

ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Т.Г. ШЕВЧЕНКО

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра ОФ и МПФ

**Методические рекомендации
по разделу «молекулярная физика»
курса физики
для студентов инженерных специальностей
физико-математического факультета,
для подготовки
к промежуточному и итоговому тестированию**

Тирасполь, 2012

УДК
ББК

Составители: Брусенская Е.И., Хамидуллин Р.А.

Рецензенты:

Константинов Н.А., доцент кафедры ОФ и МПФ

Соковнич С.М., доцент кафедры теоретической физики

Методические рекомендации по разделу «молекулярная физика» курса физики для студентов инженерных специальностей физико – математического факультета для подготовки к промежуточному и итоговому тестированию. Брусенская Е.И., Хамидуллин Р.А., г. Тирасполь, ПГУ им. Т.Г. Шевченко, 2012г.- 55с. (электронный вариант)

В пособии изложены основные положения, законы и выводы, а также приведены основные соотношения по каждой изучаемой теме раздела «молекулярная физика». Кроме того, после приведенного справочного материала по соответствующей теме даны варианты тестов промежуточного контроля и примеры практических заданий к нему. В конце пособия приведены тесты итогового контроля по соответствующему разделу физики и примеры контрольных работ с ответами. Данное пособие должно помочь студентам в подготовке к соответствующим формам контроля и является тем минимумом в рамках раздела «молекулярная физика», который необходим для сдачи экзамена по физике.

Данное пособие рекомендуется студентам инженерных специальностей физико–математического факультета.

УДК
ББК

Утверждено Научно-методическим советом ПГУ им. Т.Г. Шевченко

© Составители
Брусенская Е.И., Хамидуллин Р.А., 2012

Содержание

Введение.....	3
Общие сведения и законы молекулярной физики.....	8
Статистическая физика.....	17
Термодинамика и ее начала.....	25
Фазовые превращения.....	34
Явления переноса в молекулярной физике.....	42
Варианты тестов итогового контроля по разделу:	
молекулярная физика.....	50
Примеры контрольных работ с ответами по разделу:	
молекулярная физика.....	51
Приложение 1.....	53
Приложение 2.....	54
Литература.....	55

Введение

Учение о теплоте зародилось в 18 веке. До этого времени понятие **температуры** и **теплоты** практически не различались. Работами ученых 18 века было начато **количественное исследование тепловых явлений**. В разработку шкал для измерения температуры основной вклад внесли немецко-голландский физик Габриэль Даниэль Фаренгейт (1686-1736), французский ученый Рене Антуан Фершо де Реомюр (1683-1757) и шведский ученый Андерс Цельсий (1701-1744). Голландский физик Питер ван Мушенбрек (1692-1761) провел первые исследования теплового расширения твердых тел и использовал расширение железного бруска для измерения температуры плавления ряда металлов.

Количественные исследования смешивания воды разных температур, проведенные российским физиком Георгом Вильгельмом Рихманом (1711-1753), изучение шотландским ученым Джозефом Блэком (1728-1799) процессов плавления и испарения и другие работы в области тепловых явлений привели к разделению понятий теплоты и температуры. Были введены единицы измерения количества тепла (калория), понятия теплоемкости, теплоте плавления и парообразования. Для объяснения природы теплоты использовались две теории: по одной теплота связывалась с движением частиц, а по другой рассматривалась специальная материя - теплород. Следует отметить работы в этом направлении Ломоносова, который был ярким противником теории теплорода.

Ломоносов Михаил Васильевич (1711-1765) экспериментально доказал (1756) закон сохранения вещества, который был окончательно подтвержден А.Лавуазье в 1774. Он представлял природу как единое целое, где все взаимосвязано и не исчезает бесследно (закон сохранения материи и движения Ломоносова). Был основоположником внедрения физических методов в химию, разработал конструкции различных приборов (около 100). Ломоносов является одним из основоположников молекулярно-кинетической теории теплоты. Нагревание связывал с возрастанием поступательного и вращательного движения, что изложил в работе "Размышления о причине теплоты и холода" (1747-48). Велик вклад Ломоносова в развитие науки, культуры и образования, он заложил основы естествознания в России. В 1755 по его инициативе и проекту был открыт Московский университет, носящий теперь его имя. АН СССР учредила Золотую медаль им. М.В.Ломоносова.

В 19 веке развивалось учение о теплоте, и были сформулированы основные положения термодинамики и молекулярно-кинетической теории. В конце 18 - начале 19 века проводилось много исследований теплового расширения тел. Особое внимание обращалось на его равномерность и был установлен ряд аномалий для твердых и жидких тел: анизотропия расширения кристаллов, максимум плотности воды при 40С, сжатие йодистого серебра при нагреве от -10 до 700С и др. Для теплового расширения воздуха Вольтой в 1793 г. была установлена равномерность расширения, а в 1802 г. французский физик и химик Жозеф Луи Гей-Люссак (1778-1850) сформулировал на основе собственных экспериментов и исследований своего соотечественника Жака Шарля (1746-1823) закон о том, что все газы расширяются равномерно и одинаково, и рассчитал коэффициент расширения. В том же 1802 г. Дальтон сформулировал свой закон о парциальных давлениях.

Дальтон Джон (1766–1844) проводил физические исследования в области молекулярной физики: адиабатическое сжатие и расширение, насыщенный и

перегретый пар, зависимость растворения газов от их парциального давления. Он является одним из основоположников атомистических представлений в химии, открыл закон кратных отношений, ввел понятие атомного веса и составил первую таблицу атомных весов элементов. Многочисленные работы привели к заключению о различии теплоемкостей воздуха при постоянном объеме и постоянном давлении. На это различие обратил внимание Лаплас и в 1816 г. он объяснил несоответствие экспериментального значения скорости звука в воздухе получаемому из теории Ньютона изменением температуры при чередующихся сжатиях и разрежениях воздуха.

Физические исследования **Лапласа Пьера Симона** (1749-1827) относятся к молекулярной физике, теплоте, акустике, электричеству, оптике. В 1821 установил закон изменения плотности воздуха с высотой (барометрическая формула). В 1806-07 разработал теорию капиллярности, вывел формулу для скорости звука в газах с поправкой на адиабатичность. Вместе с А.Лаувазье впервые применил для измерения линейного расширения тел зрительную трубу, при помощи сконструированного им ледяного калориметра определил удельные теплоемкости многих веществ (1783). Лаплас ввел в формулу Ньютона поправку, соответствующую отношению теплоемкостей при постоянном давлении и объеме, что устранило несоответствие и послужило основой для экспериментального метода определения этого отношения для всех газов.

Одновременно в основном усилиями химиков развивалась атомистика. Один из создателей ее основ Дальтон в 1803 г. сформулировал закон кратных отношений и в 1808 г. он опубликовал труд "Новая система химической философии", в котором изложил атомистическую теорию. По этой теории соединения состоят из атомов (по Демокриту) элементов, которые различаются по атомному весу. Шведский химик **Иенс Якоб Берцелиус** (1779-1848) внес большой вклад в атомистическую теорию и в 1826 г. опубликовал таблицу атомных весов, которые в основном совпадают с принятыми в настоящее время. Он также предложил химические символы элементов по первым буквам их латинского названия.

На основе атомных весов с учетом химических свойств элементов **Менделеев Дмитрий Иванович** (1834 — 1907) сделал самое гениальное открытие в химии 19 века - периодический закон и составил периодическую таблицу химических элементов. Он открыл в 1869 один из фундаментальных законов природы – периодический закон химических элементов и на его основе создал периодическую таблицу. Исправил значения атомных весов многих элементов, предсказал существование и свойства новых, еще не открытых элементов (галлий, германий, скандий) и вычислил приблизительно их атомные веса. Последующие открытия блестяще подтвердили эти предсказания и периодический закон. Предсказал существование критической температуры (1860), обобщив уравнение Клайперона, вывел в 1874 общее уравнение состояния идеального газа (уравнение Клайперона-Менделеева). В 1887 осуществил беспилотный полет воздушного шара для наблюдения солнечного затмения и изучения верхних слоев атмосферы. Разработал физическую теорию весов, конструкцию коромысла и арретира, точные приемы взвешивания. В 1888 выдвинул идею подземной газификации угля.

В 1811 г. итальянский химик **Амедео Авагадро** (1776-1856) сформулировал свой закон о том, что при одинаковых внешних условиях (температура и давление) в равных объемах газов содержится равное число частиц. При этом допускалось, что молекула газа может состоять из нескольких атомов.

Успехи учения об атомно-молекулярном строении вещества, в особенности, газов, безусловно, оказало влияние на становление термодинамики и молекулярной физики и способствовало развитию механической теории теплоты. Этому в немалой степени способствовали начатые еще в 1765 г. Джеймсом Уаттом (1736 – 1819) методические экспериментальные изучения паровой машины, которые затем были продолжены широким кругом исследователей. В 1784 г. он создал универсальный паровой двигатель с непрерывным вращением с высокой эффективностью, получивший широкое распространение и сыгравший большую роль в промышленной революции 19 века.

