

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»**

Кафедра Физики

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ
«ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА»**

основной образовательной программы по специальности 010701.65 - Физика

Благовещенск 2012

УМКД разработан канд. пед. наук, доцентом Козачковой Ольгой Викторовной

Рассмотрен на заседании кафедры физики

Протокол заседания кафедры № _____ от «_____» _____ 20__ г.

Зав. кафедрой _____ / _____ /
(подпись) (фамилия, имя, отчество)

СОГЛАСОВАНО:

Протокол заседания УМСС _____

№ _____ от «_____» _____ 20__ г.

Председатель УМСС _____ / _____ /
(подпись) (фамилия, имя, отчество)

СОДЕРЖАНИЕ

I. Методический раздел	4
1.1.Рабочая учебная программа дисциплины	4
1.2.Методические рекомендации для преподавателя	32
1.3.Методические рекомендации студентам по самостоятельному изучению дисциплины	33
II. Обучающий раздел	35
2.1.Краткий конспект лекций	35
2.2.Темы практических занятий	46
2.3.Электронные обучающие средства	50
III. Контролирующий раздел	51
3.1.Вопросы для самоконтроля	51
3.2.Задания для контрольных работ	51
3.3.Вопросы для подготовки к экзамену	53
3.4.Экзаменационные билеты	55

I. МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1. Рабочая учебная программа дисциплины

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В процессе освоения студентами дисциплины «Термодинамика» *реализуются следующие цели:*

1. Сформировать у студентов современное представление об основных методах термодинамического (феноменологического) описания свойств равновесных и неравновесных макроскопических физических систем, а также научить применять эти знания к решению прикладных задач.
2. Сформировать у студентов ясное представление о границах применимости физических моделей и гипотез, используемых при описании динамики и свойств термодинамических систем. Излагая историю развития термодинамики, дать представление о существовании и путях разрешения философских и методологических проблем в данной предметной области.

Задачи дисциплины:

1. Изучение основных законов классической термодинамики, способов описания равновесных и неравновесных термодинамических систем на основе общих методов термодинамики.
2. Изучение основных методологических подходов и приемов решения физических задач в указанной предметной области.
3. Освоение студентами методов теоретического расчета физических характеристик простейших термодинамических систем путем применения законов, моделей и уравнений, рассматриваемых в лекционном курсе.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

иметь представление:

- о состоянии и развитии науки в области равновесной термодинамики;
- о способах классификации и видах термодинамических систем;
- о прикладном значении термодинамики;
- о современных тенденциях развития равновесной и неравновесной термодинамики;
- о месте термодинамики среди других наук;

знать:

- основные понятия, определения, законы, уравнения и неравенства равновесной термодинамики, как метода исследования макроскопических систем;
- методологические основы термодинамического подхода к анализу процессов, протекающих в макроскопических системах;

уметь:

- проводить анализ и классификацию термодинамических систем;
- формулировать цели исследования и принципы функционирования равновесных термодинамических систем;
- выполнять оценку характеристических функций основных параметров при исследовании термодинамических систем;
- использовать соответствующий математический аппарат для применения основных положений теории в решении практических задач в области равновесной термодинамики;

владеть:

- понятийным и методологическим аппаратом в области физики макросистем;
- методами решения научных и практических задач, связанных с изучением термодинамических свойств макроскопических систем, находящихся под воздействием внешних факторов (механических и термических).

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Дисциплина «Термодинамика» входит в базовую часть цикла общепрофессиональных дисциплин (ОПД Ф.1.7). Курс «Термодинамика», являющийся одним из разделов теоретической физики, читается после курсов «Теоретическая механика», «Электродинамика» и «Квантовая теория». В совокупности с дисциплинами «Статистическая физика», «Физическая кинетика» он представляет собой теоретическую основу изучения дисциплины «Физики конденсированного состояния вещества» (8 семестр). В нем вводятся основные методы теоретического описания, расчета, качественного и количественного анализа равновесного и неравновесного состояния материи, общие для любых физических систем. Математической базой курса являются все разделы курсов математики, изученные студентами к началу 7 семестра.

Для освоения дисциплины необходимо знать: основы дифференциально-интегрального и вариационного исчисления (дифференциал функции, производная функции, вариация, определенный и неопределенный интеграл, диф-

ференциальные и интегральные уравнения и неравенства), понятие логарифма.

Дисциплина «Термодинамика», являясь высшим уровнем обобщения физической теории, опирается на базовые представления теории строения вещества и принципы термодинамического описания макросистем, полученные студентами в курсе «Молекулярная физика».

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

«Термодинамика»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 94 часа

Выписка из стандарта

Основные законы и методы термодинамики, начала термодинамики, термодинамические потенциалы, уравнения и неравенства. Условия устойчивости и равновесия. Фазовые переходы. Основы термодинамики необратимых процессов, соотношения Онсагера. Принцип Ле-Шателье.

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы			Формы текущего контроля
		Лекции (час.)	Практические занятия (час.)	СРС (час.)	
1	ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ 1. Термодинамические системы, их основные свойства и способы описания. 2. Постулаты термодинамики. Температура. 3. Термодинамическое равновесие. Равновесные и неравновесные процессы.	2		4	
2	ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ 1. Внутренняя энергия термодинамической системы, работа и теплота. 2. Термическое и калорическое уравнения состояния. 3. Физическое содержание первого начала термодинамики.	5	4	6	Проверка домашнего задания (самостоятельное решение задач) Тест (1-2 раздела)

3	<p>ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ</p> <p>1. Определение теплоемкости.</p> <p>2. Основные термодинамические процессы и их уравнения. Теплоемкость газов.</p>	4	2	4	Проверка домашнего задания (самостоятельное решение задач)
4	<p>ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ.</p> <p>1. Формулировка второго начала термодинамики.</p> <p>2. Обратимые и необратимые процессы.</p> <p>3. Циклические процессы. Тепловые машины. Обратимый цикл Карно. Теоремы Карно.</p> <p>4. Энтропия. Количественная формулировка второго начала термодинамики.</p> <p>5. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Закон возрастания энтропии.</p> <p>6. Пределы применимости второго начала термодинамики.</p> <p>7. Третье начало термодинамики.</p>	5	4	6	Проверка домашнего задания (самостоятельное решение задач)
5	<p>МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИКИ</p> <p>1. Метод круговых процессов.</p> <p>2. Термодинамические потенциалы. Метод термодинамических потенциалов.</p> <p>3. Термодинамические потенциалы сложных систем с переменным числом частиц.</p>	4	2	4	Проверка домашнего задания (самостоятельное решение задач)
6	<p>УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ</p> <p>1. Общие условия равновесия и устойчивости термодинамических систем.</p> <p>2. Принцип Ле-Шателье – Брауна.</p>	4	2	4	Проверка домашнего задания (самостоятельное решение задач)
7	<p>ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ</p> <p>1. Классификация фазовых переходов по Эренфесту.</p> <p>2. Фазовые переходы 1 рода. Уравнение</p>	4	2	4	Проверка домашнего задания (самостоятельное решение задач)

	Клапейрона-Клаузиуса. 3. Фазовые переходы 2 рода. Уравнения Эренфеста.				Тест (6-7 разделы)
8	ТЕРМОДИНАМИКА РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ 1. Охлаждение газа при необратимом и обратимом адиабатных расширениях. Эффект Джоуля-Томсона. 2. Термодинамика диэлектриков и магнетиков. 3. Термодинамика излучения. 4. Термодинамика плазмы.	4	2	4	Оценка участия студентов в семинарском занятии
9	ТЕРМОДИНАМИКА НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ 1. Исходные положения и основные уравнения термодинамики необратимых процессов. 2. Уравнения баланса и законы сохранения. 3. Принцип Кюри. Диссипативные функции Онзагера. 4. Вариационные принципы термодинамики необратимых процессов.	4		4	Тест (8-9 разделы)
	Итого по дисциплине	36	18	40	экзамен

4. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Лекции

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

1. Термодинамические системы, их основные свойства и способы описания. Характер термодинамических законов. Основные определения и понятия термодинамического описания системы (изолированная система, замкнутая система, тепловое равновесие). Макроскопические параметры. Равновесное состояние. Виды параметров, определяющих состояние систем.

2. Постулаты термодинамики. Первый постулат термодинамики. Температура. Нулевое начало термодинамики. Второй постулат термодинамики. Существование температуры как особой функции состояния равновесной системы. Принцип температуры. Эмпирическая температура.

- 3. Термодинамическое равновесие. Равновесные и неравновесные процессы.** Термодинамический процесс. Равновесный и неравновесный процесс. Время релаксации.

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

- 1. Внутренняя энергия термодинамической системы, работа и теплота.** Внутренняя энергия. Количество теплоты. Работа термодинамической системы. Вычисление работы расширения системы, работы сил поверхностного натяжения, работы поляризации диэлектрика, работы намагничивания магнетика, работы деформации твердого тела.
- 2. Термическое и калорическое уравнения состояния.** Термическое и калорическое уравнения состояния для идеального газа и газа Ван-дер-Ваальса. Вириальная форма уравнения состояния.
- 3. Физическое содержание первого начала термодинамики.**

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

- 1. Определение теплоемкости.** Теплоемкость как функция процесса. Термостат. Формула теплоемкости. Формула Р.Майера. Теплота изотермического изменения внешних параметров.
- 2. Основные термодинамические процессы и их уравнения. Теплоемкость газов.** Изопротропические процессы. Политропические процессы. Уравнение политропы. Теплоемкость в политропическом процессе.

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ.

- 1. Формулировка второго начала термодинамики.** Качественная формулировка второго начала термодинамики: невозможность преобразования теплоты в работу без компенсации. Вечный двигатель 2 рода.
- 2. Обратимые и необратимые процессы.** Понятие обратимого термодинамического процесса в узком и широком смысле. Примеры необратимых процессов.
- 3. Циклические процессы. Обратимый цикл Карно. Теоремы Карно.** Определение циклического процесса. Принцип работы тепловой машины. Термический КПД. Обратимый цикл Карно, вывод его КПД. Теоремы Карно.
- 4. Энтропия. Количественная формулировка второго начала термодинамики.** Приведенная теплота. Определение энтропии. Свойства энтропии. Основное уравнение термодинамики для равновесных процессов. Вычисление энтропии в равновесных процессах.
- 5. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Закон возрастания энтропии.** Неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии.

Следствия из закона возрастания энтропии для неравновесных систем: изменение энтропии при диффузии газов, при теплопроводности, трении.

6. **Пределы применимости второго начала термодинамики.**
7. **Третье начало термодинамики.** Формулировка третьего начала термодинамики (теоремы Нернста). Некоторые следствия из третьего начала термодинамики.

МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

1. **Метод круговых процессов.** Метод круговых процессов (циклов). Применение метода циклов для решения некоторых задач термодинамики.
2. **Термодинамические потенциалы. Метод термодинамических потенциалов.** Термодинамические потенциалы (характеристические функции) и их полные дифференциалы: внутренняя энергия, свободная энергия Гельмгольца, энтальпия, энтропия, термодинамический потенциал Гиббса, их физический смысл. Связь между частными и смешанными производными. Соотношения Максвелла. Применение метода термодинамических потенциалов для определения соотношений между механическими и термическими характеристиками макроскопических систем.
3. **Термодинамические потенциалы сложных систем с переменным числом частиц.** Химический потенциал. Большой термодинамический потенциал. Основное уравнение термодинамики для сложных систем с переменным числом частиц.

УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1. **Общие условия равновесия и устойчивости термодинамических систем.** Принцип виртуальных перемещений. Общее условие равновесия различных систем (изолированная система, система в термостате при постоянном объеме, система в термостате при постоянном внешнем давлении и др.). Условия равновесия двухфазной однокомпонентной системы. Условия устойчивости равновесия однородной системы.
2. **Принцип Ле-Шателье – Брауна.** Формулировка принципа Ле-Шателье – Брауна. Примеры применения принципа Ле-Шателье – Брауна для анализа устойчивости равновесия различных термодинамических систем.

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

1. **Классификация фазовых переходов по Эренфесту.** Фазы и фазовые превращения. Классификация фазовых переходов по Эренфесту.
2. **Фазовые переходы 1 рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.** Примеры фазовых переходов 1 рода. Удельная теплота перехода. Вывод дифференциаль-

ного уравнения Клапейрона-Клаузиуса. Применение уравнения Клапейрона-Клаузиуса к описанию фазового перехода «жидкость-пар». Уравнение кривой испарения.

- 3. Фазовые переходы 2 рода. Уравнения Эренфеста.** Определение фазового перехода 2 рода, примеры. Вывод уравнений Эренфеста. Физический смысл уравнений Эренфеста. Пример: термодинамика сверхпроводящего перехода.

