

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Термодинамика. Статистическая физика

по направлению подготовки
03.03.02 – физика

Направленность (профиль) подготовки / специализация:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

- ОПК-1 - способность применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности;
- ОПК-2 – способность проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;
- ПК-1 – способность проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

- ИОПК-1.1. Знает основные законы, модели и методы исследования физических процессов и явлений;
- ИОПК-2.1. Выбирает адекватные методы решения научно-исследовательских задач в выбранной области, планирует проведение научных исследований;
- ИПК-1.1. Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

В седьмом семестре элементы текущего контроля: тест, задача. Каждый тест содержит 10 вопросов с тремя вариантами ответов, один из которых является правильным.

Примеры тестовых вопросов (ИОПК-1.1, ИОПК-2.1):

1. Адиабатический процесс:
 - а) в системе должен протекать так быстро, чтобы отсутствовал теплообмен системы с термостатом, внешние условия фиксированы;
 - б) протекает в замкнутой системе квазистатически, при этом энтропия возрастает в соответствии со Вторым началом термодинамики;
 - в) происходит в теплоизолированной системе так, чтобы система в каждый момент времени находилась в состоянии равновесия, соответствующем медленно меняющимся внешним условиям.
2. Термодинамические потенциалы — это:
 - а) функции состояния системы, достигающие минимума при фиксированных энергии и энтропии;
 - б) аддитивные функции состояния системы, достигающие экстремума в равновесии при фиксированных внешних параметрах, различных для разных потенциалов;
 - в) функции $E(S,V)$, $E(P,V)$, $E(P,T)$.
3. Все термодинамические потенциалы:
 - а) не зависят от параметров термостата, в котором находится изучаемая система;
 - б) достигают минимума при фиксированных значениях давления, объема и температуры системы;
 - в) функции термодинамически несопряженных параметров состояния.
4. Какое из нижеследующих соотношений Максвелла следует из равенства вторых смешанных производных свободной энергии:
 - а) $(\partial S/\partial P)_V = -(\partial V/\partial T)_S$;
 - б) $(\partial S/\partial P)_V = -(\partial T/\partial V)_P$;
 - в) $(\partial P/\partial T)_V = (\partial S/\partial V)_T$.
5. Для любого газа имеет место соотношение:
 - а) $C_P \leq C_V$;
 - б) $C_P \geq C_V$;
 - в) $(\partial V/\partial P)_T \geq 0$.
6. Тепловые машины:

а) выполняют полезную работу только при наличии не менее трех тел с различными температурами;

б) позволяют получить максимальную работу в квазистатическом (обратимом) процессе;

в) совершают работу только при переходе из неравновесного в равновесное состояние, сопровождаемом ростом энтропии.

7. Химический потенциал системы

а) это свободная энергия системы, приходящаяся на одну частицу;

б) $\mu = (\partial H / \partial N)_{S,P}$;

в) зависит от температуры и объема системы.

8. Для электромагнитного излучения:

а) уравнение состояния имеет вид $P = U/3$;

б) уравнение состояния совпадает с уравнением состояния идеального газа;

в) давление вообще не зависит от плотности фотонов.

9. Свободная энергия газовой смеси

а) равна сумме свободных энергий компонент смешанных газов;

б) является экстенсивной (аддитивной) величиной;

в) является функцией внутренней энергии.

10. Плотность серебра в твердой фазе меньше, чем в жидкой фазе. При повышении давления температура плавления серебра

а) увеличивается, так как жесткость кристаллической решетки под давлением значительно возрастает;

б) уменьшается, так как кривая равновесия фаз описывается уравнением Клапейрона-Клаузиуса;

в) изменяется незначительно, направление изменения определить нельзя.

Критерии оценивания: тест считается пройденным, если обучающий ответил правильно как минимум на половину вопросов.

Примеры контрольных задач (ОПК-2, ПК-1, ИПК-1.1):

1. Уравнение состояния кислорода описывается формулой Ван-дер-Ваальса с параметрами $a=0,1382 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$, $b=31,9\cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$. Найдите работу, которую совершит 1 моль газа при изотермическом увеличении объема с $0,001 \text{ м}^3$ до $0,002 \text{ м}^3$. Температура газа 300° К .

2. В результате теплообмена системе из двух твердых тел температура первого тела уменьшилась на 10° С , а второго – увеличилась на 20° С . Теплоемкость тел при постоянном объеме тел равна 4200 Дж/К и 2100 Дж/К . При каком условии описанный теплообмен мог произойти самопроизвольно. Тепловое расширение тел не учитывать.

3. В ходе равновесного изобарного процесса 1 моль идеального одноатомного газа расширяется, увеличивая свой объем с $0,01$ до $0,02 \text{ м}^3$, а затем его объем возвращается к исходному значению в результате квазистатического адиабатического процесса. Найдите изменение энтропии газа в результате процесса.

4. Потенциал Гиббса двухкомпонентной смеси, содержащей 1 моль первого вещества равен и 2 моля второго вещества равен 20 Дж , а в смеси содержащей 2 моля первого вещества равен и 1 моль второго вещества равен 25 Дж . Найдите химические потенциалы компонентов, считая их не зависящими от состава смеси.

5. В сосуде, содержащем 3 моля компонента А и 1 моль компонента В в газовой фазе, идет химическая реакция диссоциации $A=B+C$. Найдите равновесное значение концентрации компонента А газовой смеси, если константа равновесия при условиях протекания реакции равна 1.

6. В самой низкой точке на поверхности Марса (равнина Эллада) атмосферное давление составляет 1240 Па . Используя уравнение Клапейрона-Клаузиуса, найдите

температуру кипения воды на поверхности планеты. Известно, что для тройной точки воды $T=0,01^{\circ}\text{C}$, $P=611\text{ Па}$.

jykk

4/

Ответы. Задача 1. 4997 Дж. Задача 2. В начальный момент времени первое тело должно быть как минимум на 30°C горячее второго, иначе нарушено второе начало термодинамики. Задача 3. 14,4 Дж/К. Задача 4. 10 и 5 Дж/моль. Задача 5. 2 моля. Задача 6. $10,6^{\circ}\text{C}$.

Контрольная задача считается решенной, если корректно использованы физические законы и получен верный ответ.

В восьмом семестре элементы текущего контроля: тест, задача. Каждый тест содержит 10 вопросов с тремя вариантами ответов, один из которых является правильным.

Примеры тестовых вопросов (ИОПК-1.1, ИОПК-2.1):

1. Статистическим весом макроскопического состояния называется:
 - а) число частиц, находящихся в данном макросостоянии;
 - б) число микроскопических состояний, которым соответствует одно наблюдаемое макросостояние;
 - в) число частиц в макросистеме при фиксированной ее температуре.
2. При переходе системы в равновесное состояние:
 - а) ее конечное состояние существенно зависит от начального состояния;
 - б) число параметров, описывающих макроскопическую систему, уменьшается;
 - в) ее состояние однозначно определяется давлением и объемом.
3. Статистические свойства изолированной системы в состоянии равновесия полностью определяются:
 - а) давлением и температурой системы;
 - б) статистическим весом системы в состоянии равновесия;
 - в) значениями семи аддитивных интегралов движения.
4. Каноническое распределение:
 - а) устанавливает вероятность обнаружения замкнутой микроскопической системы в состоянии с энергией $E = E_n$;
 - б) указывает вероятность обнаружения в состоянии с энергией E_n сравнительно малой и квазизамкнутой подсистемы в термостате;
 - в) задает распределение вероятностей по энергии для любой макроскопической подсистемы большого термостата.
5. Для макроскопической системы квантовых осцилляторов:
 - а) распределение по координатам не сводится к классическому распределению при любой температуре;

- б) распределение по импульсам отличается от распределения Максвелла по импульсам классических частиц;
- в) распределения по координатам и импульсам сводятся к классическим распределениям при $T \gg \hbar\omega/2$.

6. Для открытой подсистемы:

- а) можно вычислить лишь среднее число частиц в ней, зная свободную энергию подсистемы;
- б) можно вычислить среднее число частиц и среднеквадратичное отклонение от него, зная Ω - потенциал подсистемы;
- в) число частиц в подсистеме, находящейся в состоянии термодинамического равновесия со средой, является постоянной величиной.

