изменения внутренней энергии, работы и теплоты процесса?
30. Как выглядит график изобарного процесса в диаграмме  $p-v$  для случаев подвода и отвода теплоты? Каковы формулы, выражающие соотношение между параметрами в процессе, формулы для изменения внутренней энергии, работы и теплоты процесса?
31. Каков вид имеет уравнение изотермного процесса и как выглядит график изотермного процесса в диаграмме  $p-v$ ? Какова формула, выражающая соотношение между параметрами процесса?
32. Как выводятся формулы для изменения внутренней энергии, работы и теплоты



изотермного процесса с идеальным газом?

33. Как выводится уравнение адиабатного процесса?

34. Как выводится уравнение политропного процесса?

35. В чем заключается обобщенное значение политропного процесса?

36. Как выглядят формулы, выражающие соотношение между параметрами в политропном процессе?

37. По каким формулам определяется работа и теплота в политропном процессе?

38. Какие наиболее распространенные устные формулировки второго начала термодинамики вы знаете?

39. Что называется тепловыми машинами?

40. Что называется тепловыми двигателями?

41. Что такое термический к.п.д. теплового двигателя? По какой формуле он определяется для любого цикла?

42. Как выглядит цикл Карно? Почему он является наивыгоднейшим при наличии двух источников теплоты?

43. Как формулируется теорема Карно о термическом к.п.д. цикла Карно?

44. Что называется энтропией?

45. По каким формулам определяется изменение энтропии для обратимых процессов с идеальными газами?

46. Какие изменения происходят с энтропией в необратимых процессах?

47. Как записывается аналитическое выражение второго начала термодинамики для обратимых и необратимых процессов?

48. Что такое регенерация теплоты и для чего она применяется?

49. Что называется обобщенным циклом Карно?

50. Что такое термодинамическая шкала температур и зачем она нужна?

51. Что называют характеристическими функциями и почему? Какие характеристические функции вы знаете?

52. Что называют термодинамическими потенциалами и почему? Какие термодинамические потенциалы вы знаете?

53. Как формулируются общие условия термодинамического равновесия и почему?

54. Как записывается уравнение Ван-дер-Ваальса? Что физически выражают собою поправки  $a/v^2$  и  $b$  в уравнении Ван-дер Ваальса. При каких условиях это уравнение выражается в уравнение состояния идеального газа Клапейрона-Менделеева?

55. Как записывается уравнение состояния водяного пара Вукаловича-Новикова и что дополнительно учитывается в этом уравнении по сравнению с уравнением Ван-дер-Ваальса?

56. Как выглядит  $p$ - $v$  диаграмма водяного пара?

57. Что называется насыщенным паром?

58. Что называется влажным насыщенным паром?

59. Что называется перегретым паром и степенью перегрева?

60. Что такое нижняя и верхняя пограничные кривые диаграммы водяного пара?

61. Что называется степенью сухости и степенью влажности влажного пара?

62. Что такое критическая точка? Каковы параметры пара в критической точке для водяного пара?
63. По какой формуле определяется энтальпия влажного пара?
64. Как выглядит тепловая диаграмма T-s для водяного пара? Как выглядит тепловая диаграмма h-s для водяного пара?
65. В чем заключается графический метод расчета процессов с паром с помощью диаграммы h-s?
66. Цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме.
67. Цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении.
68. Цикл ДВС со смешанным подводом теплоты.
69. Расчет параметров в характерных точках циклов.
70. Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении.
71. Цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении и с регенерацией.
72. Цикл с подводом теплоты при постоянном объеме.
73. Методы повышения к.п.д. циклов газотурбинных установок.
74. Замкнутый цикл ГТУ.
75. Циклы реактивных двигателей.
76. Цикл Карно во влажном паре и его недостатки.
77. Основной цикл ПСУ - цикл Ренкина. Полезная работа, термический к.п.д. цикла Ренкина.
78. Влияние параметров пара на термический к.п.д. цикла Ренкина.
79. Паросиловые установки с вторичным перегревом пара.
80. Действительный цикл ПСУ с необратимым расширением пара. Коэффициенты полезного действия ПСУ.

## 6.2. Критерии оценки итогового контроля:

«зачтено»	Вопрос раскрыт, приведены конкретные примеры.
«не зачтено»	Вопрос не раскрыт или раскрыт частично, не хватает примеров

**При отсутствии оценки «зачтено» обучающийся не допускается к промежуточной аттестации**

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

### 7.1. Основная литература

1. Леонтович, М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика: учеб. пособие - СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. - 432 с.
2. Бахшиева Т., Кондауров Б.П., Захарова А.А., Салтыкова В.С. Техническая термодинамика и теплотехника: учеб. пособие для студ. вузов / под ред. А.А. Захаровой. – М.: Академия, 2008. - 272 с.

3. Бурдаков В.П. и др. Термодинамика: в 2-х ч.: учеб. пособие для студ. вузов. - М.: Дрофа Ч.1: Основной курс. - 2009. - 479 с.

4. Бурдаков В.П. и др. Термодинамика: в 2-х ч.: учеб. пособие для студ. вузов. - М.: Дрофа Ч.2: Специальный курс. - 2009. - 361 с.

## **7.2. Дополнительная литература**

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

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

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

## **8. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Лекционные занятия и консультации, самостоятельная работа по освоению дисциплины и подготовка к сдаче кандидатских экзаменов проводятся в специальных помещениях (читальный зал научной библиотеки и/или конференц-залы), оборудованных мебелью (столы, стулья), классной доской (меловой), компьютером, проектором для демонстрации презентаций.