ТЕРМОДИНАМИКА РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- 1. Охлаждение газа при необратимом и обратимом адиабатных расширениях.** Эффект Джоуля-Томсона. Вывод дифференциального коэффициента Джоуля-Томсона. Температура инверсии, ее связь с постоянными Ван-дер-Ваальса и критической температурой. Охлаждение газа при обратимом адиабатном расширении.
- 2. Термодинамика диэлектриков и магнетиков.** Основное уравнение термодинамики для диэлектриков и магнетиков. Магнестрикция, электрострикция. Пьезоэффект. Магнитное (магнитокалорический эффект) и ядерное охлаждения.
- 3. Термодинамика излучения.** Понятие теплового излучения. Коэффициенты пропускания, поглощения и отражения. Абсолютно черное тело, зеркальное (белое) тело, абсолютно прозрачное тело. Закон Кирхгофа. Закон Стефана-Больцмана. Термическое и калорическое уравнение состояния и энтропия равновесного излучения. Термодинамические потенциалы и условие устойчивости равновесного излучения.
- 4. Термодинамика плазмы.** Определение плазмы. Условие полной ионизации. Внутренняя энергия плазмы. Термическое уравнение состояния плазмы.

ТЕРМОДИНАМИКА НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ

- 1. Исходные положения и основные уравнения термодинамики необратимых процессов.** Основные уравнения термодинамики линейных необратимых процессов (теплопроводность, диффузия, вязкость). Кинетические коэф-ты.
- 2. Уравнения баланса и законы сохранения.**
- 3. Принцип Кюри. Диссипативные функции Онзагера.** Принцип симметрии Кюри. Диссипативные функции Онзагера.
- 4. Вариационные принципы термодинамики необратимых процессов.** Принцип наименьшего рассеяния энергии Онзагера. Принцип минимума производства энтропии Пригожина. Вариационный принцип Онзагера. Устойчивость стационарных состояний. Принцип Ле-Шателье в неравновесной термодинамике.

4.2. Практические занятия

СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

№ темы	Тема занятия	Задания для выполнения в аудитории	Задания на дом	Число часов
1	Первое начало термодинамики	№№1,2,3,4,5	№№6,7,8	4
2	Термодинамическая теория теплоемкости	№№9,10,11,12	№№ 13,14,15	2
3	Второе начало термодинамики. Энтропия	№№16,17,18,19	№№ 21,22,23	2
Контрольная работа		Темы 1-3		2
4	Методы термодинамики	№№24,25,26,27	№№28,29,30	2
5	Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем	№№31,32,33,34	№№35,36,37	2
6	Фазовые переходы	№№38,39,40,41	№№42,43	2
7	Термодинамика различных физических систем	Семинарское занятие: обсуждение вопросов для самостоятельного изучения	Подготовка к семинарскому занятию по контрольным вопросам	2
Итого				18

Задания для выполнения на практических занятиях

1. Два моля кислорода очень медленно переводятся из состояния 1 в состояние 2. Какое количество теплоты необходимо подвести к газу, если в координатах PV процесс изображается прямой линией? В состоянии 1 газ характеризуется параметрами $P = 1 \text{ атм}$, $V = 24,6 \text{ л}$, $T = 300 \text{ К}$, $P = 3P$, $V = 2V$.
2. Вычислить работу испарения 1 моля воды при переходе ее в пар при 100°C и нормальном давлении. Определить количество теплоты, сообщаемое при этом воде.
3. Вычислить работу, совершаемую за цикл перемагничивания единицы объема сердечника длинного соленоида, если известно, что площадь петли гистерезиса на диаграмме с осями (H, J) равна S .

4. Показать, что элементарная работа поляризации единицы объема диэлектрика равна $\delta W = -(1/4\pi)E \cdot dD$, а работа поляризации в собственном смысле равна $\delta W_c = E \cdot dP$.
5. Термическое и калорическое уравнения состояния идеального электронного газа связаны соотношением $PV = 2/3 E$. Найти для этого газа уравнение адиабаты в переменных P, V . E – внутренняя энергия газа.
6. Идеальный газ расширяется по закону $p = aV$. Найти графически работу, произведенную газом при увеличении объема от V_1 до V_2 . Поглощается или выделяется тепло при таком процессе?
7. Воздух находится в термически изолированной комнате объемом 27 м³, в которой имеется небольшое отверстие. Через него воздух может просачиваться наружу, где давление равно 1 атм. Какое количество тепла необходимо подвести в комнату, чтобы температура медленно увеличивалась от 0 до 20°C? Теплоемкость воздуха можно считать постоянной $C_p = 103$ Дж/(кг • К), $\gamma = 1,41$
8. Найти работу, совершаемую над молем идеального газа и количество тепла, получаемое им при сжатии от объема V_1 до объема V_2 в политропическом процессе $pV^n = const$.
9. Молярная теплоемкость идеального газа при некотором процессе изменяется по закону $C = \alpha/T$, где α - постоянная величина. Найти уравнение, связывающее параметры P и V в этом процессе.
10. Вычислить разность $C_p - C_v$ для газа Ван-дерВаальса.
11. Уравнение состояния некоторой термодинамической системы имеет вид $P = AT^3$, причем коэффициент пропорциональности A зависит от объема, но не зависит от температуры. Найти $\partial C_v / \partial V$ в точке $P = 10^5$ Па, $T = 300$ К.
12. Процессы $PV^2 = const$, $P^2V = const$, $P/V = const$ являются политропными $PV^n = const$ с различными показателями политропы n . Вычислить соответствующие им теплоемкости.
13. На плоскости с координатными осями V и P через некоторую точку A проведены изотерма T и адиабата S идеального газа. Показать, что политропные процессы DAD' и EAE' происходят при отрицательной и положительной теплоемкости соответственно.
14. Моль неидеального газа находится в неограниченном сверху цилиндре, помещенном в однородное поле силы тяжести. Вычислить теплоемкость газа.
15. Определить теплоемкости идеального газа в следующих процессах: а) $PV^2 = const$, б) $P^2V = const$, в) $P/V = const$.

16. Работу двигателей внутреннего сгорания можно моделировать циклом, состоящим из адиабаты, изобары и изохоры. Определить теоретически КПД такого двигателя, если известно, что отношение максимального и минимального объемов газа (степень сжатия) - n .
17. Найти КПД двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Дизеля. На участке 1 -2 – адиабатное сжатие атмосферного воздуха, 2 -3 изобарное расширение (впрыскивание горючей смеси и ее сгорание), 3 -4 адиабатное расширение, 4 -1 – изохорное охлаждение. Параметрами цикла является степень сжатия $\varepsilon = V_1 / V_2$ и степень предварительного расширения $\rho = V_1 / V_2$.
18. Вычислить энтропию газа Ван – дер – Вальса и найти уравнение его адиабаты.
19. Показать, что энтропия увеличивается, когда, например, горячая вода отдает теплоту такой же массе холодной воды, и температуры их выравниваются.
20. Идеальный газ с показателем адиабаты γ совершает цикл, состоящий из: изохоры, адиабаты и изотермы, причем изотермический процесс происходит при максимальной температуре цикла. Найти КПД каждого цикла, если температура в его пределах изменяется в n раз.
21. Железо массой 200 г при температуре 100 °С опущено в калориметр, в котором находится 300 г воды при температуре 12 °С. Пренебрегая теплоемкостью калориметра, найти изменение энтропии системы при выравнивании температур. Удельная теплоемкость железа 500 Дж/кг·К.
22. Некоторое количество воды нагревают от 10 до 100 °С и дают ей полностью выкипеть. Какой должна быть масса воды, чтобы ее энтропия в данном процессе изменилась на 3,61 кДж/К (парообразованием при $t < 100^\circ\text{C}$ пренебречь).
23. Методом циклов установить зависимость давления насыщенного пара от температуры.
24. Найти термодинамические потенциалы F, Φ, H для моля одноатомного идеального газа.
25. Определить термодинамические потенциалы при независимых переменных (P, H) и (T, F) .
26. Показать, что для веществ, у которых объем линейно зависит от температуры T , теплоемкость C_p не зависит от давления.
27. Найти уравнение адиабаты и уравнение состояния идеального газа, зная его энтальпию: $H = C_p \cdot P^{(\gamma-1)/\gamma} \cdot \exp((s-s_0)/C_p)$.

28. Методом циклов найти зависимость ЭДС гальванического элемента от температуры.
29. Показать, что для веществ, у которых давление является линейной функцией температуры T , теплоемкость C_V не зависит от объема.
30. Энергия Гиббса некоторой системы равна: $\Phi = aT(1 - \ln T) + RT \ln P - TS_0$, где a, R и S_0 - const. Найти термическое и калорическое уравнения состояния этой системы.
31. Найти условие равновесия в системе, состоящей из жидкости (1) и пара (2) при $T = \text{const}$, $V = \text{const}$.
32. Показать, что в системе с $S = \text{const}$ и $P = \text{const}$ равновесие наступает при минимуме энтальпии H , а в системе с $S = \text{const}$ и $V = \text{const}$ - при минимальной внутренней энергии.
33. Определить условия равновесия двух фаз разных веществ, т.е. двухфазной двухкомпонентной системы, когда каждый компонент входит в состав только одной фазы.
34. Определить условия равновесия системы во внешнем силовом поле.
35. Для области температур, в которых удельный объем жидкости можно пренебречь по сравнению с удельным объемом пара, найти зависимость давления насыщенного пара от температуры. Удельную теплоту парообразования считать не зависящей от T .
36. Идеальный газ находится в адиабатно изолированном цилиндре с поршнем под постоянным давлением. Непосредственно вычислив вариации энтропии δS и $\delta^2 S$, показать, что при равновесии энтропия является максимальной.
37. Показать, что если в некотором состоянии $(\partial T / \partial S)_p = 0$, то для устойчивости такого состояния должна одновременно обращаться в нуль также и вторая производная, а $(\partial^3 T / \partial^3 S) > 0$.
38. Найти давление насыщенного пара, учитывая зависимость удельную теплоту перехода λ от температуры.
39. Найти выражение для скачка коэффициента теплового расширения $\Delta\alpha = \alpha_n - \alpha_s$ и скачка $\Delta K = K_n - K_s$ модуля упругости при сверхпроводящем переходе.
40. Установить связь между удельными теплотами плавления λ_{23} (теплота перехода твердого тела 3 в жидкость 2), испарения жидкости λ_{12} и сублимации λ_{13} .
41. Под каким давлением вода будет кипеть при 95°C ? Удельная теплота испарения воды равна $2258,4$ Дж/г.

42. Найти температурную зависимость теплоты фазового перехода $d\lambda / dT$.
43. Определить коэффициент Джоуля-Томсона в критической точке.

5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

1. Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям:
Темы – в соответствии с таблицей практических занятий.
Содержание – в соответствии с программой и контрольными вопросами.
2. Выполнение домашних заданий – в соответствии с таблицей. Срок сдачи – не позже 2-х недель после завершения изучения темы.
3. Подготовка к практическим занятиям состоит в изучении материалов лекции, соответствующих разделов учебника, самопроверка осуществляется по контрольным вопросам, которые выдаются студентам в начале семестра. Контрольные вопросы разработаны для каждой темы и служат основой для составления проверочного теста, проводимого в начале практического занятия, с целью осуществления текущего контроля успеваемости студентов.
4. Контрольная работа содержит задания по темам 1-4, проводится на 6 неделе. Подготовка к контрольной работе состоит в выполнении домашних задач и повторения основных законов и формул.
5. Вопросы, выносимые на самостоятельное изучение:
Тема: «Фазовые переходы 2 рода» - Термодинамика сверхпроводящего перехода.
Тема: «Термодинамика диэлектриков и магнетиков» - Пьезоэффект. Магнитное (магнитокалорический эффект) и ядерное охлаждения.
Тема: «Термодинамика излучения» - Термическое и калорическое уравнение состояния и энтропия равновесного излучения. Термодинамические потенциалы и условие устойчивости равновесного излучения.
Тема: «Термодинамика плазмы» - Внутренняя энергия плазмы. Термическое уравнение состояния плазмы.
Тема: «Вариационные принципы термодинамики необратимых процессов» - Принцип минимума производства энтропии Пригожина. Вариационный принцип Онзагера. Устойчивость стационарных состояний. Принцип Лешателле в неравновесной термодинамике.

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
1	ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних заданий	2
2	ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних заданий, подготовка к тесту	4
3	ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних заданий	2
4	ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ЭНТРОПИЯ.	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних заданий; <i>Подготовка к контрольной работе</i>	4
5	МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИКИ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, подготовка к тесту	2
6	УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних заданий	4
7	ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних заданий, самостоятельное изучение некоторых вопросов	4
8	ТЕРМОДИНАМИКА РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, самостоятельное изучение некоторых вопросов	4
9	ТЕРМОДИНАМИКА НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, выполнение домашних заданий, самостоятельное изучение некоторых вопросов	4
	ПОДГОТОВКА К ЭКЗАМЕНУ	Подготовка по контрольным вопросам	10
	Итого по дисциплине		40

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Лекции проводятся как в традиционной форме, так и с использованием интерактивной доски и мультимедийного оборудования. При проведении лекционных и практических занятий часто используется дискуссионная форма обсуждения теоретических вопросов, что обусловлено спецификой дисциплины и существованием в науке разных взглядов на ряд изучаемых вопросов.