7. Вычисление свободной энергии для одноатомного идеального газа:

- а) имеет смысл проводить при температурах $T \ll E_{\text{ионизации}}$, чтобы считать атомы находящимися на низшем энергетическом уровне;
- б) можно проводить при любой температуре газа;
- в) не требует нахождения статистической суммы по вращательным и электронным квантовым состояниям.

8. Для двухатомных газов с гетерогенными молекулами:

- а) энергия молекулы не зависит от энергии кулоновского взаимодействия электронов с ядрами и между собой;
- б) полная статистическая сумма имеет вид $Z = Z_{\text{вращ.}} Z_{\text{колебат.}}$;
- в) колебательная часть свободной энергии при высоких температурах (причем $T \ll E_{\text{диссоциации}}$) пренебрежимо мала по сравнению с $E_{\text{вращ.}}$.

9. Появление конденсата в системах частиц с целым спином:

- а) означает возникновение в них при понижении температуры подсистем частиц с нулевым импульсом;
- б) происходит только при температуре $T = 0$;
- в) происходит точно так же, как в системах фермионов при температуре, меньшей энергии Ферми.

10. Теплоемкость твердого тела:

- а) при низких температурах не зависит от температуры;
- б) при низкой температуре пропорциональна T^3 ;
- в) пропорциональна T^3 при высоких температурах, когда применима классическая статистика.

Критерии оценивания: тест считается пройденным, если обучающий ответил правильно как минимум на половину вопросов.

Примеры контрольных заданий (ОПК-2, ПК-1, ИПК-1.1).

1. Уравнения Гамильтона для одномерного гармонического осциллятора с единичной частотой имеют вид $dx/dt=p$, $dp/dt=-x$. Докажите, что для данной системы является справедливой эргодическая гипотеза, то есть среднее по времени равно среднему по микроканоническому ансамблю.

2. Система состоит из 30 тождественных бозонов, каждая из которых может находиться в одном из двух возможных квантовых состояний. Определите термодинамический вес макроскопического состояния, в котором в каждом микросостоянии находится по 10 частиц.

3. Свободная энергия 1 моля одноатомного идеального газа дается формулой $F = -T(3/2 \ln T + \ln V + S_0 - 3/2)$, где S_0 – энтропийная константа, зависящая от массы частиц газа. Найдите большой термодинамический потенциал 3 молей газа при температуре $T = 0,02$ эВ.

4. Молярная масса молекулы кислорода, состоящей из двух атомов изотопа кислород-16, равна 0,032 кг. Считая кислород идеальным газом, вычислите кинетическую энергию поступательного движения молекулы кислорода, движущейся с наиболее вероятной скоростью при температуре $T = 400^\circ\text{K}$.

5. Макроскопическая система состоит 1 моля атомов, каждый из которых может находиться в одном двух энергетических уровней. Энергия возбуждения атома 0,06 эВ, основное состояние $g \gg 1$ раз вырождено. Определите температуру, при которой достигается максимальное значение теплоемкости.

6. Макроскопическая система состоит 1 моля атомов, каждый из которых может находиться в одном двух энергетических уровней. Энергия возбуждения атома 0,06 эВ, возбужденное состояние $g = 1000 \gg 1$ раз вырождено. Определите температуру, при которой достигается максимальное значение теплоемкости.

7. Невырожденный парамагнитный газ состоит из $6 \cdot 10^{23}$ частиц со спином 1/2 и магнитным моментом, равным магнетону Бора $\mu = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл, помещен в однородное магнитное поле с индукцией 10 Тл. Найдите магнитный средний магнитный момент одной частицы газа при температуре 300°K .

8. Неидеальный газ состоит из идеально твердых шаров с радиусом 0,053 нм. Найдите второй вириальный коэффициент для данного газа при температуре $T = 350^\circ\text{K}$, зная, что потенциальная энергия взаимодействия между неслепящимися шарами тождественно равна нулю.

9. Помещение с объемом $V = 100 \text{ м}^3$ и температурой стен $T = 300^\circ\text{K}$ заполнено лучистой энергией, находящейся в тепловом равновесии со стенами. Найдите (в Дж) внутреннюю энергию равновесного теплового излучения, заполняющего указанное помещение.

10. Кристаллическое вещество помещено в криогенную установку при температуре много меньше температуры Дебая. Найдите энтропию кристалла (Дж/К), если измеренное значение теплоемкости равно 57 Дж/К. Энтропия кристалла при нулевой температуре равна нулю. Тепловое расширение отсутствует.

jykk

4/

Ответы. Задача 1. 4997 Дж. Задача 2. $2,01 \cdot 10^{19}$. Задача 3. 3854 Дж. Задача 4. 0,069 эВ. Задача 5. 174°K . Задача 6. 50°K . Задача 7. 0,022μ. Задача 8. $2,49 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$. Задача 9. $6,1 \cdot 10^{-4}$ Дж. Задача 10. 19 Дж/К.

Контрольная задача считается решенной, если корректно использованы физические законы и получен верный ответ.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Зачет в седьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Билет содержит тест, два теоретических вопроса и одну задачу. Продолжительность зачета 1,5 часа.

Первая часть содержит 5 вопросов в тестовой форме, проверяющих ИОПК-1.1 и ИОПК-2.1. Ответ на вопрос выбирается из 4 возможных вариантов, только один из которых является правильным. Вторая часть содержит два вопроса, проверяющих ОПК-1 и ОПК-2. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме. Третья часть содержит 1 вопрос,

проверяющий ИПК 1.1, и оформленный в виде практической задачи. Ответ на вопрос третьей части предполагает решение задачи и краткую интерпретацию полученных результатов.

Примеры тестовых вопросов:

1. Термодинамика:
 - а) позволяет вычислять термодинамические параметры макроскопических систем, опираясь на известные законы движения микроскопических частиц;
 - б) позволяет проанализировать только получаемые из опыта соотношения между различными тепловыми параметрами системы;
 - в) устанавливает феноменологические соотношения между различными термодинамическими параметрами макроскопических систем;
 - г) изучает микроскопические механизмы преобразования механической работы в тепловую энергию.
2. Функциями состояния являются:
 - а) температура, давление, объем, энтропия, внутренняя энергия, количество вещества, химический потенциал;
 - б) температура, давление, объем, энтропия, внутренняя энергия, количество теплоты, механическая работа;
 - в) температура, энтропия, внутренняя энергия, потенциал Гиббса, химический потенциал, энергия переноса массы;
 - г) нельзя сказать, так как результат зависит от термодинамического процесса, по которому изменяется состояние системы.
3. Следствие второго начала термодинамики:
 - а) невозможно создать тепловую машину, которая превращает все полученное от теплового резервуара тепло в механическую работу;
 - б) энтропия любого тела при абсолютном нуле температур является строго положительной величиной;
 - в) теплоемкость всех тел стремится к нулю при стремлении температуры к абсолютному нулю.
 - г) агрегатное состояние всех без исключения тел при криогенных температурах становится твердым.
4. По данным эксперимента можно установить (с точностью до констант) значения всех термодинамических потенциалов измеряя уравнение состояния и:
 - а) ход температурной зависимости $C_V = C_V(T)$ в интервале температур $[T_0, T]$ и значение энтропии при абсолютном нуле;
 - б) ход температурной зависимости $C_V = C_V(V)$ в интервале давлений $[V_0, V]$ и значение энтропии при абсолютном нуле;
 - в) измеряя в некотором интервале $[T_0, T]$ зависимость коэффициента теплового расширения от температуры;
 - г) ничего, уравнение состояния содержит всю необходимую информацию.
5. Цикл С. Карно:
 - а) представляет последовательность изотермического, адиабатического, изобарного и изохорного процессов при участии рабочего тела;
 - б) не может быть практически реализован, поскольку представляет собой идеальный цикл с К.П.Д., равным 1;
 - в) не может быть реализован на практике, поскольку тепловая машина, действующая по такому циклу имеет слишком большую мощность;
 - г) может быть изображен в виде прямоугольника в осях «Температура – Энтропия».
6. Правило фаз Гиббса:
 - а) определяет степень изменчивости многокомпонентной системы с заданным числом фаз при отсутствии химических реакций;