В итоге работ по решению практической проблемы увеличения эффективности паровой машины **Карно Никола Леонард Сади** (1796 – 1832) сформулировал основные положения термодинамики об эквивалентности работы и теплоты (первое начало термодинамики) и о необходимости холодильника в тепловой машине. Он является одним из создателей термодинамики. В 1824 в сочинении “Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развить эту силу”, исходя из невозможности создания вечного двигателя, впервые показал, что полезную работу можно получить только при переходе тепла от нагретого тела к более холодному (второе начало термодинамики). Только разность температур нагревателя и холодильника обуславливает отдачу тепловой машины, а природа рабочего тела не играет никакой роли (теорема Карно). Ввел понятия кругового и обратимого процессов, показал преимущества применения в паровых машинах пара высокого давления и его многократного расширения, сформулировал принцип работы газовых тепловых машин.

В 1834 г. французский физик и инженер **Бенуа Поль Эмиль Клапейрон** (1799-1864) обратил внимание на эти работы, заменил первоначальный цикл Карно циклом из двух изотерм и двух адиабат и ввел уравнение состояния газа, объединившее законы Бойля и Гей-Люссака.

Окончательно идею об эквивалентности работы и теплоты в 1842-43 г.г. сформулировали немецкий врач **Юлиус Роберт Майер** (1814-1878) и Джоуль, которые также численно определили механический эквивалент теплоты.

Джоуль Джеймс Прескотт (1818 – 1889) работал в области электромагнетизма, теплоты, кинетической теории газов. Установил в 1841 зависимость выделяемого тепла от величины проходящего тока и сопротивления проводника (закон Джоуля-Ленца). Исследовал тепловые явления при сжатии и расширении газов, показал, что внутренняя энергия идеального газа не зависит от его объема. Совместно с У.Томсоном в 1853-54 открыл явление охлаждения газа при его адиабатическом протекании через пористую перегородку (эффект Джоуля-Томсона). Построил термодинамическую температурную шкалу, теоретически определил теплоемкость ряда газов. Вычислил скорость движения молекул газа и установил ее зависимость от температуры, давление считал результатом ударов частиц газа о стенки сосуда.

Основателем механической теории теплоты был Клаузиус, начавший в 1850г. исследования принципа эквивалентности теплоты и работы и закона сохранения энергии. **Клаузиус Рудольф Юлиус Эммануэль** (1822 – 1888) проводил исследования в области молекулярной физики, термодинамики, теоретической механики. Математической физики. В 1850 независимо от У.Ранкина получил общее соотношение между теплотой и работой в точной математической форме (первое начало термодинамики), введя понятие внутренняя

энергия, и разработал идеальный термодинамический цикл паровой машины (цикл Ранкина-Клаузиуса). Дал математическое выражение второго начала как в случае обратимых круговых процессов, так и необратимых, переформулировав его: невозможен самопроизвольный переход тепла от более холодного к более нагретому телу. В 1865 г. он ввел новую величину - энтропию, сыгравшую фундаментальную роль в термодинамике. Эта величина постоянна в идеальных обратимых процессах и возрастает для реальных процессов. Он показал, что изменение энтропии определяет направление протекания процесса. Ввел в кинетическую теорию газов статистические представления, понятие о сфере действия молекул, первый теоретически вычислил давление газа на стенки сосуда. Обосновал связь температуры плавления вещества с давлением (уравнение Клайперона-Клаузиуса).

Реализация связи между механическими процессами и тепловыми явлениями была осуществлена в кинетической теории газов. Гельмгольц в 1847 г. первым выдвинул гипотезу о том, что внутренняя причина взаимопревращения механической работы и теплоты лежит в сведении тепловых явлений к явлениям механического движения. Этот путь был найден в 1856 г. немецким физиком Августом Карлом Кренингом (1822-1879), а годом позже Клаузиусом, которые построили кинетическую теорию. Было получено уравнение состояния с учетом средней кинетической энергии молекул и введена связь ее с температурой. Кинетической теории удалось объяснить многие явления: диффузию, растворение, теплопроводность и др. Учет взаимодействия между молекулами и конечности их размеров позволил голландскому физiku Иоганнесу Дидерику Ван дер Ваальсу (1837-1923) в 1873 г. ввести поправки в уравнение идеального газа и описать поведение реальных газов.

Формулировка второго начала термодинамики не соответствовала традиционным механическим представлениям, где все процессы обратимы. Кинетическая теория делает это несоответствие противоречием. Эти трудности были преодолены Максвеллом и Больцманом, которые ввели понятие вероятности физических явлений и поставили на место динамических законов в механике статистические законы в термодинамике.

Максвелл Джеймс Клерк (1831 – 1879) проводил исследования в области электродинамики, молекулярной и статистической физики, оптики, механики, теории упругости. Установил статистический закон распределения молекул газа по скоростям (распределение Максвелла), развил теорию переноса, применив ее к процессам диффузии, теплопроводности и внутреннего трения. Создал теорию электромагнитного поля (уравнения Максвелла), введя понятие тока смещения и само определение электромагнитного поля. Развил идею электромагнитной природы света и раскрыл связь между оптическими и электромагнитными явлениями. Установил соотношения между основными теплофизическими параметрами, развивал теорию цветного зрения. Сконструировал ряд приборов.

Больцман Людвиг (1844 – 1906) работал в области кинетической теории газов, термодинамики и теории излучения. Вывел закон распределения молекул газа по координатам (статистика Больцмана). Применив статистические методы, вывел кинетическое уравнение газов, являющееся основой физической кинетики. Связал энтропию системы с вероятностью ее состояния и доказал статистический характер второго начала термодинамики. Статистическая интерпретация второго

начала вместе с Н-теоремой Больцмана легли в основу теории необратимых процессов.

Больцман впервые применил принципы термодинамики к излучению и теоретически получил закон теплового излучения, который был экспериментально установлен Й. Стефаном. Из термодинамических соображений подтвердил существование по гипотезе Д.Максвелла давления света.

Второе начало термодинамики уже рассматривается не как достоверный закон природы, а как вероятный. Здесь впервые классическая физика сталкивается с дуализмом явлений природы.

Следует сказать, что термодинамика только в самых своих истоках опиралась на представления механической теории теплоты. По мере развития она превратилась в самостоятельный раздел физики, методология и мощный аппарат которого стал применяться в различных областях физики и химии. Этому в немалой степени способствовали достаточно общие представления о термодинамических потенциалах, основной вклад в развитие которых внес американский физик **Джозайя Уиллард Гиббс** (1839-1903). В частности, введением понятий свободная энергия и химический потенциал он по существу положил начало новой дисциплины - физической химии и одного из основных ее направлений - термодинамики химических реакций.

Общие сведения

Справочный материал к тестированию по теме

Молекулярная физика – это раздел физики, в котором изучение макроскопических объектов и систем, а также их физических свойств и поведения может вестись как с учетом их микроскопической структуры (особенности движения и взаимодействия групп молекул, составляющих вещество), так и с точки зрения изменения их энергетических характеристик.

В связи с этим выделяют два метода описания объектов и процессов в них протекающих: **термодинамический** и **статистический**

Термодинамический метод основывается на анализе изменения или сохранения параметров и функций, характеризующих систему в целом. При этом совершенно не учитывается поведение каждой молекулы в отдельности и групп молекул этого вещества.

Статистический метод изучает состояние вещества и процессы, в нем протекающие на основе представлений о внутренней структуре вещества и связывает его состояние с поведением отдельных молекул или их групп.

Объектом изучения этих разделов является **термодинамическая система** (ТДС). Структурными единицами любой термодинамической системы являются **атомы** и **молекулы**, из которых состоят макроскопические объекты этой системы. Всякая термодинамическая система характеризуется определенной **температурой**, **давлением** и занимаемым в физическом пространстве **объемом** (T, P, V). Эти параметры называются **термодинамическими** и полностью определяют состояние системы.

С понятиями объем и давление встречаются в классической механике. Однако под **давлением газа** в молекулярной физике, рассматривают давление, возникающее за счет соударений его молекул со стенками, ограничивающими заданный объем (для идеального газа), и плюс давление, учитывающее непосредственное столкновение самих молекул друг с другом (для реального газа). **Давление смеси газов** определяется по закону Дальтона и равно алгебраической сумме парциальных давлений всех газов составляющих смесь. Давление газа зависит от высоты его слоев над уровнем Земли. Из-за того, что верхние слои газа давят на нижние, атмосферное давление (давление газа) с высотой уменьшается по экспоненциальному закону и описывается барометрической формулой. Согласно этой формуле, давление убывает с высотой тем быстрее, чем тяжелее газ (больше его молярная масса M) и чем ниже температура (T).

Понятие же температуры является новым в этом разделе физики, и в тоже время базовым для него. Под **температурой** понимают меру нагретости тел. Для измерения температуры необходим непосредственный контакт между телом и температурным датчиком. Причем этот контакт должен быть достаточно длительным во времени, чтобы между датчиком и телом установилось **термодинамическое (тепловое) равновесие**. Для измерения температуры применяются **термометры** с различными температурными шкалами. **Универсальной температурной шкалой**, независимой от свойств рабочего тела, используемого для измерения температуры, является **абсолютная (термодинамическая)** шкала температур, в которой один температурный градус соответствует одному кельвину. Эта шкала установлена на основе второго начала термодинамики. Абсолютный ноль этой шкалы недостижим.