Практические занятия ориентированы на приобретение студентами навыков решения физических задач в области термодинамики. Преподаватель совместно со студентами обсуждает особенности построения алгоритма решения данного класса задач, а так же подходы к решению каждой конкретной задачи; студенты самостоятельно реализуют разработанный алгоритм, после чего обсуждаются полученные результаты. В ряде случаев прогнозируется поведение исследуемой физической системы (проблемной ситуации) в измененных условиях, выявляется диапазон ее возможных физических состояний, функциональные свойства и т.п.

При изучении дисциплины «Термодинамика» применяются следующие интерактивные технологии: метод заданий, метод презентации информации – на лекционных и практических занятиях; на лекциях наряду с традиционным подходом используются продуктивные методики, стимулирующие активное участие студентов в обсуждаемых вопросах теории – проблемная лекция, лекция-дискуссия. Объем занятий, проводимых в интерактивной форме, составляет 10 часов, в том числе:

- 1)Тема: «Первое начало термодинамики. Энтропия» - 2 часа.
- 2)Тема: «Второе начало термодинамики» - 2 час.
- 3)Тема «Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем» - 2 час.
- 4)Тема «Фазовые переходы» - 2 час.
- 5)Тема «Термодинамика различных физических систем» - 2 час.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

7.1. Вопросы для самоподготовки студентов к практическим занятиям и составлению тестов к разделам дисциплины

Основные понятия и базовые принципы термодинамики

1. Какими независимыми параметрами можно характеризовать состояние равно весной термодинамической системы в отсутствие внешних полей?
2. Как принято называть соотношение, связывающее между собой значения термодинамических параметров вещества в состоянии термодинамического равновесия? Какой вид имеет это соотношение для идеального газа?
3. Что такое состояние термодинамического равновесия?
4. Что такое эмпирическая абсолютная шкала температур?

Первое начало термодинамики

1. Как можно подсчитать работу, произведенную термодинамической системой при переходе ее от одного состояния в другое? Зависит ли эта работа от характера термодинамического процесса, пройденного системой? Является ли бесконечно малое приращение работы полным дифференциалом в математическом отношении?
2. Какие термодинамические процессы называются обратимыми?
3. Что такое круговой термодинамический процесс? Являются ли все круговые процессы обратимыми?
4. Каким физическим и математическим условиям должна удовлетворять величина, которую можно назвать функцией состояния системы? Какие термодинамические величины являются функциями состояния системы?
5. Является ли бесконечно малое приращение количества тепла dQ в математическом отношении полным дифференциалом какой-либо функции $Q(p, T)$ или $Q(V, T)$?
6. Какова обобщенная формула для вычисления работы термодинамической системы в малом процессе? Как вычисляется работа расширения, работа сил поверхностного натяжения, работа по поляризации диэлектрика и намагничиванию магнетика?
7. Что называют термическим уравнением состояния термодинамической системы? Как оно записывается для идеального и реального газов?
8. Что называют калорическим уравнением состояния термодинамической сис-

темы?

9. Как записывается вириальная форма уравнения состояния? Что такое вириальные коэффициенты?
10. В чем состоит содержание первого закона термодинамики? Как записывается первый закон термодинамики в обобщенной форме?
11. Какая связь между результирующей работой, совершенной системой при круговом термодинамическом процессе, и суммарным количеством тепла, взятым и отданным системой у источников тепла?
12. Почему первый закон термодинамики эквивалентен утверждению о невозможности построения вечного двигателя первого рода?

Термодинамическая теория теплоемкости

1. Что такое теплоемкость тела? При каких условиях эта величина приобретает определенный физический смысл? Ограничены ли какими-нибудь пределами возможные значения теплоемкости? При каких условиях теплоемкость бывает отрицательной величиной?
2. Выведите обобщенную формулу для теплоемкости термодинамической системы.
3. Как при помощи математического выражения первого закона термодинамики найти связь между двумя значениями теплоемкости идеального газа C_p и C_v ?
4. В чем физическая причина различия значений теплоемкости C_p и C_v ?
5. Что называют теплотой изотермического изменения какого-либо параметра термодинамической системы?
6. Приведите примеры естественных и технических адиабатных процессов. Чему равна работа, совершаемая идеальным газом при адиабатическом процессе? При изотермическом процессе?
7. За счет какого источника энергии совершается работа при изотермическом процессе? Справедливо ли утверждение, что газ, сжатый в баллоне, обладает запасом потенциальной энергии, аналогично сжатой пружине?
8. К какому предельному значению стремится величина теплоемкости тела при приближении условий термодинамического процесса, для которого определяется теплоемкость тела, к изотермическим (адиабатным)?
9. Какому условию удовлетворяют процессы, называемые политропическими? Как записывается уравнение этих процессов? Как связан показатель политропы со значением теплоемкости системы в соответствующем процессе?

Второе начало термодинамики. Энтропия

1. Дайте качественную формулировку второго начала термодинамики. Чем отличаются процессы превращения работы в теплоту от процессов

- превращения теплоты в работу?
2. Какому требованию должно удовлетворять устройство, совершающую механическую работу за счет подводимого количества тепла для того, чтобы это устройство могло считаться тепловой машиной в термодинамическом смысле?
 3. Можно ли назвать тепловой машиной цилиндр, наполненный газом и замкнутый поршнем, который в результате нагревания (охлаждения) газа совершает непрерывное движение только в одну сторону?
 4. Что называется к.п.д. тепловой машины? Чему равен к.п.д. цикла Карно, осуществляемого с идеальным газом? Выведите формулу.
 5. В каком соотношении находится к.п.д. тепловой машины, работающей по произвольному круговому циклу, с к.п.д. машины Карно с теми же тепловыми резервуарами?
 6. Какие формулировки можно дать второму закону термодинамики? Как можно доказать эквивалентность формулировок Клаузиуса и Томпсона-Планка?
 7. Справедливо ли утверждение, что второй закон термодинамики не допускает возможности полного превращения тепла в работу?
 8. В чем разница "вечных двигателей" первого и второго рода?
 9. Почему "осуществление" вечного двигателя второго рода было бы практически эквивалентно "построению" вечного двигателя первого рода?
 10. Что можно сказать о значении к.п.д. необратимых тепловых машин по сравнению с к.п.д. обратимых машин, работающих в том же интервале температур? В чем содержание теорем Карно? Как они доказываются?
 11. Что такое приведенное количество тепла? Какому условию удовлетворяют приведенные количества тепла для цикла Карно? Какому условию они удовлетворяют для произвольного кругового процесса?
 12. Как записывается дифференциал энтропии dS ? Является ли энтропия функцией состояния? Как записать второе начало термодинамики с помощью функции энтропии? Каковы свойства энтропии?
 13. Как изменяется энтропия при обратимых и необратимых процессах? Чему равно значение dS для необратимого кругового процесса?
 14. Изменяется ли энтропия при адиабатических процессах?
 15. Как записывается выражение для энтропии идеального газа?
 16. Как записывается основное уравнение термодинамики для равновесных процессов?
 17. Как вычисляется изменение энтропии в равновесных процессах?
 18. Изменяется ли энтропия идеального газа при его адиабатном расширении в

пустоту?

19. Как с помощью второго начала термодинамики можно найти соотношение между значениями C_p и C_v для произвольного вещества? Когда значения теплоемкости C_p и C_v равны? Когда разность этих величин стремится к бесконечности?
20. Почему все процессы, сопровождающиеся механическим трением, являются необратимыми процессами?
21. Почему циклы всех практически осуществляемых тепловых машин необратимы?
22. Как записывается второе начало термодинамики для неравновесных процессов?
23. Каковы следствия из закона возрастания энтропии для неравновесных процессов?
24. Что происходит с энтропией системы при взаимной диффузии двух различных газов? В чем суть парадокса Гиббса?
25. Сформулируйте пределы применимости второго начала термодинамики.

Методы термодинамики

1. В чем состоит метод круговых процессов (метод циклов)?
2. Что называют термодинамическим потенциалом?
3. В чем состоит метод термодинамических потенциалов?
4. Что называют энтальпией? Каков ее физический смысл? Как записывается ее полный дифференциал?
5. Что называют свободной энергией Гельмгольца? Каков ее физический смысл? Как записывается ее полный дифференциал?
6. Что называют термодинамическим потенциалом Гиббса? Как записывается его полный дифференциал?
7. Как выражаются механические и термические характеристики (теплоемкость, модуль упругости) термодинамической системы через термодинамические (характеристические) функции и их производные?

Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем

1. Сформулируйте принцип виртуальных перемещений.
2. Сформулируйте общие условия термодинамического равновесия и устойчивости.
3. В каком направлении изменяется энтропия изолированной системы при приближении этой системы к состоянию термодинамического равновесия?
4. Сформулируйте условия устойчивого равновесия для системы в термостате при постоянном объеме.
5. Сформулируйте условия устойчивого равновесия для системы в термостате

при постоянном внешнем давлении.

6. Сформулируйте условия устойчивого равновесия для двухфазной однокомпонентной системы.
7. Сформулируйте условия устойчивого равновесия для однородной системы.
8. В чем состоит принцип Ле Шателье – Брауна? Приведите примеры его проявления.

Фазовые переходы

1. Что такое термодинамическая фаза вещества?
2. Совпадает ли понятие термодинамической фазы вещества с понятием агрегатного состояния вещества?
3. Как классифицируются фазовые переходы по Эренфесту?
4. Что называется фазовым переходом 1 рода? Каковы его отличительные признаки? Приведите примеры.
5. Что называется фазовым переходом 2 рода? Каковы его отличительные признаки? Приведите примеры. Запишите уравнения Эренфеста. Каков их смысл?
6. Какие величины связывают между собой уравнение Клапейрона-Клаузиуса для однокомпонентной двухфазной системы? Из каких соображений выводится это уравнение?
7. Что такое РТ-диаграмма вещества? Как на ней выглядит график процесса возгонки вещества? Как применить уравнение Клапейрона-Клаузиуса к процессу возгонки?
8. Что такое тройная точка вещества? Каковы численные значения параметров некоторых веществ в их тройных точках?
9. Возможен ли непрерывный процесс превращения жидкой фазы вещества в кристаллическую?
10. В чем заключается содержание так называемого правила фаз?
11. Как, пользуясь РТ-диаграммой, объяснить поведение твердой углекислоты при атмосферном давлении?
12. Почему сжатая в баллоне жидкая углекислота охлаждается и кристаллизуется при ее выпуске в атмосферу?
13. Как посчитать изменение энтропии вещества при его фазовом превращении первого рода?
14. Что такое метастабильные состояния твердой и жидкой фаз вещества? Возможны ли перегревы кристаллов?
15. Какие превращения носят названия превращений первого рода?
16. Какие примеры фазовых превращений первого и второго рода в твердых телах вам известны?

17. Как зависит от температуры теплоемкость вблизи фазовых превращений второго рода?
18. Что такое критическая точка?
19. Какое значение имеет изотермическая сжимаемость вещества, скрытая теплота парообразования и поверхностное натяжение вещества в критической точке?
20. Как изменяются удельные объемы жидкой и газовой фаз вещества вблизи ее критической точки?
21. В каком интервале характерных для данного вещества температур оно может образовать равновесную двухфазную систему жидкости и ее насыщающего пара? Будет ли в данном интервале температур двухфазная равновесная система существовать при любом давлении?
22. Что такое насыщенный пар? От чего зависит давление насыщенного пара?
23. Что такое метастабильные состояния вещества? Как они осуществляются? Как они изображаются на термодинамической диаграмме?

Термодинамика различных физических систем

1. В чем сущность процесса дросселирования газа? Является ли выпуск сжатого газа в пустоту процессом дросселирования? Как изменяется температура идеального (реального) газа при выпуске его в пустоту?
2. В чем заключается эффект Джоуля-Томпсона? Какова принципиальная схема процесса сжижения газа, использующего эффект дросселирования?
3. Какая температура называется температурой инверсии эффекта Джоуля-Томпсона? Какое значение имеют температуры инверсии для воздуха, водорода, гелия? Почему опасно выпускать сжатый водород из баллона, даже в отсутствии огня в помещении?
4. Какая существует связь между значениями температуры инверсии эффекта Джоуля-Томпсона и критической температурой для газа Ван-дер-Ваальса?
5. Какие значения должны иметь величины a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса, чтобы газ всегда охлаждался (нагревался) при дросселировании?
6. В чем сущность магнитного метода получения сверхнизких температур? Почему магнитный метод охлаждения применим только в условиях предварительного глубокого охлаждения вещества? Какие именно этапы предварительного охлаждения веществ должны предшествовать применению магнитного охлаждения? Как измеряются достигнутые магнитным методом низкие температуры? Можно ли достигнуть магнитным методом охлаждения вещества до абсолютного нуля температуры?