- б) определяет уравнение кривой равновесия двух фаз в зависимости от рода фазового перехода;
 - в) определяет изменение температуры фазового перехода при изменении концентрации раствора;
 - г) определяет зависимость потенциала Гиббса от количества вещества и его агрегатного состояния.
7. Закон действующих масс:
- а) определяет скорость установления химического равновесия в зависимости от молярных масс реагентов и продуктов;
 - б) определяет равновесные концентрации компонентов в зависимости от условий протекания химической реакции;
 - в) устанавливает соотношение между массами реагирующих веществ в химических реакциях при химическом равновесии;
 - г) устанавливает особенности протекания химических реакций в гравитационном поле Земли.
8. Третье начало термодинамики:
- а) указывает на стремление к нулю энтальпии системы при уменьшении температуры до 0^0C ;
 - б) содержит и утверждение о стремлении к нулю теплоемкостей при уменьшении температуры до 0 K ;
 - в) говорит о равенстве нулю энтропии абсолютно любого тела при температуре, равной 0 K ;
 - г) определяет принцип действия холодильной машины, работающей при криогенной температуре.
9. Закон парциальных давлений Дальтона:
- а) позволяет вычислять парциальное давление газовой смеси в зависимости от ее химического состава и температуры;
 - б) позволяет вычислить парциальное давление насыщенного пара растворителя над раствором с нелетучим растворенным веществом;
 - в) утверждает, что столкновение молекул разных компонент со стенкой сосуда происходит совершенно независимо друг от друга;
 - г) применяется только в двухкомпонентных смесях, так как при появлении третьего компонента он становится очень сложным.
10. Термоэлектрический эффект Зеебека:
- а) поглощение или выделение теплоты в месте контакта разнородных проводников при пропускании тока;
 - б) особый вид электрохимической коррозии металлов, сопровождающийся выделением тепла и появлением ЭДС;
 - в) явление изменения электрохимического потенциала электронного газа в проводнике при изменении температуры;
 - г) явление возникновения ЭДС на концах последовательно соединённых разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах.

Ключи: 1 в), 2 а), 3 а), 4 а), 5 г), 6 а), 7 б), 8 б), 9 а), 10 г). Тест считается пройденным, если правильные ответы даны не менее, чем на половину вопросов.

Перечень теоретических вопросов (ОПК-1, ОПК-2):

1. Макроскопические системы. Макроскопические параметры. Интенсивные и экстенсивные величины.

2. Состояние термодинамического равновесия и его свойства. Закон транзитивности термодинамического равновесия.

3. Равновесные и неравновесные термодинамические процессы. Изотермический, изохорный, изобарный, изотермический процесс в идеальном газе.
4. Механическая работа и количество теплоты. Закон эквивалентности теплоты и механической работы. Первое начало термодинамики.
5. Второе начало термодинамики в различных формулировках. Доказательство эквивалентности формулировок Томсона, Клаузиуса, Планка.
6. Макроскопические системы при низких температурах. Теорема Нернста. Теплоемкость при низкой температуре.
7. Преобразование Лежандра. Термодинамические потенциалы. Экстенсивные свойства термодинамических потенциалов.
8. Термодинамические коэффициенты. Выражение одних термодинамических коэффициентов через другие с помощью метода якобианов.
9. Принципиальная схема действия тепловой машины. Коэффициент полезного действия. Теорема Карно.
10. Эндообратимая тепловая машина, работающая с максимальной мощностью. Рабочий цикл и коэффициент полезного действия.
11. Равновесное состояние открытой системы. Равновесие в контакте с тепловым резервуаром и/или резервуаром работы. Общий принцип минимума.
12. Устойчивость термодинамических систем. Необходимые и достаточные условия устойчивости. Физические последствия условий устойчивости.
13. Равновесное состояние составной макроскопической системы. Сильные и слабые термодинамические связи. Принцип максимума энтропии.
14. Многофазные и многокомпонентные системы.. Энергия переноса массы. Химический потенциал. Уравнение Гиббса-Дюгема.
15. Равновесие фаз в многофазной и многокомпонентной системе. Правило фаз Гиббса и его следствия. Фазовая диаграмма.
16. Равновесие двух фаз в однокомпонентной системе. Фазовые переходы первого рода. Уравнение кривой равновесия фаз. Давление насыщенного пара.
17. Фазовые переходы второго рода. Уравнение кривой равновесия фаз при фазовом переходе 2 рода. Соотношения Эренфеста.
18. Вещества в магнитном поле. Работа магнитного поля. Уравнение состояния. Обобщенная функция Ланжевена. Энтропия магнетика.
19. Теория ферромагнетизма Вейсса. Ферромагнитное и парамагнитное состояние в отсутствие внешнего поля. Точка Кюри.
20. Химическое равновесие в газовой смеси. Условие химического равновесия. Закон действующих масс.
21. Тепловой эффект химической реакции. Эндотермические и экзотермические реакции. Правило вант-Гоффа. Правило Ле Шателье.
22. Внутренняя энергия, объем и энтропия слабого раствора. Зависимость энтропии от количества вещества. Энтропия смешивания. Давление пара над раствором.
23. Термоэлектрические явления. Законы Ома, Фурье. Эффекты Зеебека и Пельтье. Принципиальная схема термопары.
24. Термодинамика газа Ван-дер-Ваальса. Уравнение состояния, теплоемкость, внутренняя энергия, энтропия. Критическая точка. Правило Максвелла.
25. Процессы Гей-Люссака и Джоуля-Томсона. Охлаждение газов с использованием процесса Джоуля-Томсона.
26. Равновесное тепловое излучение. Объемная и спектральная плотность энергии. Энтропия и внутренняя энергия излучения. Законы Релея-Джинса, Вина, Планка.

Примеры контрольных заданий (ОПК-2, ПК-1, ПК-1):

1. Макроскопическая система описывается пятью параметрами: внутренней энергией U , температурой T , энтропией S , давлением P , объемом V . Укажите интенсивные

и экстенсивные термодинамические величины в следующем списке: $U, S, T, S/V, P, T, P/T, P, S, PV, V^2$.

2. В начальном состоянии термодинамическая система имеет внутреннюю энергию 360 Дж. В результате термодинамического процесса система получила количество теплоты $Q=10$ Дж, и совершила работу $A=15$ Дж. Найти внутреннюю энергию системы в конечном состоянии.

3. Состояние одного моля газа описывается уравнением $P=RTa/(V-b)^2$, где a, b – некоторые неотрицательные параметры, характеризующие газ. Найти разность молярных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме в пределе больших температур.

4. Внутренняя энергия одного моля некоторого газа не зависит от занимаемого им объема. Найдите наиболее общий вид уравнения, которое удовлетворяет этому условию. Приведите примеры газов, для которых условие независимости внутренней энергии от объема выполняется.

5. Согласно экспериментальным данным давление насыщенного водяного пара при $T=20^\circ\text{C}$ равно 2,33 кПа, а при $T=30^\circ\text{C}$ – 4,24 кПа. Найдите удельную (молярную) теплоту перехода жидкость – пар для воды. Считайте, что теплота фазового перехода не зависит от температуры, при которой происходит фазовый переход.

6. В трёхфазной макроскопической системе имеется 4 компонента, которые могут одновременно находиться во всех фазах. Зная, что химические превращения компонентов исключены, найдите степень изменчивости такой системы с использованием правила фаз Гиббса.

7. В молекулярном водороде при высоких температурах протекает обратимая реакция диссоциации молекул. Уравнение реакции $\text{H}_2=2\text{H}-435$ кДж. Определить (качественно) как изменится количество диссоциировавших молекул при повышении температуры или давления.

8. Газовая смесь, содержащая 25% водорода, 25% азота и 50% аммиака находится в состоянии химического равновесия при $P=300$ атм. Качественно описать, как изменится равновесный состав смеси, если давление увеличится до 1000 атм, а температура останется не изменится.

9. Водный раствор соли содержит 0,99 молей воды и 0,01 моля нелетучего растворенного вещества (поваренной соли). Удельная теплота парообразования воды равна $q=41,4 \cdot 10$ кДж/моль. Определить температуру кипения раствора при атмосферном давлении.