Если параметры в системе распределены равномерно по всему объему, то такая ТДС является **равновесной**. В случае неравномерного распределения параметров, система является **неравновесной**. Например, если смешать воду при двух различных температурах, то температура смеси в начальный момент будет разной в нижних и верхних слоях в сосуде (неравновесное распределения температуры). Однако с течением времени температура во всех частях станет одинаковой, если на систему не действовать извне, т. е. система перейдет в равновесие. Переход системы из неравновесного в равновесное состояние в отсутствие внешнего воздействия на нее называется **релаксацией**.

Состояние системы в термодинамике изображается в пространстве (T, P, V) . Линия в этом пространстве характеризует процесс, протекающий в системе. Если система в пространстве (T, P, V) перешла из состояния 1 в состояние 2, а потом вернулась обратно по той же линии, не вызвав при этом энергетических изменений в окружающей среде, то процесс такого перехода называется **обратимым**. Если же система вернулась из состояния 2 в 1 по другой линии или вызвала энергетические изменения в окружающей среде, то процесс называется **необратимым**. Процесс, в результате которого система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние, называют **круговым**.

Часто бывает так, что при определенных ТД процессах, сохраняется один из термодинамических параметров. Эти процессы получили название **изотропных по этому параметру процессов (изопрцессов)** Изменение остальных параметров в этих процессах происходит в соответствии с **газовыми законами**. Эти законы были получены экспериментально.

Закон Бойля – Мариотта соответствует **изотермическому процессу**, который протекает при неизменной температуре ($T = const$). Между объемом и давлением существует обратная зависимость, то есть при сжатии газа постоянной массы его давление увеличивается и наоборот.

Закон Шарля связан с **изохорным процессом**, при котором не изменяется объем системы ($V = const$). В этом случае между P и T существует линейная зависимость.

Закон Гей-Люссака. Он описывает **изобарный процесс**, при котором давление газа не изменяется ($P = const$). При этом при нагревании газа постоянной массы объем увеличивается.

Все вышеперечисленные газовые законы применимы только для идеальных газов. **Идеальным** называют газ, размерами и взаимодействием молекул которого можно пренебречь. Такой газ должен быть достаточно разреженным, то есть давление в нем должно быть минимально возможным.

Если в ТД системе изменяются сразу три параметра, то состояние идеального газа описывается **уравнением Менделеева - Клапейрона** (уравнением состояния идеального газа). Это уравнение можно вывести, рассматривая два последовательных **изопрцесса**: газ вначале **изотермически** расширяют ($T_1 = const$), а потом **изохорически** охлаждают ($V_2 = const$).

Всякому объекту в физике можно сопоставить **функцию**, характеризующую его **состояние**. Как известно из курса механики **функцией состояния** любого физического объекта **является энергия**. Для газа такой величиной является его полная внутренняя энергия. Она есть функция его **температуры, числа молекул и атомов в них**, а также от связи между ними. Число атомов в молекуле определяет число ее степеней свободы. **Число степеней свободы i** – это число независимых

переменных определяющих положение тела (молекулы) в пространстве. У всякого физического тела сложной формы имеется **три поступательные** и **три вращательные** степени свободы. У одноатомной молекулы, как у простого объекта, имеется только **три** поступательные степени свободы. У двухатомной **пять** степеней свободы (две вращательные степени и три поступательные). У многоатомной **шесть** степеней свободы (три вращательные степени и три поступательные). Кроме перечисленных степеней свободы, молекулы характеризуются также и колебательными степенями. В общем случае для многоатомной молекулы их число может быть велико. Оно зависит от типа связей между молекулами: упругой или жесткой. При наличии абсолютно жестких связей колебательных степеней свободы нет.

Так как в идеальном газе взаимодействие молекул можно пренебречь, то вклад в полную энергию будет давать их кинетическая энергия. Поэтому **полная энергия** будет **равна сумме всех кинетических энергий молекул** идеального газа. По **теореме равнораспределения Больцмана** на каждую степень свободы молекулы газа приходится одна вторая **тепловой энергии** ($W_0 = \frac{1}{2} kT$).

Полная внутренняя энергия идеального газа, в котором содержится N молекул, равна произведению числа степеней свободы молекул i на их число N и больцмановскую (тепловую) энергию W_0 .

Для любой системы свойственно переходить из одного состояния в другое под действием внешних факторов. Так газ при нагревании может расширяться или охлаждаться в зависимости от типа процесса.

Энергетические функции, которые характеризуют **переход системы** из одного состояния в другое, называют **функциями процесса**. В ТД к ним относятся **термодинамическая работа и количество теплоты**.

Термодинамическая работа характеризует способность газа расширяться в окружающем пространстве, если оно не ограничено, поэтому она непосредственно связана с изменением его объема и является ее функцией. При отсутствии изменения объема (например, при изохорном процессе) эта работа равна нулю. Формула для термодинамической работы может быть получена из соотношения для механической работы.

Количество теплоты, также как и работа, является **функцией процесса** и зависит, в общем случае, от пути его протекания. Она характеризует передачу тепла от одного объекта к другому. Количество теплоты связано с изменением температуры, но не является ее функцией. Путь протекания процесса полностью определяется его видом, который заложен в **теплоемкости процесса** – коэффициенте, связывающем количество теплоты и изменение температуры.

Очень важной характеристикой газа является его **теплоемкость**. Она показывает, какое количество теплоты надо затратить, чтобы нагреть тело на 1К. Различают молярную и удельную теплоемкости. **Молярная теплоемкость** – это теплоемкость, отнесенная к одному молю вещества. **Удельная теплоемкость** – это теплоемкость, отнесенная к одному килограмму вещества. **Теплоемкость** – это величина, значение которой существенно зависит от способа нагревания. Два наиболее простых способа – **изобарный и изохорный**. Молярные теплоемкости, отвечающие этим процессам, связаны **уравнением Майера**, которое показывает, что изобарная теплоемкость больше изохорной на величину универсальной газовой постоянной. **Универсальная газовая постоянная** – это работа, совершаемая одним молем газа при изобарном нагревании. Поэтому для того, чтобы нагреть газ

изобарным способом требуется большее количество тепла, чем для изохорного нагревания для одинакового изменения внутренней энергии газа. Это связано с тем, что при изобарном нагревании помимо изменения внутренней энергии совершается работа.

Кроме вышеперечисленных характеристик состояния идеального газа в термодинамике используется еще одна, связанная с его теплоемкостями. Это **коэффициент Пуассона**. Он равен отношению изобарной теплоемкости к изохорной для одного и того же количества вещества и численно всегда больше единицы.

Помимо рассмотренных ранее изопроцессов существует еще один немаловажный процесс – **адиабатический**. **Адиабатический процесс** – процесс, который происходит в отсутствии теплообмена с окружающей средой. В природе нет как абсолютных теплопередающих, так и абсолютных теплоизолированных систем, поэтому квазиадиабатическими можно считать процессы быстрого сжатия малых объемов газа (накачивание резиновой камеры велосипеда) или медленного сжатия больших объемов газа (конвекция воздушных масс). Антиподом адиабатического процесса является идеальный изотермический процесс.

Характерным для адиабатического процесса свойством, является то, что вся совершаемая над системой работа идет только на изменение внутренней энергии этой системы. В этом процессе газ расширяясь, охлаждается, а, сжимаясь, нагревается.

Политропный процесс – это термодинамический процесс, протекающий с постоянной теплоемкостью. Все рассмотренные ранее термодинамические процессы относятся к политропным процессам. Основной характеристикой политропности процесса является его показатель **политропы** n . При $n = \gamma$ – процесс является адиабатическим, при $n = 1$ – изотермическим, при $n = 0$ – изобарным, при $n \rightarrow \infty$ – изохорным.

Основные соотношения:

Уравнение **изотермического** процесса

$$PV = \text{const} \quad (1)$$

Уравнение **изохорного** процесса

$$\frac{P}{T} = \text{const} \quad (2)$$

Уравнение **изобарного** процесса

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (3)$$

Уравнение **состояния идеального газа**

$$PV = \nu RT \quad (4)$$

где ν – количество молей вещества $\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$; M – молярная масса вещества, m

– масса газа, N_A – число Авогадро, R – универсальная газовая постоянная.