7. Каким выражением определяется работа по поляризации диэлектрика? Чему равна работа поляризации в собственном смысле?
8. Как записывается основное уравнение термодинамики для диэлектрика?
9. Каким выражением определяется работа по намагничиванию магнетика? Чему равна работа намагничивания в собственном смысле?
10. Как записывается основное уравнение термодинамики для магнетика?
11. Какое явление называют магнитострикцией? Какова его физическая природа?
12. Какое явление называют магнитоупругим эффектом? Пьезомагнитным эффектом. Какова его физическая природа?
13. Какое явление называют пьезоэлектрическим эффектом? Какова его физическая природа?
14. В чем сущность методов магнитного и ядерного охлаждения? Приведете их термодинамическое обоснование.
15. Что называют равновесным излучением? Дайте определение абсолютно черному телу, серому телу, белому (зеркальному) телу, прозрачному телу. Что называют коэффициентами отражения, поглощения и пропускания?
16. В чем состоит термодинамическое обоснование законов теплового излучения: закона Кирхгофа, закона Стефана-Больцмана, закона Вина?
17. Что называют плазмой? Сформулируйте условие полной ионизации?
18. Каким выражением определяется внутренняя энергия плазмы, свободная энергия плазмы?
19. Запишите термическое уравнение состояние плазмы, выражения для ее энтропии и изохорной теплоемкости.

Термодинамика необратимых процессов

1. Какие процессы называют необратимыми? Приведите примеры необратимых процессов.
2. Как записываются основные уравнения термодинамики линейных необратимых процессов?
3. В чем сущность понятия локального равновесия? Сформулируйте три основных положения неравновесной термодинамики.
4. Запишите уравнение баланса энтропии.
5. Сформулируйте принцип симметрии Кюри?
6. Что называют диссипативными функциями Онзагера? Какую роль они играют в анализе необратимых процессов?
7. В чем сущность вариационных принципов термодинамики необратимых процессов (принцип Онзагера, принцип минимума производства энтропии Пригожина)?

7.2. Примерные вопросы к экзамену

1. Термодинамическая система, ее параметры и равновесие (основные понятия). Постулаты термодинамики. Температура.
2. Внутренняя энергия термодинамической системы. Работа и теплота.
3. Примеры расчета работы термодинамической системы в различных процессах (расширение газа, растяжение пленки, поляризация диэлектрика, намагничивание магнетика).
4. Термическое и калорическое уравнения состояния. Термическое уравнение состояния для идеального и реального газов. Вириальная форма уравнения состояния.
5. Первое начало термодинамики.
6. Определение теплоемкости. Теплоемкость простых и сложных систем. Уравнение Майера. Теплота изотермического изменения внешних параметров.
7. Основные термодинамические процессы и их уравнения.
8. Второе начало термодинамики, сущность и основные определения.
9. Обратимые и необратимые процессы. Примеры.
10. Циклы. Обратимый цикл Карно, расчет термического КПД цикла Карно. Теорема Карно.
11. Количественная формулировка второго начала термодинамики. Энтропия. Свойства энтропии.
12. Основное уравнение термодинамики для равновесных процессов. Вычисление энтропии в равновесных процессах.
13. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса. Следствия из закона возрастания энтропии для неравновесных систем: изменение энтропии при диффузии, теплопроводности.
14. Пределы применимости второго начала термодинамики.
15. Третье начало термодинамики. Недостижимость абсолютного нуля температур.
16. Методы термодинамики. Метод круговых процессов. Пример: применение метода круговых процессов для определения зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры.
17. Термодинамические потенциалы и их дифференциалы (внутренняя энергия, энергия Гельмгольца, энергия Гиббса, энтальпия), физический смысл.

18. Общие условия термодинамического равновесия и устойчивости для различных систем.
19. Условия равновесия двухфазной однокомпонентной системы.
20. Условия устойчивости равновесия однородной системы. Принцип Лешателье – Брауна.
21. Классификация фазовых переходов по Эренфесту. Фазовые переходы I рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Пример: применение уравнения Клапейрона –Клаузиуса к описанию фазового перехода «жидкость - пар»; вывод уравнения кривой испарения $P=P(T)$.
22. Фазовые переходы II рода. Уравнения Эренфеста.
23. Охлаждение газа при необратимом адиабатическом расширении. Эффект Джоуля-Томсона. Дифференциальный коэффициент Джоуля-Томсона. Температура инверсии. Возможности охлаждения газа при обратимом адиабатическом расширении.
24. Термодинамика диэлектриков и магнетиков.
25. Термодинамика теплового излучения.

7.3. Примерные задания для контрольной работы

Вариант 1

1. Порция азота нагревается от 300 до 400 К таким образом, что объем газа поддерживается прямо пропорциональным его абсолютной температуре $V = \alpha \cdot T$, где $\alpha = 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{К}$. Начальное давление азота $p_0 = 100$ кПа. Найти работу газа в этом процессе.
2. С одним молем идеального газа совершают замкнутый процесс, состоящий из двух изохор и двух изобар. Температуры в точках 1 и 3 соответственно T_1 и T_2 . Определить работу, совершенную газом за цикл, если известно, что точки 2 и 4 лежат на одной изотерме.
3. 1 моль идеального одноатомного газа подвергся расширению в 2 раза в ходе политропного процесса $PV^2 = \text{Const}$. Найти изменение энтропии газа.

Вариант 2

1. Вычислить разность $C_p - C_v$ для газа Ван-дерВаальса.
2. Идеальный газ совершает цикл, состоящий из адиабаты, изобары и изохоры. Показатель адиабаты 1,5. При адиабатическом расширении температура уменьшается в 2 раза. Найти КПД цикла.
3. Найти приращение энтропии 2 молей воды, взятой при $t_0 = 100$ °С, если вода сначала испаряется при данной температуре, затем полученный пар нагревается до температуры 200 °С. Теплоемкость пара выражается эмпирической формулой $c_p = 33,83 + 0,0084 \cdot T + 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Вариант 3

1. Идеальный газ расширяется по закону $p = \alpha V$. Найти графически работу, произведенную газом при увеличении объема от V_1 до V_2 . Поглощается или выделяется тепло при таком процессе?
2. Одноатомный газ, в количестве 0,1 кмоль под давлением 100 кПа, занимал объем 5 м^3 . Газ сжимался изобарно до объема 1 м^3 , а затем сжимался адиабатно и расширялся при постоянной температуре до начальных объема и давления. Построить график процесса. Найти термический КПД цикла.
3. Некоторое количество воды нагревают от 10 до 100 °С и дают ей полностью выкипеть. Какой должна быть масса воды, чтобы ее энтропия в данном процессе изменилась на 3,61 кДж/К (парообразованием при $t < 100$ °С пренебречь).

7.4. Порядок проведения экзамена

Для получения допуска к экзамену студент должен в семестре выполнить не менее 80% домашних заданий, предусмотренных учебной программой и успешно выполнить контрольную работу. Экзамен проходит по экзаменационным билетам, включающим два теоретических вопроса и задачу.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

Оценка	Полнота, системность, прочность знаний	Обобщенность знаний
«5»	Изложение полученных знаний в устной, письменной или графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются единичные незначительные ошибки, самостоятельно исправляемые студентами.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений; свободное оперирование известными фактами и сведениями с использованием сведений из других предметов.
«4»	Изложение полученных знаний в устной, письменной и графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются отдельные незначительные ошибки, исправляемые студентами после указания преподавателя на них.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений, в которых могут быть отдельные незначительные ошибки; подтверждение изученного известными фактами и сведениями.
«3»	Изложение полученных знаний неполное, однако это не препятствует усвоению последующего программного материала; допускаются отдельные существенные ошибки, исправление с помощью преподавателя.	Затруднения при выполнении существенных признаков изученного, при выявлении причинно-следственных связей и формулировке выводов.
«2»	Изложение учебного материала неполное, бессистемное, что препятствует усвоению последующей учебной информации; существенные ошибки, не исправляемые даже с помощью преподавателя.	Бессистемное выделение случайных признаков изученного; неумение производить простейшие операции анализа и синтеза; делать обобщения, выводы.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Термодинамика»

а) основная литература:

1. Базаров, И.П. Термодинамика [Текст.]: учебник / И.П.Базаров. - 5-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2010. – 375 с.
2. Новиков, И.И. Термодинамика [Текст.]: учеб. пособие / И. И. Новиков. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2009. – 592 с.
3. Ансельм А.И. Основы статистической физики и термодинамики: учебное пособие /А.И.Ансельм.- 2-е изд., стер.- СПб.: Лань, 2007.- 448с.

б) дополнительная литература:

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики [Текст]: в 5 т.: учеб. пособие: рек. Мин.обр. РФ/Д.В.Сивухин Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – 4-е изд., стер.. М.:ФИЗМАТЛИТ: Изд-во Моск. физико-тех. ин-та , 2006. – 544 с.
2. Леонтович, М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика [Текст.]: учебник / М.А.Леонтович. - 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2008. – 432 с.
3. Корявов, В.П. Методы решения задач в общем курсе физики. Термодинамика и молекулярная физика [Текст.] : учеб. пособие / В.П.Корявов. – М.: Высш. шк., 2009. – 359 с.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	Курсы общей физики для студентов и школьников http://www.ph4s.ru	Некоммерческий проект, создан с целью оказания помощи школьникам и студентам в изучении физики и других предметов. На этом ресурсе размещены различные материалы: учебники, задачки, лекции и другие пособия. Все выложенные материалы бесплатны для пользователей и при скачивании не требуют какой-либо регистрации.
2	http://ru.wikipedia.org	Интернет-энциклопедия образовательных изданий, в которой собраны электронные учебники, справочники, а также статьи различной тематики. Удобный поиск по ключевым словам, отдельным темам, отраслям знания.

3	Электронная библиотечная система « Университетская библиотека-online » http://www.biblioclub.ru	ЭБС по тематике охватывает всю область естественнонаучных знаний и предназначена для использования в учебном процессе в высшей школе преподавателями и студентами.
	Единое окно доступа к образовательным ресурсам window.edu.ru/window/library	Раздел сайта «математика и естественнонаучное образование» содержит большой перечень учебников и учебно-методических пособий по всем разделам курса молекулярной физики и термодинамики.
4	Электронный ресурс библиотеки АмГУ: http://www.amursu.ru/	Содержит электронный каталог, электронную библиотеку, ссылки на разнообразные образовательные ресурсы в российском интернете.
5	Новиков, И. И. Термодинамика : учеб. пособие [Электронный ресурс] / И. И. Новиков. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2009. – 592 с. : ил. - Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=286 .	В учебном пособии рассмотрены три начала термодинамики, термодинамическое равновесие, основные термодинамические процессы, термодинамические свойства твердых, жидких и газообразных тел, термодинамика газов и газоподобных систем, термодинамика сложных систем, термодинамический анализ рабочих процессов преобразования энергии. Учебное пособие предназначено для студентов физических и технических специальностей.
	Леонтович, М. А. Введение в термодинамику. Статическая физика : учеб. пособие [Электронный ресурс] / М. А. Леонтович. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2008. – 432 с. : ил. - Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=226 .	Издание содержит лекции академика М. А. Леонтовича, читавшиеся на физическом факультете МГУ. Автор не довольствуется чисто феноменологическим изложением, а раскрывает истинный смысл понятий и законов термодинамики с более глубокой молекулярно-статистической точки зрения.

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Оборудование

1. Интерактивная доска, мультимедийное оборудование в аудитории.
2. Видеопроектор Epson.
3. Ноутбук Пентиум 100, 2003 г.

1.2. Методические рекомендации для преподавателя

Курс «Термодинамика» является одной из составных частей цикла «Теоретическая физика». Рекомендуется при планировании содержания лекционных курсов и практических занятий существенное внимание уделять применению теоретических знаний в профессиональной практике, в научной деятельности. Практическая направленность данного курса диктуется требованиями преемственности (межпредметного согласования) дисциплин теоретического блока и дисциплин специализации.

Рекомендуется сочетание в практике преподавания различных видов деятельности студентов: аудиторная (коллективная, индивидуальная) работа, исследовательская работа (в рамках НИРС), самостоятельная работа (проработка теоретических вопросов, подготовка к практическим занятиям, подготовка к контрольной работе и экзамену, выполнение домашних заданий).