10. Емкость с водой поделена не проницаемой для ионов натрия и хлора перегородкой на две части. В одной части содержится чистая вода, а во второй части раствор соли с мольной долей 0,01. Найдите разность уровней жидкости в половинах резервуара, обусловленную осмотическим давлением. Температура раствора $T=20^\circ\text{C}$.

Ответы. Задача 1. Интенсивные $P, T, S/V, P/T$, экстенсивные U, PV, PS . Задача 2. 350 Дж. Задача 3. $C_p - C_v = 8,31$ Дж/К. Задача 4. $V=f(P/T)$, идеальный газ. Задача 5. 43 кДж/моль. Задача 6. 3. Задача 7. При повышении температуры увеличится, при повышении давления уменьшится. Задача 8. Количество аммиака увеличится. Задача 9. $0,28^\circ\text{C}$. Задача 10. 1,3 МПа. Задача считается решенной, если корректно использованы физические законы и получен верный ответ.

Результаты зачета определяются оценками «зачтено»/«незачтено».

Промежуточная аттестация выставляется по итогам контроля посещаемости лекций и выполнения контрольных работ. Требуется посещение не менее чем 50% занятий и выполнение 50% контрольных и домашних работ.

Оценивание ответа студента на экзамене проводится в соответствии со следующей таблицей.

Оценка	Критерий оценивания			
	Т	Б	Д	З
Зачтено				

	Полный развернутый ответ или задача решена или тест пройден
	Неполный ответ
	Фрагментарный ответ
	Отсутствие ответа или задача не решена или тест не пройден

Здесь Т – тест, Б – вопросы по билету; Д – дополнительные вопросы; З – задача. Неудовлетворительная оценка соответствует всем иным случаям, не указанным в таблице.

Экзамен во восьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из трех частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа. Первая часть содержит 5 вопросов в тестовой форме, проверяющих ИОПК-1.1 и ИОПК-2.1. Ответ на вопрос выбирается из 4 возможных вариантов, только один из которых является правильным. Вторая часть содержит два вопроса, проверяющих ОПК-1 и ОПК-2. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме. Третья часть содержит 1 вопрос, проверяющий ПК-1 и ИПК 1.1, и оформленный в виде практической задачи. Ответ на вопрос третьей части предполагает решение задачи и краткую интерпретацию полученных результатов.

Примеры тестовых вопросов (ИОПК-1.1 и ИОПК-2.1):

1. Начальные условия:
 - а) полностью задают статистические характеристики системы при заданных значениях температуры и объема;
 - б) необходимо задавать при вычислении средних значений динамических функций системы;
 - в) несущественны при статистическом описании макроскопических систем, находящихся в состоянии равновесия;
 - г) необходимо учитывать статистическим образом, с учетом возможных флуктуаций макроскопических параметров окружения.
2. Э르고дическая гипотеза:

- а) предполагает, что фазовая траектория проходит через каждую точку ее фазового пространства бесконечное множество раз;
 - б) всегда выполняется для любой известной макроскопической системы, независимо от ее структуры и состава;
 - в) нарушается, если некоторые степени свободы подсистемы недоступны в определенных условиях или по причинам динамического характера;
 - г) утверждает, что временное среднее не зависит от выбора начального момента времени на фазовой траектории.
3. Классическая теорема Лиувилля:
- а) справедлива только для замкнутых систем с относительно небольшим числом частиц;
 - б) приводит к выводу, что статистическая функция распределения зависит исключительно от интегралов движения;
 - в) позволяет использовать уравнения гидростатики для описания статистической функции распределения в равновесном состоянии;
 - г) функция распределения подсистемы постоянна вдоль ее фазовой траектории в течение произвольного промежутка времени.
4. Микроканоническое распределение для системы в состоянии равновесия:
- а) имеет вид $\rho(p,q)=\text{const} \cdot \delta(H(p,q)-E_0) \delta(P(p,q)-P_0) \delta(M(p,q)-M_0)$, здесь P , M – давление и масса системы;;
 - б) имеет вид $\rho(p,q)=\text{const} \cdot \delta(H(p,q)-E_0) \delta(P(p,q)-P_0) \delta(M(p,q)-M_0)$, в котором учитывается основной постулат статистической физики;
 - в) имеет вид $\rho(p,q)=\text{const} \cdot \exp(-H(p,q)/T)$, где учитывается температура системы и потенциальная энергия взаимодействия с окружением;
 - г) имеет вид $\rho(p, q) = \text{const} \cdot \exp([\mu N - H(p,q)]/T)$, где учитывается температура системы и число частиц.
5. На надгробии Л. Больцмана написано $S = k \log W$. В этой формуле W :
- а) общее число микросостояний, реализующих данное макросостояние термодинамической системы;
 - б) общее число макросостояний, реализующих данное микросостояние термодинамической системы;
 - в) суммарная кинетическая и потенциальная энергия всех частиц термодинамической системы;
 - г) энтальпия макроскопической системы, посчитанная в состоянии термодинамического равновесия.
6. Классическое распределение Максвелла:
- а) не зависит от координат частиц в любой системе;
 - б) позволяет находить распределения по импульсам и координатам независимо друг от друга;
 - в) выводится без использования распределения Гиббса и только при отсутствии какого-либо внешнего силового поля;
 - г) может использоваться для оценки скоростей электронов в вырожденном электронном газе в металле.
7. Сравнение различных статистических распределений показывает, что:
- а) проще всего использовать микроканоническое распределение, поскольку оно позволяет найти точное значение энтропии;
 - б) большое каноническое распределение Гиббса учитывает флуктуации энергии и флуктуации числа частиц в открытой подсистеме;
 - в) каноническое распределение так же, как и микроканоническое, опирается на гипотезу о равномерном распределении;
 - г) каждая система может быть описана в точности одним распределением, независимо от ее характера взаимодействия с окружением.

8. Закон равнораспределения для классического идеального газа:
- а) означает, что все степени свободы частиц, из которых состоит газ, вносят в энергию вклад, равный $T/2$;
 - б) утверждает, что вращательные и поступательные степени свободы частиц вносят в теплоемкость газа равные вклады, по $1/2$;
 - в) утверждает, что вращательные степени свободы возбуждаются только при очень высоких температурах и не вносят вклад во внутреннюю энергию.;
 - г) позволяет выполнить третье начало термодинамики, так как теплоемкость газа становится зависящей от температуры.
9. Квантовая теория теплоемкости двухатомного газа:
- а) утверждает, что колебательная теплоемкость дает наибольший вклад при низких температурах, так как жесткость холодных молекул возрастает;
 - б) утверждает, что вращательная теплоемкость является монотонно возрастающей функцией температуры.
 - в) применима преимущественно к молекулам из легких атомов, тогда как в тяжелых молекулах наиболее точные результаты дает классическая теория;
 - г) объясняет теплоемкость газообразного молекулярного водорода при высоких и низких температурах, а также ее изменение при нагревании.
10. Н-теорема Больцмана:
- а) доказывает второе начало термодинамики для макроскопических систем, содержащих газы и жидкости;
 - б) утверждает, что энтропия классического газа, чья эволюция описывается кинетическим уравнением Больцмана, не может убывать;
 - в) утверждает, что в разреженных газах обязательно должен быть выполнен принцип детального равновесия;
 - г) определяет функцию Гамильтона неравновесной макроскопической системы, находящейся во внешнем поле.

Ключи: 1 в), 2 в), 3 г), 4 б), 5 а), 6 а), 7 б), 8 б), 9 г), 10 б). Тест считается пройденным, если правильные ответы даны не менее, чем на половину вопросов.

Перечень теоретических вопросов.

1. Микроскопическое и макроскопическое состояние. Микроскопическое описание в классической и квантовой статистике. Фазовое пространство. Фазовая траектория.
2. Статистический ансамбль. Статистическая функция распределения. Статистический оператор. Постулат о наблюдаемых значениях величин.
3. Теорема Лиувилля и уравнение Лиувилля. Функция распределения замкнутой системы как интеграл движения.
4. Эргодическая гипотеза. Постулат о равной вероятности реализации микроскопических состояний. Микроканоническое распределения.
5. Функция распределения системы, находящейся в тепловом контакте с окружением. Вывод функции распределения на основе статистической независимости.
6. Вывод канонического распределения из микроканонического (классический случай).
7. Функция распределения системы, находящейся в тепловом контакте с окружением.
8. Распределение частиц классического идеального газа по координатам и импульсам. Распределения Максвелла и Больцмана.
9. Статистические суммы и термодинамические функции. Статистическое обоснование основного термодинамического тождества. Термодинамический предел.
10. Свободная энергия и большой термодинамический потенциал идеального классического газа. Вывод уравнения Менделеева-Клапейрона. Химическая постоянная.