Тепловая энергия, приходящаяся

на одну степень свободы молекулы

$$W_0 = \frac{1}{2} kT \quad (5)$$

Полная внутренняя энергия идеального газа (определение)

$$W = i \cdot N \cdot W_0 \quad (6)$$

Полная внутренняя энергия как функция температуры

$$W = \frac{i}{2} \cdot \nu \cdot RT \quad (7)$$

$$dW = \frac{i}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot dT \quad (8)$$

Термодинамическая работа как функция объема

$$A = \int PdV \quad (9)$$

$$dA = PdV \quad (10)$$

Работа при **изобарном** процессе

$$A = P(V_2 - V_1) \quad (11)$$

Работа при **изотермическом** процессе

$$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (12)$$

Работа при **адиабатическом** процессе

$$A = \frac{\nu RT_1}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right) \quad (13)$$

Количество теплоты (определение)

$$\delta Q = \nu C dT \quad (14)$$

Первое начало ТД в дифференциальной форме

$$\delta Q = \Delta W + \delta A \quad (15)$$

где Q - количество теплоты переданное системе

Молярная теплоемкость

$$C = \frac{dQ}{\nu \cdot dT} \quad (16)$$

Удельная теплоемкость

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad (17)$$

Уравнение Майера

$$C_p = C_v + R \quad (18)$$

Связь **молярных теплоемкостей** с числом степеней свободы:

при **изохорном** процессе

$$C_v = \frac{i}{2} R \quad (19)$$

при **изобарном** процессе

$$C_v = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R \quad (20)$$

Коэффициент Пуассона

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} \quad (21)$$

Уравнение адиабатического процесса (Пуассона)

на плоскости (P, V)

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (22)$$

на плоскости (T, V)

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (23)$$

Уравнение политропы

$$PV^n = \text{const} \quad (24)$$

Закон Дальтона

$$p = \sum_i p_i \quad (25)$$

где индекс i - определяет число чистых газов, образующих смесь.

Барометрическая формула

$$p = p_0 \exp \left(- \frac{Mgh}{RT} \right) \quad (26)$$

где p_0 - атмосферное давление на высоте $h = 0$ относительно поверхности Земли.

Варианты тестов промежуточного контроля по теме

ТЕСТ №1

1. Какой подход в молекулярной физике основывается на анализе изменения или сохранения параметров и функций, характеризующих систему в целом?
2. Какие величины называют термодинамическими параметрами системы?
3. Если параметры в системе распределены равномерно по всему объему, то такая ТДС является _____.
4. Как называется самопроизвольный процесс перехода системы из неравновесного состояния в равновесное?
5. Чему равна работа при изохорном процессе?
6. Уравнение изобарного процесса имеет вид _____.

7. Приведите соотношение для молярной теплоемкости.
8. Коэффициент Пуассона определяется по формуле _____.
9. Какой процесс происходит в отсутствии теплообмена с окружающей средой?
10. Уравнение политропы имеет вид _____.

ТЕСТ №2

1. В чем суть статистического метода в молекулярной физике?
2. Какое состояние называют неравновесным?
3. Какой термодинамический параметр определяет меру нагретости тел?
4. Если система в пространстве (T, P, V) перешла из состояния 1 в состояние 2, а потом вернулась обратно по той же линии, не вызвав при этом энергетических изменений в окружающей среде, то процесс называется _____.
5. Число степеней свободы это _____.
6. Уравнение изотермического процесса имеет вид _____.
7. Полная внутренняя энергия как функция температуры определяется соотношением _____.
8. Приведите соотношение для работы при изобарном процессе.
9. Уравнение Майера имеет вид _____.
10. Какие процессы называют политропными?

ТЕСТ №3

1. Что изучает молекулярная физика?
2. Какой процесс называют необратимым?
3. Газ, размерами и взаимодействием молекул которого можно пренебречь, называют _____.
4. С каким процессом связан закон Гей-Люссака и что он гласит?
5. Приведите уравнение состояния идеального газа.
6. Что называют теплоемкостью системы?
7. Чему равна удельная теплоемкость?
8. Работа при изотермическом процессе определяется соотношением _____.
9. В чем физический смысл универсальной газовой постоянной?
10. Уравнение Пуассона на плоскости (T, V) имеет вид _____. Что оно значит?

ТЕСТ №4

1. Раздел физики, в котором изучение макроскопических объектов и систем, ведется как с учетом их микроскопической структуры, так и с точки зрения изменения их энергетических характеристик называют _____.
2. Процесс, в результате которого система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние, называют _____.
3. Почему молярная изобарная теплоемкость больше изохорной на величину универсальной газовой постоянной?
4. С каким процессом связан закон Бойля – Мариотта и что он гласит?
5. Приведите уравнение изохорного процесса.
6. Чему равна энергия, приходящаяся на одну степень свободы молекулы?
7. Чему равна работа при адиабатическом процессе?
8. В случае адиабатического процесса газ расширяясь _____.
9. Уравнение адиабатического процесса на плоскости (P, V) имеет вид _____.
10. При каком показателе политропы имеет место изохорный процесс?

Примеры заданий с решениями по теме

Задание №1. В сосуде объемом $V = 30$ л содержится идеальный газ при температуре 0°C . После того как часть газа была выпущена наружу давление понизилось на $\Delta p = 0.78$ атм. (без изменения температуры). Найти массу выпущенного газа. Плотность данного газа при нормальных условиях $\rho = 1.3$ г/л.

Решение:

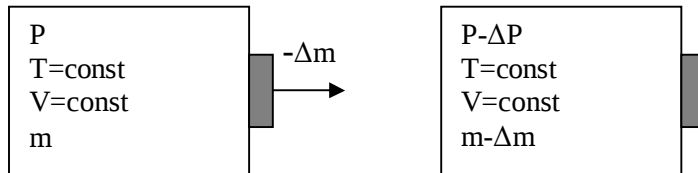


Рис. 1.

По условию задачи процесс происходит при постоянной температуре и с неизменным объемом: $T = \text{const}$, $V = \text{const}$.

Однако масса газа, после того как он был выпущен из сосуда уменьшается на Δm , а, следовательно, и падает давление в сосуде на Δp , которое известно по условию.

Так как рассматриваемый газ можно считать идеальным, то для его начального состояния и конечного состояния (после того как газ был выпущен) можно записать соответствующие уравнения идеального газа.

Для начального состояния:

$$P_0 V = \frac{m}{M} RT \quad (1)$$

Для конечного состояния:

$$(P_0 - \Delta P) V = \frac{(m - \Delta m)}{M} RT \quad (2)$$

где $P_0 \approx 10^5$ Па – давление газа при нормальных условиях равное атмосферному.

Перенесем в уравнениях (1) и (2) неизменные величины в правую часть, а изменяющиеся в левую часть:

$$\frac{P_0}{m} = \frac{RT}{MV} \quad (3)$$

$$\frac{(P_0 - \Delta P)}{(m - \Delta m)} = \frac{RT}{MV} \quad (4)$$

Так как правые части (3) и (4) равны, то должны быть равны и левые части:

$$\frac{P_0}{m} = \frac{(P_0 - \Delta P)}{(m - \Delta m)} \quad (5)$$

Из соотношения (5) находим Δm :

$$\frac{(m - \Delta m)}{m} = \frac{(P_0 - \Delta P)}{P_0} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta P}{P_0} \quad (7)$$

$$\Delta m = \frac{\Delta P}{P_0} m \quad (8)$$

где массу газа в начальном состоянии, которое имело место при нормальных условиях можно представить в виде:

$$m = \rho V \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8) получаем окончательный результат:

$$\Delta m = \frac{\Delta P}{P_0} \rho V \quad (10)$$

$$\Delta m = 30 \text{ г.}$$

Ответ: $\Delta m = \frac{\Delta P}{P_0} \rho V = 30 \text{ г}$

Задание №2. Уравнения процессов имеют вид: 1) $p = p_0 - \alpha V^2$; 2) $p = p_0 \exp(-\beta V)$, где p_0, β, α - положительные постоянные, V - объем моля газа. Найти максимально возможную температуру идеального газа в каждом указанном процессе.

Решение:

Перейдем в заданных уравнениях процессов от давления к температуре с помощью уравнения состояния идеального газа для одного моля, в соответствии с требованием задачи.

$$P = \frac{RT}{V} \quad (1)$$

Подставим (1) в уравнения процессов, выражая температуру как функцию от объема:

$$T(V) = \frac{p_0 V}{R} - \frac{\alpha V^3}{R} \quad (2)$$

$$T(V) = \frac{p_0 V}{R} \exp(-\beta V) \quad (3)$$

Чтобы получить экстремальное (максимальное) значение какой либо функции, необходимо найти её производную по имеющемуся аргументу и приравнять к нулю. Из полученного уравнения определить соответствующее значение аргумента и подставить его в выражение для функции. В нашем случае температура является функцией, а объем ее аргументом. Поэтому возьмем от (2) и (3) производную по V :

$$\frac{dT}{dV} = \frac{p_0}{R} - \frac{3\alpha V^2}{R} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dV} = \frac{p_0}{R} (1 - \beta V) \exp(-\beta V) = 0 \quad (5)$$

Корнями уравнений (4) и (5) являются следующие значения объема:

$$V = \sqrt{\frac{p_0}{3\alpha}} \quad (6)$$

$$V = \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в (2) и (3) соответственно, получаем:

$$T_{\max} = \left(\frac{p_0}{R} - \frac{\alpha p_0}{3\alpha R} \right) \sqrt{\frac{p_0}{3\alpha}} = \frac{2p_0}{3R} \sqrt{\frac{p_0}{3\alpha}} \quad (8)$$

$$T_{\max} = \frac{p_0}{R\beta} \exp\left(-\beta \frac{1}{\beta}\right) = \frac{p_0}{R\beta(\exp)} \quad (9)$$

Ответ: 1) $T_{\max} = \frac{2p_0}{3R} \sqrt{\frac{p_0}{3\alpha}}$; 2) $T_{\max} = \frac{p_0}{R\beta(\exp)}$.