При организации контроля качества знаний по дисциплине «термодинамика» целесообразно соблюдать следующие этапы:

1. Входящий контроль. Студенты, начинающие изучение данной дисциплины, подвергаются тестированию на предмет знания основных законов термодинамики в объеме общего курса физики (дисциплина «молекулярная физика», изучаемая во 2 семестре). Цель - определить уровень остаточных знаний и актуализировать базовый теоретический материал из указанного раздела общей физики, необходимый для успешного усвоения знаний в предметной области «термодинамика». Это позволяет скорректировать содержание учебного материала (если требуется) путем введения в него дополнительных упражнений, повышающих базовый уровень знаний студентов.
2. Текущий контроль. Осуществляется преподавателем, ведущим практические занятия. Как правило, он проводится в форме контрольной работы, а так же проверки выполнения домашних заданий. Проверка усвоения теоретического материала осуществляется в процессе проведения тестов открытого типа, составленных из вопросов для самоподготовки. Оценивая содержание ответов студента на эти вопросы, преподаватель выставляет оценку в соответствии с общепринятыми критериями.

3. Итоговый контроль. В завершение изучения дисциплины «термодинамика» студенты сдают семестровый экзамен. Экзаменационное задание (билет) содержит 3 вопроса, два из которых – имеют теоретический характер, один – представляет собой вычислительную задачу, по темам, вынесенным на экзамен. По итогам экзамена преподаватель выставляет студенту оценку в соответствии с общепринятыми критериями.
4. Контроль остаточных знаний. Проводится после завершения изучения полного курса теоретической физики. Форма проверки – тестирование. По итогам тестирования выставляются оценки: «5» - более 75% правильных ответов, «4» - более 60% правильных ответов, «3» - более 30% правильных ответов. Менее 30% правильных ответов – выставляется оценка «2».

Рекомендуемые сроки проведения текущего контроля:

- 1) Тест: 1-2 раздел – 4 неделя
- 2) Тест: 5 раздел – 9 неделя
- 3) Тест: 6-7 раздел – 14 неделя
- 4) Тест 8-9 разделы – 18 неделя

Проведение контрольной работы (1-4 разделы): на 8-й неделе.

1.3. Методические рекомендации студентам по самостоятельному изучению дисциплины

- 1) Для подготовки к практическим занятиям используйте конспекты лекций, учебники и учебные пособия, указанные в списке рекомендуемой основной и дополнительной литературы.
- 2) Прочитайте тему занятия, выделите те вопросы теории, которые подлежат обсуждению в аудитории.
- 3) Прочтите конспект лекции, освещающей данную тему.
- 4) Ответьте на вопросы для самопроверки. При возникновении трудностей с пониманием теоретических основ изучаемой темы, обратитесь к учебнику или методическому пособию. Целесообразно использовать в ходе подготовки учебники разных авторов, где изучаемый вопрос рассматривается с разных методических позиций.
- 5) При выполнении домашних заданий внимательно просмотрите решение аналогичных задач, рассматриваемых на учебных занятиях, осмыслите методы и методические приемы, используемые при их решении.

- 6) Постарайтесь самостоятельно воспроизвести решение этих задач; при возникновении трудностей вернитесь к тому месту в конспекте, который вызвал затруднения. Вновь повторите эту процедуру – до тех пор, пока воспроизведение не станет уверенным.
- 7) Освоив методику решения данного класса задач, приступайте к решению задач из индивидуального задания. При этом придерживайтесь следующих правил:
- Запишите краткие условия; выясните, что известно и что требуется найти.
 - Выделите объекты задачи и выясните природу происходящих с ними изменений (процессов). Запишите ключевые отношения, законы, описывающие данное физическое явление.
 - Примените эти отношения к системе объектов задачи, получите математическую модель физической системы (процесса), описанной в задаче: как правило, это система уравнений, решение которой дает ответ на требования задачи.
 - Оформите аккуратно решение задачи на листе формата А4.
- 8) На практических занятиях целесообразно иметь при себе конспекты лекций, учебники и учебные пособия, в которых изложена теория и методика решения задач по данному учебному курсу.

II. ОБУЧАЮЩИЙ РАЗДЕЛ

2.1. Краткий конспект лекций

Лекция №1 «Основные понятия и базовые принципы термодинамики» (2 часа)

1. Термодинамические системы, их основные свойства и способы описания. Характер термодинамических законов. Основные определения и понятия термодинамического описания системы (изолированная система, замкнутая система, тепловое равновесие). Макроскопические параметры. Равновесное состояние. Виды параметров, определяющих состояние систем.

Существуют два метода изучения состояний макроскопических, т.е. состоящих из огромного количества микрочастиц, систем – термодинамический и статистический. Термодинамический метод не опирается ни на какие модельные представления об атомно-молекулярной структуре веществ. Задачей термодинамического метода является установление связей между непосредственно измеряемыми в опытах величинами. Статистический метод изучения свойств макроскопических тел основан на модельных атомно-молекулярных представлениях строения вещества.

Достоинство термодинамического метода в его общности, а недостаток его заключается в том, что остается нераскрытым внутренний механизм явлений. Термодинамической системой называется любое макротело, находящееся в термодинамическом равновесии. Равновесное состояние – состояние, в котором система пребывает сколь угодно долго, если внешние условия не изменяются. Равновесный процесс – процесс, при котором все параметры системы изменяются бесконечно медленно, так что система все время находится в равновесных состояниях. Термодинамические параметры. Параметры, описывающие состояние системы и связанные уравнениями называются уравнениями состояния.

2. Постулаты термодинамики.

Первый постулат термодинамики. Температура. Нулевое начало термодинамики. Второй постулат термодинамики. Существование температуры как особой функции состояния равновесной системы. Принцип температуры. Эмпирическая температура.

Существование температуры как особой функции состояния равновесной системы. Принцип температуры: существует (не единственная) функция

состояния системы, которая остается постоянной при любом процессе, протекающем в термостате, называемой условной температурой.

3. Термодинамическое равновесие. Равновесные и неравновесные процессы. Термодинамический процесс. Равновесный и неравновесный процесс. Время релаксации.

Лекция №2 «Первое начало термодинамики» (5 часов)

1. Внутренняя энергия термодинамической системы, работа и теплота. Внутренняя энергия. Количество теплоты. Работа термодинамической системы. Вычисление работы расширения системы, работы сил поверхностного натяжения, работы поляризации диэлектрика, работы намагничивания магнетика, работы деформации твердого тела.

Внутренняя энергия системы состоит из энергии разных видов движения и взаимодействия, входящих в систему частиц. Внутренняя энергия является внутренним параметром системы и при равновесии зависит от внешних параметров и температуры. Внутренняя энергия системы является однозначной функцией ее состояния и изменяется только под влиянием внешних воздействий.

2. Термическое и калорическое уравнения состояния. Термическое и калорическое уравнения состояния для идеального газа и газа Ван-дер-Ваальса. Вириальная форма уравнения состояния.

Равновесные внутренние параметры являются функциями внешних параметров и температуры. Это приводит к существованию *термических и калорических уравнений* состояния системы. Если внутренним параметром является внутренняя энергия, то уравнение называется *калорическим*, так как с его помощью можно находить теплоемкости и другие подобные величины. Если внутренним параметром является сопряженная внешнему параметру обобщенная сила, то уравнение называется *термическим* уравнением состояния так как с их помощью вычисляется температура.

3. Физическое содержание первого начала термодинамики.

Внутренняя энергия системы может быть изменена двумя физически различными способами: 1) совершение работы системой или внешними силами над системой; 2) приведение системы в тепловой контакт с более или менее нагретым телом.

Работа является функцией процесса и приобретает смысл только при указании условий внешнего воздействия. При тепловом контакте работа не совершается, но то количество энергии, полученное или отданное системой, называется количеством тепла. Количество тепла считается положительным,

если оно подводится к системе, и отрицательным, если оно отводится от системы.

Количество тепла есть функция процесса. Для процессов в адиабате работа системой совершается только за счет убыли внутренней энергии.

Первое начало термодинамики представляет собой закон сохранения энергии.

Лекция №3 «Термодинамическая теория теплоемкости» (4 часа)

1. Определение теплоемкости. Теплоемкость как функция процесса. Термостат. Формула теплоемкости. Формула Р.Майера. Теплота изотермического изменения внешних параметров.

Теплоемкость системы это количество тепла, которое нужно подвести к системе, чтобы повысить ее температуру на один градус. Теплоемкость есть функция процесса, и приобретает однозначный смысл при указании условий нагревания системы.

Первое начало термодинамики позволяет найти значения различных теплоемкостей и установить связь между ними, если известны термическое и калорическое уравнения состояния системы.

2. Основные термодинамические процессы и их уравнения. Теплоемкость газов. Изопроцессы. Политропические процессы. Уравнение политропы. Теплоемкость в политропическом процессе.

Во всякой термодинамической системе возможны пять основных процессов: изотермический ($T = \text{const}$), адиабатный ($Q = \text{const.}$), политропный ($C = \text{const}$), изохорический ($V = \text{const}$) и изобарный ($P = \text{const}$). Функциональная связь, возникающая в случае простой системы между двумя из величин T , V , P при том или ином процессе, называется уравнением этого процесса.

Лекция №4 «Второе начало термодинамики. Энтропия» (5 часов)

1. Формулировка второго начала термодинамики. Качественная формулировка второго начала термодинамики: невозможность преобразования теплоты в работу без компенсации. Вечный двигатель 2 рода.

Второе начало, как и первое, является обобщением опытных данных по превращению теплоты в работу и работы в теплоту. Из определения понятий теплоты и работы следует, что эти две формы передачи энергии не являются равноценными: работа A может непосредственно пойти на увеличение любого вида энергии, теплота Q непосредственно, без предварительного превращения в работу, приводит лишь к увеличению внутренней энергии системы.

Как показывает опыт, при превращении работы в теплоту явление может ограничиться изменением термодинамического состояния одного лишь теп-

лополучающего тела, а при преобразовании теплоты в работу, наряду с охлаждением теплодающего тела происходит изменение термодинамического состояния других тел, участвующих в этом процессе. Если теплота Q превращается в работу A , то всегда $Q > A$, если же работа A превращается в теплоту Q , то всегда $A = Q$.

2. Обратимые и необратимые процессы. Понятие обратимого термодинамического процесса в узком и широком смысле. Примеры необратимых процессов.

Второе начало приводит к делению всех процессов в замкнутой системе на обратимые и необратимые. Процесс перехода системы из состояния 1 в состояние 2 называется обратимым, если возвращение этой системы в исходное состояние из 2 в 1 можно осуществить без изменений в окружающей среде. Процесс перехода системы из состояния 1 в 2 называется необратимым, если обратный переход системы из 2 в 1 нельзя осуществить без изменения в окружающей среде.

3. Циклические процессы. Обратимый цикл Карно. Теоремы Карно. Определение циклического процесса. Принцип работы тепловой машины. Термический КПД. Обратимый цикл Карно, вывод его КПД. Теоремы Карно.

Второе начало термодинамики было установлено в результате анализа работы тепловых машин Сади Карно. Цикл Карно состоит из двух адиабат и двух изотерм. В результате анализа установлено: к.п.д. цикла Карно не зависит от природы рабочего вещества, а зависит только от отношения температур нагревателя и холодильника; к.п.д. цикла Карно всегда меньше единицы; к.п.д. цикла Карно больше, чем к.п.д. любого другого равновесного цикла.

4. Энтропия. Количественная формулировка второго начала термодинамики. Приведенная теплота. Определение энтропии. Свойства энтропии. Основное уравнение термодинамики для равновесных процессов. Вычисление энтропии в равновесных процессах.

При адиабатных процессах работа системы, как при равновесном, так и неравновесном процессах равна убыли внутренней энергии. Однако даже при одном и то же уменьшении внутренней энергии при таких процессах работу при адиабатном равновесном процессе нельзя сравнивать с работой при адиабатном неравновесном процессе, так как конечные состояния будут разные.

При адиабатном неравновесном процессе $dS > 0$ т.е. при адиабатных неравновесных процессах энтропия системы возрастает. Это второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Оно указывает для неравно-

весных процессов направление естественных процессов. Основное уравнение и основное неравенство термодинамики имеет вид $TdS \geq dE + PdV$, где знак равенства относится к равновесным, а неравенства – к неравновесным элементарным процессам.

Первое неравенство приводит в случае равновесных систем к установлению существования термодинамической температуры и новой однозначной функции состояния – энтропии. Таким образом второе начало выражает закон существования энтропии у всякой равновесной системы и ее неубывание при любых процессах в изолированных и адиабатно изолированных системах.

5. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Закон возрастания энтропии. Неравенство Клаузиуса. Закон возрастания энтропии. Следствия из закона возрастания энтропии для неравновесных систем: изменение энтропии при диффузии газов, при теплопроводности, трении.

Энтропию можно вычислить, но нельзя непосредственно измерить. Физический смысл энтропии можно выяснить при анализе равновесных и неравновесных процессов. Смысл это состоит в том, что изменение энтропии является мерой необратимости процессов в замкнутой системе и характеризует направление естественных процессов в такой системе.