11. Энтропийная константа классического газа. Давление насыщенного пара в зависимости от температуры.
12. Ионизация газов. Задача о термодинамическом равновесии в ионизированном газе. Формула Саха.
13. Многоатомный классический газ. Вращения и колебания молекул. Закон равного распределения. Теплоемкость газа.
14. Многокомпонентный классический идеальный газ. Уравнение состояния, теплоемкость и энтропия смеси газов. Парадокс Гиббса.
15. Взаимодействие молекул в газе. Потенциал парного взаимодействия. Статистическая сумма неидеального газа. Второй вириальный коэффициент.
16. Газ с короткодействующим потенциалом между молекулами. Разложение по степеням плотности. Функции Майера.
17. Статистическое описание квантовых систем. Матрица плотности. Уравнение Неймана. Квантовые варианты статистических распределений.
18. Большой термодинамический потенциал системы тождественных частиц. Распределения Ферми и Бозе для средних чисел заполнения.
19. Идеальный квантовый газ элементарных частиц. Термодинамические потенциалы, давление, теплоемкость.
20. Разреженный идеальный квантовый газ элементарных частиц. Свободная энергия, уравнение и теплоемкость в первом приближении. Классический предел.
21. Квантовая теория теплоемкости газа двухатомных молекул. Вращение молекул. Молекулы, состоящие из различных атомов.
22. Квантовая теория теплоемкости газа двухатомных молекул. Вращение молекул. Молекулы, состоящие из одинаковых атомов. Ортоводород и параводород.
23. Квантовая теория теплоемкости газа двухатомных молекул. Колебания молекул.
24. Квантовая теория теплоемкости твердого тела. Длинноволновые колебания атомов. Модель Дебая.
25. Флуктуации энергии, объема и числа частиц. Зависимость средней и относительной флуктуации от размеров системы.
26. Формула Эйнштейна для вероятности флуктуации. Флуктуации основных термодинамических параметров в замкнутой системе.
27. Кинетическое уравнение Больцмана. Принцип детального равновесия. Кинетическое уравнение Больцмана.
28. H-теорема Больцмана. Закон необратимости энтропии.

Примеры задач.

1. Для некоторой классической макроскопической системы известна ее каноническая статистическая сумма $Z=2000T^3$, где T – температура, выраженная в электрон-вольтах. Найдите энтропию системы макроскопической системы в статистической шкале при температуре $T=0,03$ эВ.
2. Молярная масса воздуха на уровне моря приблизительно равна $\mu=0,029$ кг, а его температура $T=300^\circ\text{K}$. Считая земную атмосферу изотермической и постоянной по химическому составу, найдите высоту, на которой давление в 3 раза меньше, чем на уровне моря.
3. В газовой центрифуге радиуса $R=1$ м, вращающейся с постоянной угловой скоростью $\omega=100$ рад/с, производится разделение смеси газов, молекулы которых имеют молярные массы $m_1=0,003$ кг и $m_2=0,004$ кг. Найти коэффициент разделения $q=(n_1/n_2)|_{r=R}/(n_1/n_2)|_{r=0}$, где n_1 и n_2 – концентрация молекул. Температура газа $T=100^\circ\text{K}$.
4. В большом сосуде объемом $V=1$ м³ при температуре $T=300^\circ\text{K}$ находится $N=10^{24}$ частиц идеального газа с молярной массой $0,029$ кг/моль. Найдите количество частиц, вылетающих в единицу времени (в секунду) в вакуум из небольшого отверстия площадью

$S=1 \text{ мм}^2$ в стенке сосуда. Распределение частиц по скоростям описывается распределением Максвелла.

5. Невырожденный парамагнитный газ состоит из $6 \cdot 10^{23}$ частиц со спином $1/2$ и магнитным моментом, равным магнетону Бора $\mu=9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$, помещен в однородное магнитное поле с индукцией 20 Тл . Найдите удельную (на 1 частицу) поляризуемость электронного газа при температуре 600°К .

6. Система обладает девятью невырожденными эквидистантными уровнями внутреннего движения частиц $\epsilon_p = \epsilon_r$, $p=0,1,2,3,\dots,9$. Энергия высшего уровня намного меньше тепловой энергии $\epsilon=0,001T$. Найти удельную (на 1 частицу) энтропию системы при указанных в задаче условиях.

7. Двухатомный классический идеальный газ с удельной (мольной) теплоёмкостью $C_V=5/2R$ находится при температуре $T=300^\circ\text{К}$. Число молекул в газе $N=6 \cdot 10^{23}$. Найдите относительную флуктуацию внутренней энергии газа $\delta U=\Delta U/U$ при описанных в задаче условиях.

8. Неидеальный газ состоит из частиц, потенциал парного взаимодействия которых имеет вид прямоугольной потенциальной ямы постоянной глубины, то есть $u_{12}(r)=-u_0$ при $d < r < d_1$, $u_{12}(r)=+\infty$ при $r < d$, и $u_{12}(r)=0$ при $r > d_1$. Здесь u_0 , d , d_1 – некоторые параметры. Найдите второй вириальный коэффициент для данного газа.

9. В модели решеточного газа $N=10^{22}$ частиц газа могут распределяться по $N_0=10^{24}$ ячеек с объемом $v_0=V/N_0=10^{-24} \text{ м}^3$, причем в каждой ячейке может находиться не более 1 частицы. Найдите относительное отклонение давления $\delta P=P/P_{\text{ид}}-1$ данного газа от давления идеального газа при температуре $T=273^\circ\text{К}$.

10. Потенциал парного взаимодействия между частицами в неидеальном газе описывается формулой Леннарда-Джонсона $u_{12}(r)=4u_0((\sigma/r)^{12}-(\sigma/r)^6)$. Докажите, что второй вириальный коэффициент имеет максимум при промежуточном значении температуры, если $\sigma/r < (3/2)^{1/3} \approx 1,145$.

Ответы. Задача 1. $7,09$. Задача 2. $9,63 \text{ км}$. Задача 3. $1,0019$. Задача 4. $5,8 \cdot 10^{19}$. Задача 5. $0,0022\mu$. Задача 6. $\ln 10$. Задача 7. $3,16 \cdot 10^{10} \text{ эВ}$, $5,06 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$. Задача 8. $2\pi d^3/3 - 2\pi(d_1 - d_0)^3 u_0/3T$. Задача 9. $N/(2 \cdot N_0)$. Задача 10. Ответ получается исследованием производной от вириального коэффициента по температуре. Задача считается решенной, если корректно использованы физические законы и получен верный ответ.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Промежуточная аттестация выставляется по итогам контроля посещаемости лекций и выполнения контрольных работ. Требуется посещение не менее чем 50% занятий и выполнение 50% контрольных и домашних работ.

Оценивание ответа студента на экзамене проводится в соответствии со следующей таблицей.

Оценка	Критерий оценивания			
	Т	Б	Д	З
5				
4				
3				

	Полный развернутый ответ или задача решена или тест пройден
	Неполный ответ
	Фрагментарный ответ
	Отсутствие ответа или задача не решена или тест не пройден

Здесь Т – тест, Б – вопросы по билету; Д – дополнительные вопросы; З – задача; 5 – отлично; 4 – хорошо; 3 – удовлетворительно. Неудовлетворительная оценка соответствует всем иным случаям, не указанным в таблице.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Оценочные материалы для проверки остаточных знаний состоят из трех частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа. Первая часть содержит 20 вопросов в тестовой форме, проверяющих ИОПК-1.1. Ответ на вопрос выбирается из 4 возможных вариантов, только один из которых является правильным. Вторая часть содержит два вопроса, проверяющих ИОПК-2.1. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме. Третья часть содержит 1 вопрос, проверяющий ИОПК-1.1, ИОПК-2.1 или ИОПК-2.1, и оформленный в виде практической задачи. Ответ на вопрос третьей части предполагает решение задачи и краткую интерпретацию полученных результатов. Четвертая часть содержит кейс, ИОПК-2.1, ИОПК-1.1. Ответ предполагает решение кейса и интерпретацию полученных результатов.