Задание №3. Высокий цилиндрический сосуд с азотом находится в однородном поле тяжести Земли. Температура азота меняется так, что его плотность повсюду одинакова. Найти градиент температуры $(\Delta T/\Delta h)$.

Решение:

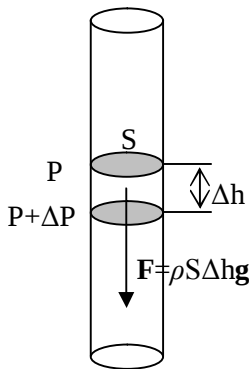


Рис. 3.

Рассмотрим бесконечно тонкий слой азота, толщиной Δh , параллельный основанию цилиндрического сосуда. Его масса:

$$\Delta m = \rho S \Delta h \quad (1)$$

В однородном поле силы тяжести на него действует сила:

$$F_{\text{тяж}} = \Delta m g \quad (2)$$

С другой стороны рассматриваемый слой создает давление ΔP , которому соответствует сила (она равна по модулю силе тяжести):

$$F = F_{\text{тяж}} \quad (3)$$

$$F = \Delta P S \quad (4)$$

Подставляя в (3) соотношения (1), (2), (4), получаем:

$$\rho S \Delta h g = -\Delta P S \quad (5)$$

Знак минус в (5) указывает, что давление убывает с ростом высоты.

В соответствии с уравнением состояния идеального газа:

$$P = \frac{\rho R T}{M} \quad (6)$$

Так как по условию плотность – постоянная величина, то бесконечно малое изменение давления приводит согласно (6) к бесконечно малому изменению температуры:

$$\Delta P = \Delta \left(\frac{\rho R T}{M} \right) = \frac{\rho R \Delta T}{M} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), получаем:

$$\Delta h g = -\frac{R \Delta T}{M} \quad (8)$$

Из соотношения (8), находим градиент температуры:

$$\frac{\Delta T}{\Delta h} = -\frac{gM}{R} = -33 \frac{MK}{m} \quad (9)$$

Ответ: $\frac{\Delta T}{\Delta h} = -\frac{gM}{R} = -33 \frac{MK}{m}.$

Термодинамика и ее начала

Справочный материал к тестированию по теме

Изначально **термодинамика** возникла как наука о превращении тепла (энергии) в работу. Она полностью опиралась в своих выводах на эмпирические законы (начала). Эти термодинамические начала и составляют на данный момент основу термодинамики.

Термодинамические начала позволяют судить об энергетическом состоянии системы, как с качественной точки зрения, так и с количественной. **Первое начало термодинамики** устанавливает количественное соотношение между основными термодинамическими функциями (работой A , количеством теплоты Q и внутренней энергией). **Второе начало термодинамики** указывает на возможные направления протекания процессов, то есть определяет те условия, при которых соответствующие превращения энергии возможны.

Первый закон термодинамики показывает, что все количество теплоты, переданное системе, идет не только на совершение этой системы работы, но и на изменение ее внутренней энергии. **Количество теплоты**, также как и **работа**, является функцией процесса и зависит, в общем случае, от пути его протекания. Если **теплота**, переданная системе **отрицательная (система охлаждается)**, то работа совершается над системой. В случае **циклического процесса**, когда система, пройдя ряд состояний, приходит в исходное, изменение ее внутренней энергии равно нулю ($\Delta W = 0$).

Первое начало термодинамики показывает, что невозможно создать **вечный двигатель первого рода**, который бы, в случае циклического процесса, совершал работу, большую, чем переданное ему количество теплоты, так как это приведет к нарушению универсального закона - закона сохранения и изменения энергии в ТД.

Периодически действующий двигатель, совершающий **полезную работу** A за счет получаемого извне **тепла** Q_1 , называется **тепловой машиной**. Так как в природе не существует идеальных изолированных систем, то, как показывает опыт, процессы, протекающие в них, необратимы. То есть не все тепло Q_1 переданное системе идет на совершение ею полезной работы, часть тепла Q_2 рассеивается в окружающую среду. Чем полнее превращает тепловая машина переданное тепло в работу, тем она выгоднее.

Тепловую машину принято характеризовать **коэффициентом полезного действия** η (КПД). Он равен отношению совершаемой за цикл работы к поступающему в систему за этот же цикл теплу.

В **холодильной машине** цикл имеет противоположное направление по отношению к циклу тепловой машины. Такая машина за цикл отбирает тепло Q'_2 от менее нагретого тела и передает более нагретому телу тепло Q'_1 . При этом над машиной совершается работа извне A' . Холодильная машина характеризуется **холодильным коэффициентом**, который равен отношению тепла, отбираемого за

цикл у менее нагретого тела к работе, совершаемой над холодильной машиной извне.

Второе начало неразрывно связано с таким **статистическим параметром** как **энтропия**. **Энтропия** – это мера беспорядка (хаоса) в системе. Если в системе действуют силы, заставляющие частицы двигаться упорядочено, то система находится в **неравновесном состоянии**. Поэтому при устранении таких сил, система должна перейти в **равновесное состояние**, то есть частицы в ней начнут двигаться хаотически. Такое движение характерно только для объектов, обладающих тепловой энергией. Переход любого вида энергии в тепловую энергию приводит к ее обесцениванию, а, следовательно, к возрастанию энтропии системы.

Таким образом, **энтропия** необратимого процесса всегда **возрастает**, а энтропия обратимого процесса **не меняется и имеет максимальное значение**.

Энтропия имеет как статистическое, так и **термодинамическое** толкование. Изменение энтропии системы обусловлено изменением количества приведенного к системе тепла δQ , следовательно, в ТД энтропия является **приведенным теплом**. На практике чаще всего можно найти лишь изменение энтропии некоторой ТДС, но невозможно указать ее абсолютное значение.

Второе начало термодинамики имеет несколько формулировок.

Формулировка Кельвина гласит, что невозможны такие процессы, единственным конечным результатом которых явилось бы отнятие от некоторого тела тепла и превращение его полностью в работу.

Формулировка Клаузиуса гласит, что невозможны такие процессы, единственным конечным результатом которых был бы переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому телу.

Статистическая формулировка второго начала ТД: энтропия изолированной системы в случае необратимого процесса может только возрастать, если процесс обратимый – энтропия постоянна и имеет максимально возможное значение.

Второе начало ТД запрещает создание **вечного двигателя второго рода**, в котором все переданное системе количество теплоты тратилось бы на совершение полезной работы в процессе рабочего цикла.

Для работы всякой тепловой машины необходимо наличие двух тепловых резервуаров: **нагревателя** с температурой T_1 и **холодильника** с температурой T_2 . Нагреватель передает тепловой машине энергию Q_1 , а холодильник получает от тепловой машины тепловую энергию Q_2 .

Единственным обратимым циклом в системе нагреватель – рабочее тело – холодильник является цикл, который представляет собой последовательное чередование изотерм и адиабат либо на плоскости (P, V) , либо на плоскости (T, S) . Этот циклический процесс называется **циклом Карно**.

На основе цикла Карно работает **идеальная тепловая машина**. Она представляет собой герметичный цилиндр, с теплопроводящим дном и поршнем. В цилиндр помещен идеальный газ, который является рабочим телом. Для осуществления полной теплоизоляции, необходимой для протекания адиабатических процессов, применяют теплоизолирующую крышку, закрывающую дно. Во время работы машины к газу подводится тепло от нагревателя Q_1 и

отдается тепло холодильнику Q_2 . Машина при этом совершает работу A . При поступлении тепла Q_1 от нагревателя происходит процесс изотермического расширения газа, при котором все тепло преобразуется в работу. Далее газ адиабатически охлаждается до температуры холодильника T_2 , а затем происходит процесс его изотермического сжатия, при котором, вследствие передачи тепла от рабочего тела холодильнику, над ним совершается работа. За изотермическим сжатием следует процесс адиабатического нагревания до температуры нагревателя T_1 . Внутренняя энергия идеального газа за весь процесс не изменяется, так как он циклический. **Работа**, совершаемая **идеальной тепловой машиной** численно **равна площади**, ограниченной на плоскости (P,V) или (T,S) двумя изотермами и двумя адиабатами цикла Карно.

Теорема Карно: коэффициент полезного действия всех обратимых машин, работающих в одинаковых условиях (при одной и той же температуре нагревателя и холодильника) зависит только от температуры нагревателя и холодильника.

В термодинамике для характеристики состояния ТДС используется не только внутренняя энергия, но и другие **термодинамические потенциалы**. Каждой паре независимых термодинамических параметров соответствует свой термодинамический потенциал. К изменению всякого потенциала, как функции состояния приводит либо совершаемая работа, либо переданное системе тепло.

Внутренняя энергия W , как **термодинамический потенциал**, является функцией таких параметров состояния как **энтропия** и **объем** $W = W(S,V)$. Она в частных случаях связана с **адиабатическим** и **изохорным** процессами. В случае **адиабатического процесса** система является теплоизолированной, и **внутренняя энергия является** только функцией объема, а ее изменение равно работе совершаемой системой. Причем при совершении работы **газ расширяется**, а его **температура уменьшается**, то есть происходит **уменьшение внутренней энергии**. В случае **изохорного процесса**, все тепло переданное системе идет на **изменение внутренней энергии**. Причем при поступлении **положительного тепла**, **внутренняя энергия ТДС увеличивается**.