Теорема Гиббса: Энтропия смеси идеальных газов равна сумме энтропий этих газов, когда каждый из них в отдельности занимает при температуре смеси весь объем смеси. Вычисление на основе этой теории изменения энтропии при смешении двух различных идеальных газов показывает, что возрастание энтропии определяется только конфигурационной частью энтропии, т.е. не зависит от природы газов. Следовательно, может показаться, что увеличение энтропии произойдет и при смешении двух порций одного и того же газа. Это называется парадоксом Гиббса. Физическим основанием парадокса Гиббса является невозможность разделения первоначальные порции смеси тождественных газов перегородками непроницаемые для одной порции и проницаемые для другой порции. В результате этой особенности смеси тождественных газов по сравнению со смесью разных газов, сколь угодно мало отличающихся друг от друга, происходит скачок плотности смешиваемых газов, который и приводит к скачку изменения энтропии.

6. Пределы применимости второго начала термодинамики.

7. Третье начало термодинамики. Формулировка третьего начала термодинамики (теоремы Нернста). Некоторые следствия из третьего начала термодинамики.

Открытие третьего начала термодинамики связано с нахождением химического сродства. В результате широких экспериментальных исследований поведения веществ при низких температурах Нернстом был сформулирован принцип: энтропия любой равновесной термодинамической системы при $T = 0$ является величиной постоянной, не зависящей ни от каких переменных параметров.

Из принципа Нернста вытекает ряд важных следствий: любая теплоемкость системы при $T = 0$ обращается в нуль; коэффициент объемного расширения и термический коэффициент давления обращаются в нуль при $T = 0$.

Охлаждение системы осуществляется повторением следующих друг за другом процессов адиабатного расширения, при котором температура понижается и изотермического сжатия, при котором энтропия уменьшается. По принципу Нернста при изотермических процессах, когда T близка к 0K , энтропия перестает изменяться при сжатии. Поэтому состояние с $S = 0$ недостижимо, а следовательно, недостижимо и 0K . Согласно третьему началу, энтропию можно находить, имея лишь зависимость теплоемкости от температуры.

Лекция №5 «Методы термодинамики» (4 часа)

1. Метод круговых процессов. Метод круговых процессов (циклов). Применение метода циклов для решения некоторых задач термодинамики.

Метод циклов заключается в том, что для установления определенной закономерности того или иного явления рассматривается подходящим образом подобранный обратимый цикл и к этому циклу применяются уравнения первого и

второго начал термодинамики. Однако этот метод обладает недостатком, который заключается в том, что для установления той или иной закономерности всякий раз приходится подбирать подходящий цикл, который ничем не определяется. Чаще для исследования термодинамических систем применяется метод термодинамических потенциалов.

2. Термодинамические потенциалы. Метод термодинамических потенциалов. Термодинамические потенциалы (характеристические функции) и их полные дифференциалы: внутренняя энергия, свободная энергия Гельмгольца, энтальпия, энтропия, термодинамический потенциал Гиббса, их физический смысл. Связь между частными и смешанными производными. Соотношения Максвелла. Применение метода термодинамических потенциалов для определения соотношений между механическими и термическими характеристиками макроскопических систем.

Исходным в этом методе является основное уравнение термодинамики $TdS = dE + PdV$ (случай простой системы), которое позволяет в различных условиях ввести некоторые функции состояния, называемые термодинамическими потенциалами или характеристическими функциями. Изменение этих функций при изменении состояния системы является полным дифференциалом. Метод потенциалов состоит в использовании свойств полного дифференциала термодинамических функций.

3. Термодинамические потенциалы сложных систем с переменным числом частиц. Химический потенциал. Большой термодинамический потенциал. Основное уравнение термодинамики для сложных систем с переменным числом частиц.

Сложная система - система, подверженная действию нескольких внешних сил, и система с переменным числом частиц. Основное уравнение термодинамики для сложной системы имеет вид $TdS = dE + \sum A_i da_i$, где A_i обобщенная термодинамическая сила, a_i – обобщенная координата. Из этого уравнения можно получить все термодинамические потенциалы. Поскольку все термодинамические потенциалы являются аддитивными функциями то можно получить их значения от числа частиц в системе.

Лекция №6 «Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем» (4 часа)

1. Общие условия равновесия и устойчивости термодинамических систем. Принцип виртуальных перемещений. Общее условие равновесия различных систем (изолированная система, система в термостате при постоянном объеме, система в термостате при постоянном внешнем давлении и др.). Условия равновесия двухфазной однокомпонентной системы. Условия устойчивости равновесия однородной системы.

Состояние равновесия термодинамической системы определяется температурой и внешними параметрами, характеризующими отношение системы к внешним телам. Общим условием устойчивого равновесия изолированной системы является максимальность ее энтропии. В равновесном состоянии системы с постоянным объемом $V = \text{const}$, и постоянной температурой $T = \text{const}$ принимает минимальное значение свободная энергия F , а в системе с постоянным давлением $P = \text{const}$, и температурой $T = \text{const}$, минимальное значение принимает термодинамический потенциал Φ .

Условием термодинамического равновесия при постоянных температуре и давлении является минимальность термодинамического потенциала. Это значит, что если в равновесном состоянии энтропия и объем закрытой систе-

мы получают малые приращения, то приращение термодинамического потенциала должно быть не отрицательным при любых приращениях энтропии и объема. В качестве достаточного для малых отклонений от равновесия условием минимальности Φ остается положительность дифференциала второго порядка. Анализ этого условия для однородной системы приводит к неравенствам $(\partial T/\partial S)_V = T/C_V > 0$ и $(\partial P/\partial V)_T < 0$.

Первое неравенство дает $C_V > 0$. Второе неравенство выражает устойчивость системы при ее изотермическом сжатии. Уменьшение объема приводит к увеличению давления внутри системы и наоборот.

2. Принцип Ле-Шателье – Брауна. Формулировка принципа Ле-Шателье – Брауна. Примеры применения принципа Ле-Шателье – Брауна для анализа устойчивости равновесия различных термодинамических систем.

Общие условия устойчивости термодинамических систем приводят к тому, что внешнее воздействие, выводящее систему из состояния равновесия, вызывает в этой системе такие процессы, которые ослабляют это воздействие.

Принцип Ле Шателье – Брауна обусловлен устойчивостью состояния. Принцип Ле Шателье – Брауна применим не ко всем системам и не к всем возможным внешним воздействиям. Принцип неприменим к процессам, переводящим систему в более устойчивое состояние.

Лекция №7 «Фазовые переходы» (4 часа)

1. Классификация фазовых переходов по Эренфесту. Фазы и фазовые превращения. Классификация фазовых переходов по Эренфесту.

Фазой называется физически однородная часть системы, отличающейся своими физическими свойствами от других ее частей и отделенная от них четко выраженной границей. В системе, в которой фазы находятся в равновесии, незначительное изменение внешних условий приводит к тому, что некоторое количества вещества переходит из одной фазы в другую. Поэтому, изучая условия равновесия фаз, мы одновременно изучаем протекание фазовых переходов.

Равновесие двух фаз достигается при равенстве их химических потенциалов помимо равенства температур и давлений.

2. Фазовые переходы 1 рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Примеры фазовых переходов 1 рода. Удельная теплота перехода. Вывод дифференциального уравнения Клапейрона-Клаузиуса. Применение уравнения Клапейрона-Клаузиуса к описанию фазового перехода «жидкость-пар». Уравнение кривой испарения.

При фазовом превращении химический потенциал изменяется непрерывно без скачка. Однако в общем случае молярный объем и молярная энтропия при фазовом превращении меняются скачком. Такие фазовые переходы называются фазовыми переходами первого рода.

Дифференциальное уравнение перехода $dP/dT = \lambda / T (V_2 - V_1)$ называется уравнением Клайперона – Клаузиуса. Если кривая равновесия первой и второй фаз на плоскости (P,T) пересекается с кривой равновесия второй и третьей фаз, то в точке пересечения выполняется равенство химических потенциалов всех трех фаз. Такая точка называется тройной точкой. В тройной точке сходятся кривые, изображающие равновесие первой и второй, второй и третьей, первой и третьей фаз. К кривым равновесия двух фаз вещества прилегают области существования метастабильных состояний, которые приводят к явлениям перегрева и переохлаждения.

Компонентами называются химически различные части системы при условии, что количество каждого компонента не зависит от содержания других компонентов. Условием химического равновесия является отсутствия перехода частиц из одной фазы в другую. В случае многокомпонентной системы термодинамический потенциал зависит, кроме давления и температуры, от числа молей каждого компонента в каждой фазе. Условием химического равновесия является равенство химических потенциалов всех компонент в каждой фазе. Закономерность фазовых равновесий выражается правилом фаз Гиббса.

Условие химического равновесия имеет вид $\sum \mu_i \nu_i = 0$, где μ_i – химические потенциалы реагирующих веществ, ν_i – их стехиометрические коэффициенты. Если в системе протекает несколько химических реакций, то равновесие определяется рядом уравнений вида 1), для решения которых надо знать выражения химических потенциалов всех веществ, входящих в систему. Рассматривая условия химического равновесия в смеси идеальных газов можно получить выражение

$K(P,T) = P^{-\sum \nu_i} \exp [- \sum \nu_i \chi_i / RT]$, оно выражает закон действующих масс.

3. Фазовые переходы 2 рода. Уравнения Эренфеста. Определение фазового перехода 2 рода, примеры. Вывод уравнений Эренфеста. Физический смысл уравнений Эренфеста. Пример: термодинамика сверхпроводящего перехода.

Существуют фазовые переходы, при которых первые производные химического потенциала не имеют скачков, но вторые производные имеют в точке перехода конечные скачки. Такие фазовые переходы называются фазовыми переходами второго рода. Фазовые переходы второго рода чаще всего

связаны со скачкообразным изменением, каких – либо свойств симметрии тела. Для производной dP/dT вдоль кривой фазового равновесия можно получить два эквивалентных выражения, называемые уравнениями Эренфеста.

Лекция №8 «Термодинамика различных физических систем» (4 часа)

1. Охлаждение газа при необратимом и обратимом адиабатных расширениях. Эффект Джоуля-Томсона. Вывод дифференциального коэффициента Джоуля-Томсона. Температура инверсии, ее связь с постоянными Ван-дер-Ваальса и критической температурой. Охлаждение газа при обратимом адиабатном расширении.

Важной задачей является сжижение газов. Для понижения температуры газ заставляют совершать работу при адиабатном расширении, который может происходить как необратимо, так и обратимо. Изменение температуры при необратимом адиабатном расширении, происходит из – за отклонения реальных газов от идеальности и называется эффектом Джоуля – Томсона. Анализ этого процесса показывает, что, если силы взаимодействия между молекулами велики, то газ при таком процессе будет охлаждаться, в противном случае газ нагревается. При обратимом расширении, как показывает анализ, газ всегда охлаждается не зависимо от вида уравнения состояния.

2. Термодинамика диэлектриков и магнетиков. Основное уравнение термодинамики для диэлектриков и магнетиков. Магнитострикция, электрострикция. Пьезоэффект. Магнитное (магнитокалорический эффект) и ядерное охлаждения.

Поливариантные системы – системы, имеющие несколько механических, нетепловых степеней свободы. Для поливариантной системы определение свободной энергии остается прежним. Теплосодержание и термодинамический потенциал приобретают слагаемые, определяемые механическими степенями свободы. Пример - бивариантная система - стержень в магнитном поле. Явления адиабатной магнитострикции и адиабатного пьезомагнитного эффекта.

3. Термодинамика излучения. Понятие теплового излучения. Коэффициенты пропускания, поглощения и отражения. Абсолютно черное тело, зеркальное (белое) тело, абсолютно прозрачное тело. Закон Кирхгофа. Закон Стефана-Больцмана. Термическое и калорическое уравнение состояния и энтропия равновесного излучения. Термодинамические потенциалы и условие устойчивости равновесного излучения.

4. Термодинамика плазмы. Определение плазмы. Условие полной ионизации. Внутренняя энергия плазмы. Термическое уравнение состояния плазмы.

Лекция №9 «Термодинамика необратимых процессов» (4 часа)

1. Исходные положения и основные уравнения термодинамики необратимых процессов. Основные уравнения термодинамики линейных необратимых процессов (теплопроводность, диффузия, вязкость). Кинетические коэффициенты. В термодинамике равновесных процессов температура и химический потенциал постоянны вдоль всей системы: $\text{grad } T = 0$, $\text{grad } \mu = 0$. Если эти условия нарушаются, то в системе возникают необратимые процессы переноса массы, энергии, электрического заряда и т.п. Причины, вызывающие необратимые процессы, в термодинамике называют силами и обозначают X_i ($i = 1, 2, \dots$). Количественные характеристики соответствующих необратимых явлений, вызванных силами X_i , называют потоками I_i ($i = 1, 2, \dots$).