Тест

1. Какое из утверждений выполняется в состоянии термодинамического равновесия (ОПК-1):
 - а) химический состав однороден по всему объему системы;
 - б) кинетическая энергия частиц много больше потенциальной энергии;
 - в) взаимодействие с окружением минимально или отсутствует;
 - г) температура постоянна и одинакова по всему объему системы.
2. Какие из троек параметров содержат только экстенсивные величины (ИОПК-1.1):
 - а) давление, энтропия, внутренняя энергия;
 - б) температура, химический потенциал, концентрация;
 - в) количество частиц, свободная энергия, потенциал Гиббса;
 - г) внутренняя энергия, удельная мольная энтропия, объем.
3. К увеличению внутренней энергии системы всегда приводит (ОПК-1):
 - а) получение энергии в форме тепла;
 - б) совершение механической работы над окружением;
 - в) химические реакции в замкнутой системе;
 - г) фазовый переход.
4. Уравнение состояния газа связывает следующие параметры (ИОПК-1.1):
 - а) концентрация и химический потенциал;
 - б) энергия молекул и температура;
 - в) давление, температура, объем;

- г) мольный объем и массу молекулы.
5. Удельная мольная теплоемкость газа Ван-дер-Ваальса зависит от (ОПК-1):
- а) температуры;
 - б) объема;
 - в) температуры и объема;
 - г) ни одного из перечисленных параметров.
6. Тепловой машиной называется (ОПК-1):
- а) любое устройство, периодически совершающее механическую работу;
 - б) система, которая поднимает при адиабатическом расширении;
 - в) любой двигатель внутреннего сгорания, или двигатель Стирлинга;
 - г) система из трех тел с разными температурами.
7. Коэффициент полезного действия тепловой машины (ИОПК-1.1):
- а) всегда находится в интервале от 0 до 1;
 - б) в наиболее эффективных двигателях достигает 1;
 - в) зависит от максимального значения давления в рабочем цикле;
 - г) не определен, если состояние рабочего тела изменяется неравновесно.
8. Какое из утверждений является формулировкой второго начала термодинамики (ИОПК-1.1):
- а) коэффициент полезного действия цикла Карно максимален;
 - б) теплота не может передаваться от более холодного тела к более тёплому;
 - в) энтропия изолированной системы неизменно возрастает;
 - г) абсолютный нуль температуры не достижим.
9. Условием равновесия фаз в многофазной многокомпонентной системе является (ОПК-1):
- а) равенство концентраций всех компонент во всех фазах;
 - б) равенство потенциала Гиббса всех фаз;
 - в) равенство химических потенциалов всех компонент во всех фазах;
 - г) минимум энтропии.
10. Состояние равновесия экзотермической реакции смещается влево при (ОПК-1):
- а) понижении температуры;
 - б) повышении температуры;
 - в) введении дополнительной порции реагентов;
 - г) нельзя сказать.
11. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса определяет (ИОПК-1.1):
- а) уравнение состояния газа в критической точке;
 - б) производную температуры газа в адиабатическом процессе;
 - в) равновесное состояние пара и жидкости;
 - г) кривую равновесия фаз при фазовом переходе первого рода.
12. Если макроскопическая система содержит N атомов, рассматриваемых как массивные материальные точки, то размерность фазового пространства равна (ИОПК-1.1):
- а) $3N$;
 - б) $6N$;
 - в) $9N$;
 - г) нельзя определить, так как она зависит от температуры;
13. Формула Больцмана $S = k \ln \Gamma$ связывает (ИОПК-1.1):
- а) энтропию и термодинамический вес;
 - б) классическое действие на фазовой траектории и количество частиц;
 - в) внутреннюю энергию и температуру;
 - г) энтропию и внутреннюю энергию;
14. Каноническая функция распределения применяется к (ОПК-1):
- а) замкнутой макроскопической системе;

- б) открытой системе, находящейся в тепловом контакте с окружением;
 - в) открытой системе, обменивающейся с окружением теплом и частицами;
 - г) в ансамблях постоянного давления.
15. В состоянии равновесия диагональные элементы матрицы плотности описывают (ИОПК-1.1):
- а) количество частиц в микросостоянии;
 - б) среднюю плотность материи в заданном микросостоянии;
 - в) волновые функции микросостояний;
 - г) вероятность нахождения системы в микросостоянии.
16. По формуле $F = -T \ln Z$ каноническая статистическая сумма Z определяет (ИОПК-1.1):
- а) внутреннюю энергию;
 - б) свободную энергию;
 - в) потенциал Гиббса;
 - г) силу.
17. Какое из утверждений выполняется в одноатомном классическом идеальном газе (ИОПК-1.1):
- а) частицы газа взаимодействуют короткодействующими силами;
 - б) частицы газа имеют небольшой, но конечный размер;
 - в) все столкновения частиц - неупругие;
 - г) внутренняя энергия равна кинетической энергии частиц.
18. Классическая теория теплоемкости многоатомных газов утверждает, что:
- а) мольная теплоемкость любого газа равна $3/2R$;
 - б) хорошо согласуется с экспериментом при низких температурах;
 - в) доказывает переход в жидкое состояние при понижении температуры;
 - г) описывает теплоемкость большинства газов при комнатной температуре.
19. При фиксированном значении температуры и концентрации давление идеального разреженного квантового ферми-газа (ОПК-1)::
- а) выше, чем у больцмановского газа;
 - б) ниже, чем у больцмановского газа;
 - в) ниже или выше, в зависимости от температуры;
 - г) зависит от массы частиц.
20. При комнатной температуре электронный газ в металлах (ИОПК-1.1)::
- а) всегда невырожден;
 - б) всегда вырожден;
 - в) вырождение снимается при температуре плавления;
 - г) имеет очень маленькую концентрацию.

Ключи: 1 г), 2 б), 3 а), 4 в), 5 а), 6 г), 7 а), 8 в), 9 в), 10 б), 11 г), 12 б), 13 а), 14 б), 15 г), 16 б), 17 г), 18 г), 19 а), 20 б). Тест считается пройденным, если правильные ответы даны не менее, чем на половину вопросов.

Задачи:

Задача 1 (ИОПК-2.1)

В ходе термодинамического процесса макроскопическая система совершила над окружением механическую работу 5600 Дж. Найдите изменение внутренней энергии, если количество теплоты, полученное системой, составило 4200 Дж. Количество вещества в ходе термодинамического процесса не изменялось.

Задача 2 (ИОПК-2.1)

В ходе равновесного изотермического процесса, совершаемого 1 молем одноатомного идеального газа при температуре 300К, объем увеличился в 10 раз по

сравнению с первоначальным объемом. Найдите количество теплоты, которое было передано идеальному газу в ходе термодинамического процесса.

Задача 3 (ОПК-2)

Тепловая машина, работающая по циклу Карно, при температуре холодильника 300К имеет коэффициент полезного действия 35%. Каким станет коэффициент полезного действия тепловой машины, если температура нагревателя вырастет на 300 К при неизменной температуре холодильника.

Задача 4 (ИОПК-2.1)

Поршневым воздушным насосом откачивают воздух из сосуда с объемом $V=20$ л. За один цикл (ход поршня) насос захватывает объем $\Delta V=2$ л. Сколько следует сделать циклов, чтобы давление воздуха в сосуде уменьшилось в 2 раза. Процесс считать изотермическим, воздух – идеальным газом.

Задача 5 (ОПК-2)

В результате эксперимента оказалось, что молярная теплоемкость газовой смеси, содержащий водорода и гелий равна $2R$. Вычислите молярную долю водорода в смеси, если известно, что молярная теплоемкость чистого водорода при тех же условия $7/2R$, а гелия – $3/2R$. Смешивающиеся газы считать идеальными.

Задача 6 (ОПК-2)

В помещении объемом $V=60$ м³ включили отопление, в результате чего температура воздуха увеличилась с 0°С до 20°С. Считая атмосферное давление постоянным, а воздух идеальным газом, найдите изменение внутренней энергии газа в помещении после включения отопления.