Свободная энергия F , как **термодинамический потенциал**, является функцией таких параметров состояния как **температура** и **объем** $F = F(T,V)$. Она в частных случаях связана с **изотермическим** и **изохорным** процессами. В случае **обратимого изотермического процесса** газ совершает работу, приводящую к уменьшению свободной энергии ТДС. В этом отношении свободная энергия играет ту же роль, что внутренняя при адиабатическом процессе. Для **равновесного состояния** ($T = const, V = const$) **свободная энергия имеет минимальное значение**, так как $dF = 0$.

Энтальпия (тепловая энергия) H , как **термодинамический потенциал**, является функцией таких параметров состояния как **энтропия** и **давление** $H = H(S,P)$. Она в частных случаях связана с **адиабатическим** и **изобарным** процессами. При постоянном давлении все тепло, переданное ТДС, идет на увеличение энтальпии системы. В этом случае энтальпия аналогична внутренней энергии при постоянном объеме.

Термодинамический потенциал Гиббса G является функцией таких параметров состояния как **температура** и **давление** $G = G(T,P)$. Она в частных случаях связана с **изотермическим** и **изобарным** процессами. Для **равновесного**

состояния ($T = const, P = const$) энергия Гиббса имеет минимальное значение, так как $dG = 0$.

Основные соотношения:

Первое начало ТД в дифференциальной форме

$$\delta Q = dW + \delta A \quad (1)$$

Первое начало ТД в интегральной форме

$$Q = W_2 - W_1 + A \quad (2)$$

Работа тепловой машины

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

Коэффициент полезного действия тепловой машины

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (4)$$

Холодильный коэффициент

$$\kappa = \frac{Q'_2}{A'} = \frac{Q'_2}{Q'_1 - Q'_2} \quad (5)$$

КПД в случае обратимых процессов

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (6)$$

КПД в случае необратимых процессов

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (7)$$

Термодинамический смысл энтропии

дифференциальная форма

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (8)$$

интегральная форма

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int \frac{dQ}{T} \quad (9)$$

Внутренняя энергия в дифференциальной форме

$$dW = TdS - PdV \quad (10)$$

Свободная энергия в дифференциальной форме

$$dF = -SdT - PdV \quad (11)$$

Энтальпия (тепловая энергия)

в дифференциальной форме

$$dH = TdS + VdP \quad (12)$$

Термодинамический потенциал Гиббса

в дифференциальной форме

$$dG = -SdT + VdP \quad (13)$$

Работа газа при адиабатическом процессе

$$A = W_1 - W_2 \quad (14)$$

Работа при обратимом изотермическом процессе

$$A = F_1 - F_2 \quad (15)$$

Количество теплоты при изохорном процессе

$$Q = W_2 - W_1 \quad (16)$$

Количество теплоты при изобарном процессе

$$Q = H_2 - H_1 \quad (17)$$

Варианты тестов промежуточного контроля по теме

ТЕСТ №1

1. Какое начало ТД устанавливает количественное соотношение между основными термодинамическими функциями?
2. Периодически действующий двигатель, совершающий полезную работу за счет получаемого извне тепла, называется _____.
3. С помощью какой величины характеризуется эффективность работы тепловой машины?
4. Запишите первое начало ТД в дифференциальной форме.
5. Формула для холодильного коэффициента имеет вид.
6. Приведите формулировку Клаузиуса для второго начала ТД
7. Как ведет себя энтропия необратимого процесса?
8. Функцией каких термодинамических параметров является энтальпия?

9. Увеличение энтальпии системы при изобарном процессе идет только за счет _____.
10. Термодинамический потенциал Гиббса в дифференциальной форме определяется соотношением _____.

ТЕСТ№2

1. Какое начало ТД указывает на возможные направления протекания процессов?
2. Создание какого двигателя невозможно в соответствии с формулировкой первого начала ТД?
3. Величина равная отношению тепла, отбираемого за цикл у менее нагретого тела к работе, совершаемой над холодильной машиной извне, называется _____.
4. Чему равно КПД в случае обратимого процесса?
5. Как ведет себя энтропия при обратимом процессе?
6. Что представляет собой цикл Карно?
7. Какая связь между площадью цикла и работой?
8. Функцией каких термодинамических параметров является свободная энергия?
9. При каких условиях свободная энергия может иметь минимальное значение?
10. Внутренняя энергия в дифференциальной форме имеет вид _____.

ТЕСТ№3

1. Первый закон термодинамики показывает, что все количество теплоты, переданное системе, идет _____.
2. Запишите первое начало в интегральной форме.
3. При каком процессе общее изменение внутренней энергии системы равно нулю?
4. В каком состоянии энтропия больше равновесном или неравновесном? Почему?
5. Коэффициент полезного действия тепловой машины равен _____.
6. Какие тепловые резервуары необходимы для работы тепловой машины?
7. Приведите формулировку Кельвина для второго начала ТД.
8. При каких условиях энергия Гиббса будет иметь минимальное значение?
9. Функцией каких термодинамических параметров является энергия Гиббса?
10. Энтальпия (тепловая энергия) в дифференциальной форме определяется соотношением _____.

ТЕСТ№4

1. Чему равна работа идеальной тепловой машины?
2. Чем отличается цикл идеальной тепловой и идеальной холодильной машины?
3. Может ли тепловая машина все переданное системе количество теплоты потратить на совершение полезной работы в процессе рабочего цикла? Почему?
4. Сформулируйте теорему Карно.
5. Приведите статистическую формулировку второго начала термодинамики.
6. Что называют приведенным теплом в ТД
7. Какой процесс называют обратимым?
8. С каким процессом связан цикл Карно?
9. Функцией каких термодинамических параметров является внутренняя энергия?
10. При изохорном процессе внутренняя энергия ТД системы увеличивается только за счет _____.

Примеры заданий с решениями по теме

Задание №1. Один моль идеального газа, теплоемкость которого при постоянном давлении равна C_p , совершает процесс по закону: $T = T_0 + \alpha V$, где T_0, α - постоянные. Найти теплоемкость газа как функцию его объема и сообщенное газу тепло при его расширении от V_1 до V_2 .

Решение:

Используем дифференциальную форму первого начала термодинамики:

$$dQ = dW + dA \quad (1)$$

Возьмем производную от обеих частей по температуре:

$$\frac{dQ}{dT} = \frac{dW}{dT} + \frac{dA}{dT} \quad (2)$$

Выражения в дифференциальной форме для работы, внутренней энергии и количество теплоты имеют вид:

$$dA = PdV \quad (3)$$

$$dW = \nu \cdot C_v \cdot dT \quad (4)$$

$$dQ = \nu \cdot C \cdot dT \quad (5)$$

Подставим (3) – (5) в (2) и получим:

$$\nu \cdot C = \nu \cdot C_v + \frac{PdV}{dT} \quad (6)$$

$$C = C_v + \frac{PdV}{\nu dT} \quad (7)$$

В соответствии с уравнением Майера:

$$C_p = C_v + R \quad (8)$$

$$C = C_p - R + \frac{PdV}{\nu dT} \quad (9)$$

Возьмем дифференциалы от обеих частей уравнения процесса:

$$dT = d(T_0 + \alpha V) = \alpha \cdot dV \quad (10)$$

В соответствии с уравнением состояния идеального газа:

$$P = \frac{\nu RT}{V} = \frac{\nu R(T_0 + \alpha V)}{V} = \frac{\nu RT_0}{V} + \nu \alpha R \quad (11)$$

Подставляя (10) в (9), находим соотношение для искомой теплоемкости:

$$C = C_p - R + \frac{P}{\nu \alpha} = C_p - R + \frac{1}{\nu \alpha} \left(\frac{\nu RT_0}{V} + \nu \alpha R \right) = C_p - R + \frac{RT_0}{\alpha V} + R = C_p + \frac{RT_0}{\alpha V}$$

$$C = C_p + \frac{RT_0}{\alpha V} \quad (12)$$

Для нахождения количества теплоты воспользуемся выражением (5) в интегральной форме:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} \nu \cdot C \cdot dT = \int_{V_1}^{V_2} \nu \alpha \cdot C \cdot dV \quad (13)$$

Подставим (12) в (13) и вычислим соответствующий интеграл:

$$Q = \nu \alpha \int_{V_1}^{V_2} \left(C_p + \frac{RT_0}{\alpha V} \right) dV = \nu \alpha \left[\int_{V_1}^{V_2} C_p dV + \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT_0}{\alpha V} dV \right] = \nu \alpha C_p (V_2 - V_1) + \nu RT_0 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Отсюда искомое количество теплоты для одного моля может быть найдено по соотношению:

$$Q = \alpha C_p (V_2 - V_1) + RT_0 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (14)$$

Ответ: $C = C_p + \frac{RT_0}{\alpha V}$; $Q = \alpha C_p (V_2 - V_1) + RT_0 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$.

Задание №2. Рабочее вещество совершает цикл, в пределах которого абсолютная температура изменяется в n раз. Соответствующий цикл показан на рисунке ниже, на плоскости (S, T) . Найти КПД цикла.