2. Уравнения баланса и законы сохранения.

Термодинамика неравновесных процессов основывается на понятии локального равновесия. Принимается, что состояние локально равновесных частей системы в каждый момент времени определяется основным уравнением термодинамики для равновесных процессов. Считается, что поток I_i , вызванный действием сил X_k , пропорционален этим силам. При соответствующем выборе потоков и сил матрица кинетических коэффициентов является симметричной $L_{ik} = L_{ki}$ ($i, k = 1, 2, \dots, n$) (соотношение взаимности Онзагера). Уравнения баланса.

3. Принцип Кюри. Диссипативные функции Онзагера. Принцип симметрии Кюри. Диссипативные функции Онзагера.

В зависимости о симметрии системы может оказаться, что компоненты потоков будут зависеть не от всех компонент термодинамических сил и, следовательно, не все причины вызывают «перекрестные» эффекты. Этот результат носит название принципа симметрии Кюри.

4. Вариационные принципы термодинамики необратимых процессов. Принцип наименьшего рассеяния энергии Онзагера. Принцип минимума производства энтропии Пригожина. Вариационный принцип Онзагера. Устойчивость стационарных состояний. Принцип Ле-Шателье в неравновесной термодинамике.

Стационарное состояние системы, в которой происходит необратимый процесс, характеризуется тем, что скорость возникновения энтропии имеет минимальное значение при данных внешних условиях, препятствующих достижению системой равновесного состояния (принцип Пригожина).

2.2. Темы и содержание практических занятий

№ темы	Тема занятия	Задания для выполнения в аудитории	Задания на дом	Число часов
1	Первое начало термодинамики	№№1,2,3,4,5	№№6,7,8	4
2	Термодинамическая теория теплоемкости	№№9,10,11,12	№№ 13,14,15	2
3	Второе начало термодинамики. Энтропия	№№16,17,18,19	№№ 21,22,23	2
Контрольная работа		Темы 1-3		2
4	Методы термодинамики	№№24,25,26,27	№№28,29,30	2
5	Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем	№№31,32,33,34	№№35,36,37	2
6	Фазовые переходы	№№38,39,40,41	№№42,43	2
7	Термодинамика различных физических систем	Семинарское занятие: обсуждение вопросов для самостоятельного изучения	Подготовка к семинарскому занятию по контрольным вопросам	2
Итого				18

Задания для выполнения на практических занятиях

1. Два моля кислорода очень медленно переводятся из состояния 1 в состояние 2. Какое количество теплоты необходимо подвести к газу, если в координатах PV процесс изображается прямой линией? В состоянии 1 газ характеризуется параметрами $P = 1 \text{ атм}$, $V = 24,6 \text{ л}$, $T = 300 \text{ К}$, $P = 3P$, $V = 2V$.
2. Вычислить работу испарения 1 моля воды при переходе ее в пар при 100°C и нормальном давлении. Определить количество теплоты, сообщаемое при этом воде.
3. Вычислить работу, совершаемую за цикл перемагничивания единицы объема сердечника длинного соленоида, если известно, что площадь петли гистерезиса на диаграмме с осями (H, J) равна S .

4. Показать, что элементарная работа поляризации единицы объема диэлектрика равна $\delta W = -(1/4\pi)E \cdot dD$, а работа поляризации в собственном смысле равна $\delta W_c = E \cdot dP$.
5. Термическое и калорическое уравнения состояния идеального электронного газа связаны соотношением $PV = 2/3 E$. Найти для этого газа уравнение адиабаты в переменных P, V . E – внутренняя энергия газа.
6. Идеальный газ расширяется по закону $p = aV$. Найти графически работу, произведенную газом при увеличении объема от V_1 до V_2 . Поглощается или выделяется тепло при таком процессе?
7. Воздух находится в термически изолированной комнате объемом 27 м³, в которой имеется небольшое отверстие. Через него воздух может просачиваться наружу, где давление равно 1 атм. Какое количество тепла необходимо подвести в комнату, чтобы температура медленно увеличивалась от 0 до 20°C? Теплоемкость воздуха можно считать постоянной $C_p = 103$ Дж/(кг · К), $\gamma = 1,41$
8. Найти работу, совершаемую над молем идеального газа и количество тепла, получаемое им при сжатии от объема V_1 до объема V_2 в политропическом процессе $pV^n = const$.
9. Молярная теплоемкость идеального газа при некотором процессе изменяется по закону $C = \alpha/T$, где α – постоянная величина. Найти уравнение, связывающее параметры P и V в этом процессе.
10. Вычислить разность $C_p - C_v$ для газа Ван-дерВаальса.
11. Уравнение состояния некоторой термодинамической системы имеет вид $P = AT^3$, причем коэффициент пропорциональности A зависит от объема, но не зависит от температуры. Найти $\partial C_v / \partial V$ в точке $P = 10^5$ Па, $T = 300$ К.
12. Процессы $PV^2 = const$, $P^2V = const$, $P/V = const$ являются политропными $PV^n = const$ с различными показателями политропы n . Вычислить соответствующие им теплоемкости.
13. На плоскости с координатными осями V и P через некоторую точку A проведены изотерма T и адиабата S идеального газа. Показать, что политропные процессы DAD' и EAE' происходят при отрицательной и положительной теплоемкости соответственно.
14. Моль неидеального газа находится в неограниченном сверху цилиндре, помещенном в однородное поле силы тяжести. Вычислить теплоемкость газа.

15. Определить теплоемкости идеального газа в следующих процессах: а) $PV^2 = const$, б) $P^2V = const$, в) $P/V = const$.
16. Работу двигателей внутреннего сгорания можно моделировать циклом, состоящим из адиабаты, изобары и изохоры. Определить теоретически КПД такого двигателя, если известно, что отношение максимального и минимального объемов газа (степень сжатия) - n .
17. Найти КПД двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Дизеля. На участке 1 -2 – адиабатное сжатие атмосферного воздуха, 2 -3 изобарное расширение (впрыскивание горючей смеси и ее сгорание), 3 -4 адиабатное расширение, 4 -1 –изохорное охлаждение. Параметрами цикла является степень сжатия $\epsilon = V_1 / V_2$ и степень предварительного расширения $\rho = V_1 / V_2$.
18. Вычислить энтропию газа Ван – дер – Вальса и найти уравнение его адиабаты.
19. Показать, что энтропия увеличивается, когда, например, горячая вода отдает теплоту такой же массе холодной воды, и температуры их выравниваются.
20. Идеальный газ с показателем адиабаты γ совершает цикл, состоящий из: изохоры, адиабаты и изотермы, причем изотермический процесс происходит при максимальной температуре цикла. Найти КПД каждого цикла, если температура в его пределах изменяется в n раз.
21. Железо массой 200 г при температуре 100 °С опущено в калориметр, в котором находится 300 г воды при температуре 12°С. Пренебрегая теплоемкостью калориметра, найти изменение энтропии системы при выравнивании температур. Удельная теплоемкость железа 500 Дж/кг·К.
22. Некоторое количество воды нагревают от 10 до 100 °С и дают ей полностью выкипеть. Какой должна быть масса воды, чтобы ее энтропия в данном процессе изменилась на 3,61 кДж/К (парообразованием при $t < 100^\circ\text{C}$ пренебречь).
23. Методом циклов установить зависимость давления насыщенного пара от температуры.
24. Найти термодинамические потенциалы F, Φ, H для моля одноатомного идеального газа.
25. Определить термодинамические потенциалы при независимых переменных (P, H) и (T, F) .
26. Показать, что для веществ, у которых объем линейно зависит от температуры T , теплоемкость C_p не зависит от давления.

27. Найти уравнение адиабаты и уравнение состояния идеального газа, зная его энтальпию: $H=C_p \cdot P^{(\gamma-1)/\gamma} \cdot \exp((s-s_0)/C_p)$.
28. Методом циклов найти зависимость ЭДС гальванического элемента от температуры.
29. Показать, что для веществ, у которых давление является линейной функцией температуры T , теплоемкость C_v не зависит от объема.
30. Энергия Гиббса некоторой системы равна: $\Phi=aT(1-\ln T)+RT\ln P-TS_0$, где a, R и S_0 - const. Найти термическое и калорическое уравнения состояния этой системы.
31. Найти условие равновесия в системе, состоящей из жидкости (1) и пара (2) при $T=const, V=const$.
32. Показать, что в системе с $S=const$ и $P=const$ равновесие наступает при минимуме энтальпии H , а в системе с $S=const$ и $V=const$ - при минимальной внутренней энергии.
33. Определить условия равновесия двух фаз разных веществ, т.е. двухфазной двухкомпонентной системы, когда каждый компонент входит в состав только одной фазы.
34. Определить условия равновесия системы во внешнем силовом поле.
35. Для области температур, в которых удельный объем жидкости можно пренебречь по сравнению с удельным объемом пара, найти зависимость давления насыщенного пара от температуры. Удельную теплоту парообразования считать не зависящей от T .
36. Идеальный газ находится в адиабатно изолированном цилиндре с поршнем под постоянным давлением. Непосредственно вычислив вариации энтропии δS и $\delta^2 S$, показать, что при равновесии энтропия является максимальной.
37. Показать, что если в некотором состоянии $(\partial T/\partial S)_p = 0$, то для устойчивости такого состояния должна одновременно обращаться в нуль также и вторая производная, а $(\partial^3 T/\partial^3 S) > 0$.
38. Найти давление насыщенного пара, учитывая зависимость удельную теплоту перехода λ от температуры.
39. Найти выражение для скачка коэффициента теплового расширения $\Delta\alpha = \alpha_n - \alpha_s$ и скачка $\Delta K = K_n - K_s$ модуля упругости при сверхпроводящем переходе.
40. Установить связь между удельными теплотами плавления λ_{23} (теплота перехода твердого тела 3 в жидкость 2), испарения жидкости λ_{12} и сублимации λ_{13} .

41. Под каким давлением вода будет кипеть при 95°C ? Удельная теплота испарения воды равна $2258,4$ Дж/г.
42. Найти температурную зависимость теплоты фазового перехода $d\lambda / dT$.
43. Определить коэффициент Джоуля-Томсона в критической точке.

2.3. Электронные обучающие средства

В лекционном курсе целесообразно применение интерактивной доски и сопутствующего оборудования в учебной аудитории. Теоретический характер дисциплины предполагает применение справочных материалов из области математики, а также использование графических средств для построения функциональных зависимостей, полученных в ходе теоретических расчетов и выводов. С этой целью используются ресурсы интернета, а также возможности стандартных компьютерных программ.

Используемое оборудование:

- Интерактивная доска, мультимедийное оборудование в аудитории.
- Видеопроектор Epson.
- Ноутбук Пентиум 100, 2003 г.

III. КОНТРОЛИРУЮЩИЙ РАЗДЕЛ

3.1. Вопросы для самоконтроля

Вопросы для самоконтроля и самоподготовки студентов к практическим занятиям содержатся в разделе 7 рабочей учебной программы дисциплины «Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов» (пункт 7.1.)

3.2. Задания для контрольной работы

Контрольная работа

Вариант 1

- Порция азота нагревается от 300 до 400 К таким образом, что объем газа поддерживается прямо пропорциональным его абсолютной температуре $V = \alpha \cdot T$, где $\alpha = 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{К}$. Начальное давление азота $p_0 = 100$ кПа. Найти работу газа в этом процессе.
- С одним молем идеального газа совершают замкнутый процесс, состоящий из двух изохор и двух изобар. Температуры в точках 1 и 3 соответственно T_1 и T_2 . Определить работу, совершенную газом за цикл, если известно, что точки 2 и 4 лежат на одной изотерме.
- 1 моль идеального одноатомного газа подвергся расширению в 2 раза в ходе политропного процесса $PV^2 = \text{Const}$. Найти изменение энтропии газа.

Вариант 2

- Вычислить разность $C_p - C_v$ для газа Ван-дерВаальса.
- Идеальный газ совершает цикл, состоящий из адиабаты, изобары и изохоры. Показатель адиабаты 1,5. При адиабатическом расширении температура уменьшается в 2 раза. Найти КПД цикла.
- Найти приращение энтропии 2 молей воды, взятой при $t_0 = 100$ °С, если вода сначала испаряется при данной температуре, затем полученный пар нагревается до температуры 200 °С. Теплоемкость пара выражается эмпирической формулой $c_p = 33,83 + 0,0084 \cdot T + 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Вариант 3

- Найти работу, совершаемую над молем идеального газа и количество тепла, получаемое им при сжатии от объема V_1 до объема V_2 в политропическом процессе $pV^n = \text{const}$.
- Вычислить изменение энтропии ΔS при смешивании двух равных масс одного и того же идеального газа, находящегося первоначально при одинаковой температуре T и разных давлениях p_1 и p_2 .