Задача 7 (ОПК-2)

Теплота фазового перехода жидкость-пар для воды равна 41,4 кДж/моль. Оцените температуру кипения воды на горе высотой 4000 м, на которой атмосферное давление равно 550 мм ртутного столба. Теплоту фазового перехода считать постоянной и не зависящей от температуры.

Задача 8 (ИОПК-2.1)

В результате изохорного процесса температура кристалла увеличилась с 300°К до 815°К. Найдите изменение энтропии кристалла, если его теплоемкость при постоянном объеме равна 24,9 Дж/К и не зависит от температуры. Никаких фазовых переходов при нагреве не было.

Задача 9 (ОПК-2)

В сосуд, содержащий 10 молей воды при температуре кипения, добавили некоторое количество сахара, после чего кипение прекратилось, а давление насыщенного водяного пара над раствором уменьшилось на 1% от первоначального значения. Найдите массу добавленного сахара. Молярная масса сахара 180,16 г/моль.

Задача 10 (ИОПК-2.1)

Вычислить показатель адиабаты $\gamma=C_p/C_v$ для смеси, содержащей $N_1=2$ моля водяного пара и $N_2=1$ моль углекислого газа. Теплоемкость газов определяется законом равного распределения. Молекула углекислого газа – линейная, водяного пара – нелинейная. Отклонение от идеальности отсутствует.

Задача 11 (ИОПК-2.1, ПК-1)

Стехиометрическое уравнение химической реакции образования оксида азота (II) в результате реакции газовой смеси кислорода и азота имеет вид $O_2+N_2=2NO-180,9$ кДж. Определите, как изменится равновесная концентрация оксида азота при увеличении температуры газовой смеси.

Задача 12 (ИОПК-2.1)

Система состоит из 50 тождественных бозонов, каждая из которых может находиться в одном из двух возможных квантовых состояний. Определите термодинамический вес макроскопического состояния, в котором в каждом микросостоянии находится по 25 частиц.

Задача 13 (ИОПК-2.1)

В результате эксперимента была измерена средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул кислорода, равна 350 м/с. Считая кислород идеальным газом, найдите его температуру. Молярная масса молекулярного кислорода равна 0,032 кг/моль.

Задача 13 (ОПК-2, ПК-1)

В результате эксперимента была измерена средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул кислорода, равна 550 м/с. Считая кислород идеальным газом, найдите его температуру. Молярная масса молекулярного кислорода равна 0,032 кг/моль.

Задача 14 (ИОПК-2.1)

В результате эксперимента гелий и неон, хранящиеся по отдельности в баллонах объемом по 100 л, были перекачаны третий баллон такого же размера, в котором образовалась гелий-неоновая смесь. Найдите давление гелий-неоновой смеси, если начальное гелия в баллоне было 110 кПа, а неона – 140 кПа. Газы считать идеальными.

Задача 15 (ИОПК-2.1)

Считая столб атмосферного воздуха изотермическим и постоянным по химическому составу, найдите давление воздуха на Эльбрусе на высоте 5642 м над уровнем моря. Молярная масса воздуха 0,029 кг, температура воздуха 0°C, давление на уровне моря 760 мм ртутного столба, ускорение свободного падения 9,81 м/с².

Задача 16 (ИОПК-2.1)

Макроскопическая система состоит 1 моля атомов, каждый из которых может находиться в одном двух энергетических уровней. Энергия возбуждения атома 10,1 эВ. Определите количество атомов, находящихся в возбужденном состоянии при температуре T=0,51 эВ.

Задача 17 (ИОПК-2.1).

При комнатной температуре уравнение состояния газа ксенона описывается формулой Ван-Дер-Ваальса $(P+a/V^2)(V-b)=RT$ с параметрами $a=0,4192 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^{-2}$ и $b=51,6\cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$. Считая атомы газа абсолютно твердыми шарами, оцените радиус атома ксенона.

Задача 18 (ОПК-1, ПК-1).

Длина ковалентной связи Н–Н в молекуле водорода, состоящей из двух атомов протия, равна 0,074 нм, масса атомных ядер $1,67\cdot 10^{-27}$ кг. Пренебрегая массой электронов, определите температуру, при которой происходит возбуждение вращательной степени свободы в молекуле водорода.

Задача 19 (ОПК-1, ПК-1).

При температуре T=300°K решеточная теплоемкость на 1 моль некоторого металла равна $3R=24,93 \text{ Дж/моль}$, а теплоемкость вырожденного электронного газа – 0,249 Дж/моль. Предполагая, что электронный газ остается вырожденным, найдите мольную теплоемкость металла при температуре T=600°K.

Задача 20 (ИОПК-2.1).

Газовый термометр, содержащий 0,001 моля одноатомного идеального газа, используется для прецизионных измерений температуры теплового резервуара. Определите флуктуационный предел точности измерительного прибора вблизи значения температуры T₀=300°K.

Ответы:

Задача 1. 1400 Дж. Задача 2. 5740 Дж. Задача 3. 60,6%. Задача 4. 22. Задача 5. 0,25. Задача 6. 0. Задача 7. 92,2°C. Задача 8. 24,9 Дж/К. Задача 9. 18,016 г. Задача 10. 39/37. Задача 11. Увеличится, так как реакция эндотермическая. Задача 12. $50!/25! /25!\approx 1,26\cdot 10^{14}$. Задача 13. 388° K. Задача 14. 250 кПа. Задача 15. 375 мм ртутного столба, или 49,2% от давления на уровне моря. Задача 16. $2,33\cdot 10^{13}$. Задача 17. 0,274 нм. Задача 18. 176°K. Задача 19. 25,43

Дж/моль Задача 20. $1,22 \cdot 10^{-8} \text{ К}$. Задача считается решенной, если корректно использованы физические законы и получен верный ответ.

Теоретические вопросы:

1. Равновесные и неравновесные термодинамические процессы (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать определение термодинамического процесса, равновесного и неравновесного термодинамического процесса, условия, при которых применимо приближение равновесного процесса, связь равновесных и квазистатических процессов.

2. Механическая работа и количество теплоты (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать разъяснение понятий механической работы и количества теплоты, формульные выражения для количества теплоты и механической работы, геометрический смысл работы и количества теплоты в координатах $P-V$ и $T-S$.

3. Первое начало термодинамики (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать формулировку первого начала термодинамики в конечной и инфинитезимальной форме, дифференциальную форму первого начала термодинамики для равновесных процессов.

4. Второе начало термодинамики (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать примеры однонаправленного характера процессов в замкнутой макроскопической системе, второе начало термодинамики в формулировках Клаузиуса, Томсона, Планка, объяснение их эквивалентности.

5. Теорема Карно и цикл Карно (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать принципиальную схему действия тепловой машины, определение коэффициента полезного действия тепловой машины, описание цикла Карно и формулировку теоремы Карно о коэффициенте полезного действия цикла Карно.

6. Процесс Джоуля-Томсона (ИОПК-1.1, ИОПК-2.1).

Ответ должен содержать описание процесса Джоуля-Томсона, доказательство условия сохранения энтальпии в ходе процесса, метод вычисления изохалатической производной температуры, необходимость использования неидеального газа.

7. Теорема Нернста (ИОПК-1.1)

Ответ должен содержать формулировку третьего начала термодинамики, поведение теплоемкостей при стремлении температуры к абсолютному нулю, объяснение недостижимости абсолютного нуля температуры.

8. Многокомпонентные и многофазные системы (ИОПК-1.1)

Ответ должен разъяснять понятие компонента и фазы, примеры многофазных и/или многокомпонентных систем, условие равновесия фаз в многофазной и многокомпонентной системе, правило фаз Гиббса.

9. Газ Ван-дер-Ваальса (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса, физический смысл параметров a , b , типичный вид изотерм при различных температурах, понятие критических параметров, правило Максвелла для определения кривой равновесия фаз.

10. Эндотермические и экзотермические реакции (ИОПК-1.1).

Ответ должен определять понятия стехиометрического уравнения, константы равновесия, теплового эффекта реакции, описана зависимость константы равновесия от температуры в зависимости от теплового эффекта, сформулировано правило Ле Шателье.