Решение:

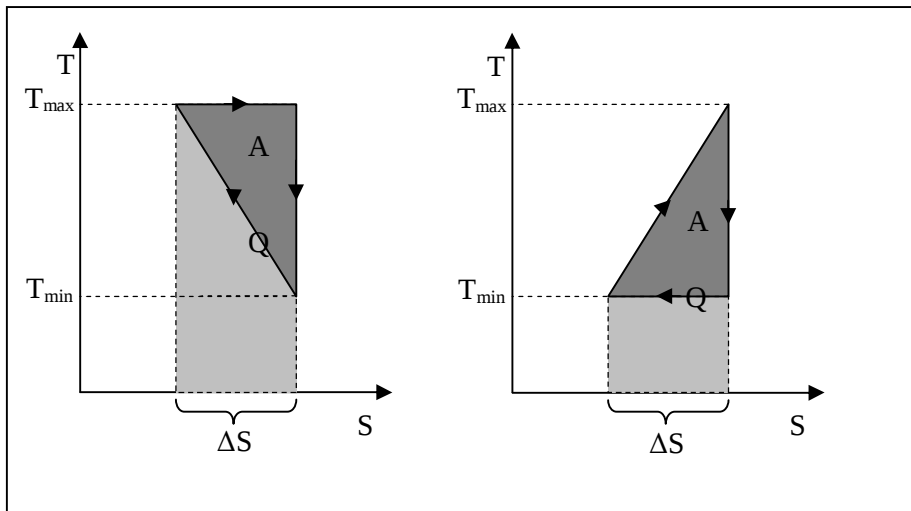


Рис. 3.

Данную задачу легко можно решить графически, используя представленные циклы. В первом цикле передача тепла осуществляется при изотермическом процессе. Причем полученное количество теплоты равно площади, ограниченной на рисунке изотермой. Этой изотерме соответствует максимальная температура. Следовательно, можно записать, что:

$$Q = T_{\max} \Delta S \quad (1)$$

Термодинамическая работа всегда равна площади ограниченной циклом. В нашем случае это площадь прямоугольного треугольника, которая равна:

$$A = \frac{1}{2} (T_{\max} - T_{\min}) \Delta S \quad (2)$$

КПД определяется следующим выражением:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{(T_{\max} - T_{\min}) \Delta S}{2 T_{\max} \Delta S} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \right) \quad (3)$$

Учитывая в (3), что по условию $T_{\max} = n T_{\min}$, получаем:

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{n} \right) = \frac{n-1}{2n} \quad (4)$$

Соотношение (4) определяет КПД первого заданного цикла.

Во втором цикле количество теплоты передается на участке, которому соответствует линейная зависимость температуры от энтропии. Этот участок является гипотенузой, образованной треугольником цикла. Количество тепла в

этом случае можно представить в виде суммы площади работы и площади, ограниченной изотермой соответствующе минимальной температуре:

$$Q = T_{\min} \Delta S + A = T_{\min} \Delta S + \frac{1}{2}(T_{\max} - T_{\min}) \Delta S = \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}) \Delta S \quad (5)$$

Так как треугольники изображенных циклов равные, то выражение для ТД работы будет таким как в соотношении (2). Подставляя (5) и (2) в соотношение (3) получаем:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{A}{T_{\min} \Delta S + A} = \frac{\frac{1}{2}(T_{\max} - T_{\min}) \Delta S}{\frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}) \Delta S} = \frac{n-1}{n+1} \quad (6)$$

Формула (6) задает искомое КПД для второго цикла задачи.

Ответ: КПД для первого цикла: $\eta = \frac{n-1}{2n}$, КПД для второго цикла: $\eta = \frac{n-1}{n+1}$.

Задание №3. Алюминиевый брусок массой $m = 3 \text{ кг}$ нагревают от $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 600 \text{ К}$. Найти приращение энтропии, если в этом интервале температур теплоемкость алюминия $c = a + bT$, где $a = 0.77 \text{ Дж/(г·К)}$, $b = 0.46 \text{ мДж/(г·К}^2\text{)}$.

Решение:

Для нахождения приращения энтропии, воспользуемся интегральной формой, которая выражает термодинамический смысл энтропии (тот факт, что в случае обратимого процесса ее можно считать приведенным теплом):

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

Используем определение удельной теплоемкости для нахождения в дифференциальной форме соотношения для количества теплоты в (1):

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad (2)$$

$$dQ = c \cdot m \cdot dT \quad (3)$$

Учитывая, что удельная теплоемкость по условию задачи зависит от температуры, которая изменяется в температурном диапазоне от $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 600 \text{ К}$, подставим (3) в (1):

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = m \int_{T_1}^{T_2} \frac{(a + bT)}{T} dT \quad (4)$$

Рассчитаем интеграл (4) и найдем окончательное выражение для приращения энтропии:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{(a + bT)}{T} dT = \int_{T_1}^{T_2} \frac{a}{T} dT + \int_{T_1}^{T_2} b dT = a \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + b(T_2 - T_1) \quad (5)$$

$$\Delta S = m \left[a \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + b(T_2 - T_1) \right] \quad (6)$$

Подстановка значений в (6) дает результат:

$$\Delta S = 2 \text{ кДж/К}$$

Ответ: $\Delta S = m \left[a \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + b(T_2 - T_1) \right] = 2 \text{ кДж/К}$

Статистическая физика

Справочный материал к тестированию по теме

В молекулярной физике существует два подхода, позволяющих охарактеризовать состояние системы: **термодинамический** и **статистический**. Состояние системы с точки зрения термодинамического подхода называется макроскопическим, а состояние с точки зрения статистического подхода микроскопическим.

Макроскопическое – это такое состояние, которое характеризует систему в общем и описывается такими параметрами как давление, температура и объем. **Микроскопическое** – это состояние, которое характеризует положение и скорость каждой частицы системы. Каждое микросостояние системы, состоящей из N частиц, задается $3N$ координатами (x, y, z) и $3N$ (v_x, v_y, v_z) их скоростями.

Между различными подходами существует связь, из которой следует, что должна существовать связь между макроскопическими и микроскопическими **состояниями** и **параметрами**. Связь между макро - и микропараметрами устанавливается в рамках молекулярно-кинетической теории (МКТ).

Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ):

1. Все физические тела состоят из молекул, молекулы из атомов. Атом в молекулярной физике рассматривается как неделимый. Современные приборы и устройства, имеющие большое разрешение (например, электронный микроскоп), позволяют видеть атомы и молекулы веществ размером порядка 10^{-10} м.

2. Все атомы и молекулы вещества могут, как взаимно притягиваться, так и взаимно отталкиваться. Силы отталкивания убывают с расстоянием быстрее, что обеспечивает устойчивость физических тел в природе. Силы отталкивания берутся с положительным знаком, силы притяжения – с отрицательным. **Результирующая сила** взаимодействия между молекулами на близких расстояниях является силой отталкивания, затем обращается в ноль и, при дальнейшем увеличении расстояния, является силой притяжения.

3. Все атомы и молекулы совершают хаотическое движение. Примером такого движения является броуновское движение. Причем, чем выше температура вещества, тем больше скорость хаотического движения молекул.

Зависимость скорости молекул газа от давления была найдена Клаузиусом и получила название **основного уравнения МКТ**. При установлении данной зависимости Клаузиус использовал **статистический подход**. Этот подход учитывал микроскопическую структуру вещества и особенности движения его молекул или атомов.

Соотношение между среднеквадратичной скоростью молекул и давлением показывает, что чем больше кинетическая энергия молекул газа, тем более интенсивно они взаимодействуют со стенками сосуда, то есть создают большее давление. Причем **зависимость** давления от кинетической энергии является **линейной** (прямопропорциональной).

Очень большую роль в статистической физике играет **функция распределения**. **Функция распределения** задает распределение атомов (молекул вещества) по какому либо **динамическому параметру** (физической величине).

Например, распределение по скоростям или высотам относительно поверхности Земли и т.д. Эти распределения позволяют рассчитать **вероятность** того или иного **состояния** или найти **средние значения физических величин**, которые являются функциями соответствующих динамических параметров. **Вероятность и средние значения** можно найти по общим соотношениям известным из теории вероятности и математической статистики.

Особый интерес в молекулярной статистике представляет **функция распределения Максвелла** - **функция распределения молекул газа**, находящегося в состоянии установившегося термодинамического равновесия, **по скоростям**. Молекулы газа в этом состоянии будут совершать хаотическое движение, и, поэтому, изменение проекций скорости будет произвольным и независимым в силу однородности и изотропности физического пространства. Распределение, которое в математической статистике соответствует таким свойствам пространства, является **распределением Гаусса**. Из формы этого распределения видно, что **с ростом температуры характерные скорости молекул увеличиваются, а высота кривой в максимуме уменьшается**. Характерными скоростями распределения называют среднюю, среднеквадратичную и наиболее вероятную скорости молекул.

Наиболее вероятная скорость молекул соответствует максимальному значению функции распределения и рассчитывается из условия экстремума функции:

Средняя и среднеквадратичная скорость рассчитываются из соотношений для соответствующих средних величин.

Все **характерные скорости** пропорциональны **корню квадратному от температуры газа**, то есть микроскопические характеристики молекул газа связаны с его макроскопическими характеристиками.