- Идеальный газ расширяется в ходе политропического процесса. При каких значениях показателя политропы n температура газа будет:
а) возрастать, б) уменьшаться, в) оставаться постоянной?

Вариант 4

- Идеальный газ расширяется по закону $p = \alpha V$. Найти графически работу, произведенную газом при увеличении объема от V_1 до V_2 . Поглощается или выделяется тепло при таком процессе?
- Одноатомный газ, в количестве 0,1 кмоль под давлением 100 кПа, занимал объем 5 м^3 . Газ сжимался изобарно до объема 1 м^3 , а затем сжимался адиабатно и расширялся при постоянной температуре до начальных объема и давления. Построить график процесса. Найти термический КПД цикла.
- Некоторое количество воды нагревают от 10 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и дают ей полностью выкипеть. Какой должна быть масса воды, чтобы ее энтропия в данном процессе изменилась на $3,61 \text{ кДж/К}$ (парообразованием при $t < 100^\circ\text{C}$ пренебречь).

Вариант 5

- Вывести выражение для работы, совершаемой электрическим полем при поляризации диэлектрика единичного объема.
- Вычислить изменение энтропии ΔS при смешивании двух равных масс одного и того же идеального газа, находящегося первоначально при одинаковой температуре T и разных давлениях p_1 и p_2 .
- Идеальный газ с показателем адиабаты γ совершает цикл, состоящий из: изохоры, адиабаты и изотермы, причем изотермический процесс происходит при максимальной температуре цикла. Найти КПД каждого цикла, если температура в его пределах изменяется в n раз.

Вариант 6

- Уравнение процесса идеального газа с показателем адиабаты γ задано графически в координатах p, V отрезком прямой, соединяющим точки (100 кПа, 5 л и 125 кПа, 6 л). Найти изменение внутренней энергии газа в этом процессе.
- Железо массой 200 г при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$ опущено в калориметр, в котором находится 300 г воды при температуре 12°C . Пренебрегая теплоемкостью калориметра, найти изменение энтропии системы при выравнивании температур. Удельная теплоемкость железа $500 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

3. Молярная теплоемкость идеального газа при некотором процессе изменяется по закону $C = \alpha/T$, где α - постоянная величина. Найти уравнение, связывающее параметры p и V в этом процессе.

3.3. Вопросы для подготовки к экзамену

1. Термодинамическая система, ее параметры и равновесие (основные понятия). Постулаты термодинамики. Температура.
2. Внутренняя энергия термодинамической системы. Работа и теплота.
3. Примеры расчета работы термодинамической системы в различных процессах (расширение газа, растяжение пленки, поляризация диэлектрика, намагничивание магнетика).
4. Термическое и калорическое уравнения состояния. Термическое уравнение состояния для идеального и реального газов. Вириальная форма уравнения состояния.
5. Первое начало термодинамики.
6. Определение теплоемкости. Теплоемкость простых и сложных систем. Уравнение Майера. Теплота изотермического изменения внешних параметров.
7. Основные термодинамические процессы и их уравнения.
8. Второе начало термодинамики, сущность и основные определения.
9. Обратимые и необратимые процессы. Примеры.
10. Циклы. Обратимый цикл Карно, расчет термического КПД цикла Карно. Теорема Карно.
11. Количественная формулировка второго начала термодинамики. Энтропия. Свойства энтропии.
12. Основное уравнение термодинамики для равновесных процессов. Вычисление энтропии в равновесных процессах.
13. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса. Следствия из закона возрастания энтропии для неравновесных систем: изменение энтропии при диффузии, теплопроводности.
14. Пределы применимости второго начала термодинамики.
15. Третье начало термодинамики. Недостижимость абсолютного нуля температур.
16. Методы термодинамики. Метод круговых процессов. Пример: применение метода круговых процессов для определения зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры.

17. Термодинамические потенциалы и их дифференциалы (внутренняя энергия, энергия Гельмгольца, энергия Гиббса, энтальпия), физический смысл.
18. Общие условия термодинамического равновесия и устойчивости для различных систем.
19. Условия равновесия двухфазной однокомпонентной системы.
20. Условия устойчивости равновесия однородной системы. Принцип Лешателлье – Брауна.
21. Классификация фазовых переходов по Эренфесту. Фазовые переходы I рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Пример: применение уравнения Клапейрона –Клаузиуса к описанию фазового перехода «жидкость - пар»; вывод уравнения кривой испарения $P=P(T)$.
22. Фазовые переходы II рода. Уравнения Эренфеста.
23. Охлаждение газа при необратимом адиабатическом расширении. Эффект Джоуля-Томсона. Дифференциальный коэффициент Джоуля-Томсона. Температура инверсии. Возможности охлаждения газа при обратимом адиабатическом расширении.
24. Термодинамика диэлектриков и магнетиков.
25. Термодинамика теплового излучения.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

Оценка	Полнота, системность, прочность знаний	Обобщенность знаний
«5»	Изложение полученных знаний в устной, письменной или графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются единичные несущественные ошибки, самостоятельно исправляемые студентами.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявление причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений; свободное оперирование известными фактами и сведениями с использованием сведений из других предметов.
«4»	Изложение полученных знаний в устной, письменной и графической форме, полное, в системе, в соответствии с требованиями учебной программы; допускаются отдельные несущественные ошибки, исправляемые студентами после указания преподавателя на них.	Выделение существенных признаков изученного с помощью операций анализа и синтеза; выявлений причинно-следственных связей; формулировка выводов и обобщений, в которых могут быть отдельные несущественные ошибки; подтверждение изученного известными фактами и сведениями.
«3»	Изложение полученных знаний неполное, однако это не препятствует усвоению последующего программного –материала; допускаются отдельные существенные ошибки, исправление с помощью преподавателя.	Затруднения при выполнении существенных признаков изученного, при выявлении причинно-следственных связей и формулировке выводов.

«2»	Изложение учебного материала неполное, бессистемное, что препятствует усвоению последующей учебной информации; существенные ошибки, неисправляемые даже с помощью преподавателя.	Бессистемное выделение случайных признаков изученного; неумение производить простейшие операции анализа и синтеза; делать обобщения, выводы.
-----	--	--

3.4. Экзаменационные билеты

"Утверждаю"
Заведующий кафедрой

Факультет: ИФФ
Кафедра ТиЭФ
Предмет: Термодинамика

Экзаменационный билет № 1

1. Термодинамическая система, ее параметры и равновесие (основные понятия). Постулаты термодинамики. Температура.
2. Условия равновесия двухфазной однокомпонентной системы.
3. Найти работу, совершаемую над молем идеального газа и количество тепла, получаемое им при сжатии от объема V_1 до объема V_2 в политропическом процессе $pV^n = const$.

Экзаменационный билет № 2

1. Внутренняя энергия термодинамической системы. Работа и теплота.
2. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса. Следствия из закона возрастания энтропии для неравновесных систем: изменение энтропии при диффузии, теплопроводности.
3. Идеальный газ совершает цикл, состоящий из адиабаты, изобары и изохоры. Показатель адиабаты 1,5. При адиабатическом расширении температура уменьшается в 2 раза. Найти КПД цикла.

Экзаменационный билет № 3

1. Примеры расчета работы термодинамической системы в различных процессах (расширение газа, растяжение пленки, поляризация диэлектрика, намагничивание магнетика).
2. Третье начало термодинамики. Недостижимость абсолютного нуля температур.
3. Вычислить разность $C_p - C_v$ для газа Ван-дерВаальса.

Экзаменационный билет № 4

1. Термическое и калорическое уравнения состояния. Термическое уравнение состояние для идеального и реального газов. Вириальная форма уравнения состояния.
2. Методы термодинамики. Метод круговых процессов. Пример: применение метода круговых процессов для определения зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры.
3. Порция азота нагревается от 300 до 400 К таким образом, что объем газа поддерживается прямо пропорциональным его абсолютной температуре $V=\alpha \cdot T$, где $\alpha = 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{К}$. Начальное давление азота $p_0=100$ кПа. Найти работу газа в этом процессе.

Экзаменационный билет № 5

1. Первое начало термодинамики.
2. Охлаждение газа при необратимом адиабатическом расширении. Эффект Джоуля-Томсона. Дифференциальный коэффициент Джоуля-Томсона. Температура инверсии. Возможности охлаждения газа при обратимом адиабатическом расширении.
3. Идеальный газ с показателем адиабаты γ совершает цикл, состоящий из: изохоры, адиабаты и изотермы, причем изотермический процесс происходит при максимальной температуре цикла. Найти КПД каждого цикла, если температура в его пределах изменяется в n раз.

Экзаменационный билет № 6

1. Определение теплоемкости. Теплоемкость простых и сложных систем. Уравнение Майера. Теплота изотермического изменения внешних параметров.
2. Основное уравнение термодинамики для равновесных процессов. Вычисление энтропии в равновесных процессах.
3. 1 моль идеального одноатомного газа подвергся расширению в 2 раза в ходе политропного процесса $PV^2 = Const$. Найти изменение энтропии газа.

Экзаменационный билет № 7

1. Основные термодинамические процессы и их уравнения.
2. Классификация фазовых переходов по Эренфесту. Фазовые переходы I рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Пример: применение уравнения Клапейрона –Клаузиуса к описанию фазового перехода «жидкость - пар»; вывод уравнения кривой испарения $P=P(T)$.

3. Молярная теплоемкость идеального газа при некотором процессе изменяется по закону $C = \alpha/T$, где α - постоянная величина. Найти уравнение, связывающее параметры p и V в этом процессе.

Экзаменационный билет № 8

1. Второе начало термодинамики, сущность и основные определения.
2. Условия устойчивости равновесия однородной системы. Принцип Ле-Шателье – Брауна.
3. Идеальный газ расширяется по закону $p = \alpha V$. Найти графически работу, произведенную газом при увеличении объема от V_1 до V_2 . Поглощается или выделяется тепло при таком процессе?

Экзаменационный билет № 9

1. Примеры расчета работы термодинамической системы в различных процессах (расширение газа, растяжение пленки, поляризация диэлектрика, намагничивание магнетика).
2. Обратимые и необратимые процессы. Примеры.
3. Некоторое количество воды нагревают от 10 до 100 °С и дают ей полностью выкипеть. Какой должна быть масса воды, чтобы ее энтропия в данном процессе изменилась на 3,61 кДж/К (парообразованием при $t < 100^\circ\text{C}$ пренебречь).

Экзаменационный билет № 10

1. Термическое и калорическое уравнения состояния. Термическое уравнение состояния для идеального и реального газов. Вириальная форма уравнения состояния.
2. Циклы. Обратимый цикл Карно, расчет термического КПД цикла Карно. Теорема Карно.
3. Вывести выражение для работы, совершаемой электрическим полем при поляризации диэлектрика единичного объема.

Экзаменационный билет № 11

1. Определение теплоемкости. Теплоемкость простых и сложных систем. Уравнение Майера. Теплота изотермического изменения внешних параметров.
2. Количественная формулировка второго начала термодинамики. Энтропия. Свойства энтропии.

3. Тело, сохраняющее постоянную температуру $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (неограниченный тепловой резервуар) приводится в контакт с запаянным сосудом, в котором содержится 1 л кислорода при нормальных условиях. Найти изменение энтропии системы газ-тело.

Экзаменационный билет № 12

1. Внутренняя энергия термодинамической системы. Работа и теплота.
2. Пределы применимости второго начала термодинамики.
3. Найти приращение энтропии 2 молей воды, взятой при $t_0 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, если вода сначала испаряется при данной температуре, затем полученный пар нагревается до температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплоемкость пара выражается эмпирической формулой $c_p = 33,83 + 0,0084 \cdot T + 3 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$ Дж/(моль·К).

Экзаменационный билет № 13

1. Термодинамические потенциалы и их дифференциалы (внутренняя энергия, энергия Гельмгольца, энергия Гиббса, энтальпия), физический смысл.
2. Фазовые переходы II рода. Уравнения Эренфеста.
3. Вычислить разность $C_p - C_v$ для газа Ван-дер-Ваальса.

Экзаменационный билет № 14

1. Основные термодинамические процессы и их уравнения.
2. Общие условия термодинамического равновесия и устойчивости для различных систем.
3. Одноатомный газ, в количестве 0,1 кмоль под давлением 100 кПа, занимал объем 5 м^3 . Газ сжимался изобарно до объема 1 м^3 , а затем сжимался адиабатно и расширялся при постоянной температуре до начальных объема и давления. Построить график процесса. Найти термический КПД цикла.

Экзаменационный билет № 15

1. Второе начало термодинамики, сущность и основные определения.
2. Термодинамика диэлектриков и магнетиков.
3. Молярная теплоемкость идеального газа при некотором процессе изменяется по закону $C = \alpha/T$, где α - постоянная величина. Найти уравнение, связывающее параметры p и V в этом процессе.