11. Термодинамика слабых растворов (ИОПК-1.1).

Ответ должен определять раствор и слабый раствор, молярной концентрации раствора, зависимости химических потенциалов растворителя и растворенного вещества от концентрации, закон Рауля, формулу для осмотического давления.

12. Термодинамика излучения (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать определение объемной и спектральной плотностей лучистой энергии, уравнение состояния фотонного газа, энтропию и теплоемкость газа, вывод законов Стефана-Больцмана, Релея-Джинса и Вина.

13. Макроскопическое и микроскопическое состояние (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать определение макроскопического и микроскопического состояния, примеры состояний, способы их описания в классической и квантовой статистической физике, должно быть введено понятие термодинамического веса.

14. Микроканоническое распределение (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать описание микроканонического ансамбля, принцип равной вероятности реализации микросостояния, формульную запись микроканонического распределения, правило вычисления средних значений наблюдаемых величин.

15. Каноническое и большое каноническое распределение (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать описание канонического и большого канонического ансамбля, формульную запись канонического и большого канонического распределения, выражение для статистических сумм, правило вычисления средних.

16. Распределение Максвелла–Больцмана (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать постановку задачи о получении одночастичной функции распределения по положениям и импульсам, описание формульную запись распределения, средние значения скорости и энергии частиц.

16. Неидеальные газы (ИОПК-1.1).

Ответ должен содержать определение неидеального газа, постановку и решение задачи о вычислении статистической суммы неидеального газа, разложение давления по степеням концентрации, выражение для второго вириального коэффициента.

17. Вырожденный газ бозонов (ИОПК-1.1, ИОПК-2.1).

Ответ должен содержать распределение Бозе–Эйнштейна, температурную зависимость химического потенциала, определение температуры конденсации, оценки энтропии и теплоемкости, количество частиц в конденсате.

18. Вырожденный газ фермионов (ИОПК-1.1, ИОПК-2.1).

Ответ должен содержать распределение Ферми–Дирака, зависимость числа заполнения от энергии при нуле температур, определение энергии Ферми, оценки энергии ферми для металлов, зависимость энтропии и теплоемкости от температуры.

19. Квантовая теория теплоемкости кристалла (ИОПК-1.1, ИОПК-2.1).

Ответ должен содержать описание микроскопической структуры кристалла, оценку числа колебательных степеней свободы, качественное описание зависимости теплоемкости от температуры, интерполяционную формулу Дебая.

20. Флуктуации (ИОПК-1.1, ИОПК-2.1).

Ответ должен содержать определение понятия флуктуации, отличие флуктуации и термодинамического процесса, методику вычисления флуктуаций энергии, объема, числа частиц, формулу Эйнштейна для вероятности флуктуации.

Кейс (ИОПК-2.1, ИПК-1.1)

Промышленная установка производит аммиак в результате обратимой экзотермической химической реакции $3\text{H}_2 + \text{N}_2 = 2\text{NH}_3$ соединения азота и водорода в газообразной фазе при давлении 500 атм и температуре 500°С. Для того чтобы повысить производительность установки за счет увеличения скорости химической реакции, рабочую температуру установки было решено повысить, и одновременно изменив рабочее давление, так чтобы доля аммиака в выходящей из установки смеси осталась неизменной. Как потребовалось изменить рабочее давление в установке?

Ответ должен содержать формальную постановку задачи, ее решение и интерпретацию полученных выводов.

Кейс (ИОПК-2.1, ИПК-1.1)

В вашем распоряжении имеются четыре одинаковых куба из твердого вещества с постоянной теплоёмкостью. Кубы с номерами 1 и 2 имеют температуру 100° С, а кубы с номерами 3 и 4 имеют температуру 0° С. Любую пару кубов можно привести в тепловой

контакт друг с другом, в результате которого их температура выравнивается. Например, при контакте куба 1 с температурой 100°C и куба 3 с температурой 0°C , температура обоих кубов становится 50°C . Предложите процедуру «обмена» температурой, в результате которой температура кубов 3 и 4 становится больше, чем у 1 и 2.

Ответ должен содержать формальную постановку задачи, ее решение и интерпретацию полученных выводов.

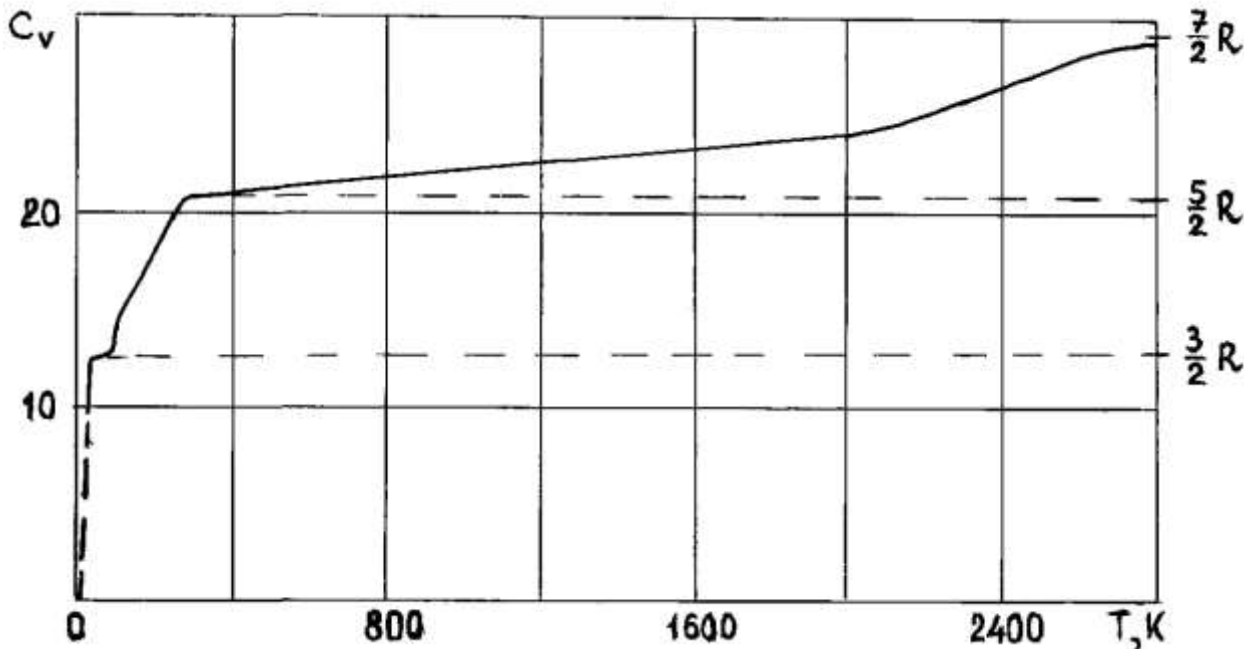
Кейс (ИОПК-2.1, ИПК-1.1)

В вашем распоряжении имеются четыре одинаковых куба из твердого вещества с постоянной теплоёмкостью. Кубы с номерами 1 и 2 имеют температуру 100°C , а кубы с номерами 3 и 4 имеют температуру 0°C . Любую пару кубов можно приводит в тепловой контакт друг с другом, в результате которого их температура выравнивается. Например, при контакте куба 1 с температурой 100°C и куба 3 с температурой 0°C , температура обоих кубов становится 50°C . Предложите процедуру «обмена» температурой, в результате которой температура кубов 3 и 4 становится больше, чем у 1 и 2.

Ответ должен содержать формальную постановку задач, ее решение и интерпретацию полученных выводов.

Кейс (ИОПК-2.1, ИПК-1.1)

На рисунке ниже представлена температурная зависимость удельной мольной теплоемкости газообразного молекулярного водорода при постоянном объеме в диапазоне от температуры кипения до 2800°K , выше которой становятся существенными процессы диссоциации молекул газа на атомы. Почему кривая теплоёмкости монотонно растет во всем диапазоне температур? Объясните причину скачкообразного изменения теплоемкости около 25°K , в диапазоне от 100 до 300°K , а также причину монотонного возрастания теплоемкости от 300 до 2800°K .



Информация о разработчиках

Капарулин Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., физический факультет ТГУ, доцент