Еще одним важным распределением в статистической физике является **распределение Больцмана**. Оно описывает **распределение молекул по энергиям** в потенциальном поле внешних сил в условиях термодинамического равновесия. Таким полем в основном является поле связанное с действием сил тяготения. **Чем ниже температура, тем более резким оказывается распределение молекул газа по высоте, то есть тем быстрее убывает число молекул с высотой. Чем меньше масса молекул газа, тем это убывание является более плавным с высотой.**

Рассмотренные выше распределения называют **классическими** и применяют для описания систем с **большим числом частиц, которые обладают выраженными отличительными признаками**. В этом случае два микросостояния образованные заменой местами двух любых частиц будут различаться. Данные распределения подтверждены экспериментально в опытах Перрена (распределение Больцмана), Штерна, Ламмерта (распределение Максвелла). Распределения Максвелла и Больцмана объединяются в **единое распределение Максвелла – Больцмана**. Так как скорости и координаты частиц независимы распределение Максвелла - Больцмана можно получить путем перемножения соответствующих функций распределения частиц по скоростям и в поле потенциальных сил.

На самом деле **в природе невозможно отличить одну микрочастицу от другой**, так как в квантовой теории действует **принцип тождественности**. В этом случае замена одной частицы на другую не должна приводить к изменению микросостояния. Модели, в которых частицы рассматриваются как неразличимые,

называются моделями Бозе-Эйнштейна и Ферми – Дирака. Эти модели различаются по отношению к поведению частиц в отношении микросостояний. Если в данном состоянии может находиться только одна частица то его можно описать с помощью статистики Ферми-Дирака, а если в некотором состоянии одновременно находится много частиц – то его описывает статистика Бозе-Эйнштейна. В соответствии с принципом Паули частицы с полуцелым спином описываются статистикой Ферми – Дирака, а с целым – статистикой Бозе-Эйнштейна. Отсюда следует, что нет реальных частиц, подчиняющихся статистике Максвелла – Больцмана, однако она, как показывает опыт, во многих случаях правильно описывает их поведение. Формулы **квантовых статистик** сводятся к **классической** в том случае, когда **число доступных для частиц состояний значительно больше, чем число частиц, которые могли бы занять эти состояния.**

В квантовой статистике в отличие от классической энергия частицы характеризуется **дискретным спектром** (квантована), а не непрерывным, а **состояние частицы** характеризуется **набором квантовых чисел**, соответствующих определенной энергии E_i , где i - соответствующий набор.

Всякому **макросостоянию** системы может соответствовать некоторое число **микросостояний** из всех возможных. Число различных микросостояний, соответствующих данному макросостоянию называют **статистическим весом** или **термодинамической вероятностью макросостояния** Ω . Она равна отношению числа микросостояний относящихся к определенному макросостоянию к общему числу возможных микросостояний ТД системы.

Наиболее вероятными при этом оказываются **равновесные макросостояния**, которые не имеют тенденции к изменению с течением времени. Вероятность состояния пропорциональна его статистическому весу. Поэтому равновесное состояние изолированной системы можно определить как состояние, **статистический вес** которого **максимален**. Задача статистической физики состоит в определении или числа данных микросостояний или вероятности макросостояния без подсчета числа микросостояний.

Кроме термодинамического смысла, **энтропия** имеет и **статистический смысл**. Она связана с **вероятностью равновесного состояния системы**. Чем ближе система к такому состоянию, тем больше ее энтропия. Это связано с тем, что в равновесном состоянии элементы системы движутся хаотически, а **энтропия** есть **мера хаоса системы**. В отличие от статистического веса, через который энтропия выражается, она является величиной **аддитивной**. Поэтому **энтропия ТД системы равна алгебраической сумме энтропий отдельных ее частей** (подсистем).

Свойства энтропии связаны со свойствами статистического веса:

1. При протекании необратимого процесса в ТД системе ее **энтропия может только возрастать.**

2. **Энтропия ТД системы в равновесном состоянии максимальна.**

Первое свойство называют **законом возрастания энтропии** или **вторым началом термодинамики**.

При абсолютном нуле тело находится в основном состоянии, статистический вес которого равен единице. В этом случае энтропия оказывается равной нулю. Отсюда вытекает, что **энтропия всякого тела стремится к нулю при**

стремлении к нулю температуры. Это утверждение называют **теоремой Нернста** и в некоторой литературе **третьим началом термодинамики**.

Основные соотношения:

Основное уравнение МКТ

$$p = \frac{2}{3} n \bar{W} \quad (1)$$

где $\bar{W}$ - средняя кинетическая энергия молекул, n - число молекул в единице объема $n = \frac{N}{V}$, p - давление газа.

Средняя кинетическая энергия молекулы

$$\bar{W} = \frac{m \bar{u}^2}{2} \quad (2)$$

где $\bar{u}$ - среднеквадратичная скорость молекул, m - их масса

Связь между p и $\bar{u}$

$$p = \frac{1}{3} n m \bar{u}^2 \quad (3)$$

Плотность вероятности распределения Максвелла по скоростям

в ПДСК

$$f(v_x, v_y, v_z) = \left[m / (2\pi kT) \right]^{3/2} \exp \left(- m [v_x^2 + v_y^2 + v_z^2] / 2kT \right) \quad (4)$$

в ССК

$$f(v) = 4\pi \left[m / (2\pi kT) \right]^{3/2} v^2 \exp \left(- m v^2 / 2kT \right) \quad (5)$$

где T - температура газа, m - масса молекулы газа, k - постоянная Больцмана.

Распределение молекул газа по скоростям

$$\text{(распределение Максвелла)} \quad dN_v = 4\pi N \left[m / (2\pi kT) \right]^{3/2} v^2 \exp \left(- m v^2 / 2kT \right) dv \quad (6)$$

Распределение молекул газа по кинетическим энергиям поступательного движения

$$\text{(распределение Максвелла)} \quad dN_\varepsilon = N \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right] [kT]^{-3/2} \exp(-\varepsilon / kT) \sqrt{\varepsilon} d\varepsilon \quad (7)$$

Плотность вероятности распределения Максвелла

по кинетическим энергиям

$$f(\varepsilon) = \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right] [kT]^{-3/2} \exp(-\varepsilon / kT) \sqrt{\varepsilon} \quad (8)$$

где ε - кинетическая энергия поступательного движения

Характерные скорости молекул газа

Наиболее вероятная

$$v_B = \sqrt{2kT/m} \quad (9)$$

Средняя

$$\langle v \rangle = \sqrt{8kT/\pi m} \quad (10)$$

Среднеквадратичная

$$\langle v^2 \rangle = 3kT/m \quad (11)$$

Распределение Больцмана

в поле потенциальных сил

$$dN(x, y, z) = n_0 \exp(-E_n(x, y, z)/kT) dx dy dz \quad (12)$$

где n_0 - плотность молекул в том месте, где их потенциальная энергия равна нулю

Распределение Больцмана

в поле сил тяготения

$$dN(h) = n_0 \exp(-mgh/kT) dh \quad (13)$$

где n_0 - концентрация молекул на высоте h .

Классическое распределение Максвелла – Больцмана:

$$dN = n_0 \left[m / (2\pi kT) \right]^{3/2} \exp \left(- \frac{mv^2 + E_n}{kT} \right) dv_x dv_y dv_z dx dy dz \quad (14)$$

где $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$

Распределение **Ферми – Дирака**

$$\frac{n_i}{g_i} = \frac{1}{\exp(\alpha + \beta E_i) + 1} \quad (15)$$

Распределение **Бозе - Эйнштейна**:

$$\frac{n_i}{g_i} = \frac{1}{\exp(\alpha + \beta E_i) - 1} \quad (16)$$

где n_i/g_i - число частиц, приходящихся на одно состояние с энергией E_i , n_i - число неразличимых частиц в i -м состоянии, g_i - число ячеек, по которым могут быть распределены частицы в состоянии с энергией E_i , α - параметр, зависящий от вида E_i и определяемый из условия сохранения числа частиц, $\beta = \frac{1}{kT}$.

Статистический смысл энтропии (определение)

$$S = k \ln \Omega \quad (17)$$

Свойство аддитивности энтропии

$$S = \sum_{i=1}^N S_i \quad (18)$$

Закон возрастания энтропии

$$dS > 0 \quad (19)$$

Связь изменения энтропии с количеством переданного тепла:

для **обратимого** процесса

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (20)$$

для **необратимого** процесса

$$dS > \frac{dQ}{T} \quad (21)$$

Теорема Нернста

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 \quad (22)$$

Варианты тестов промежуточного контроля по теме

ТЕСТ №1

1. В чем состоит статистический подход в молекулярной физике?
2. Состояние, которое характеризует систему в общем и описывается такими параметрами как давление, температура и объем называется _____.
3. Почему силы отталкивания между молекулами убывают быстрее, чем силы притяжения?
4. Сформулируйте третье положение МКТ.
5. Чему равна средняя кинетическая энергия молекулы?
6. Какие параметры связывает основное уравнение МКТ?
7. Приведите соотношение, описывающее распределение молекул по скоростям.
8. Какие скорости называют характерными для распределения Максвелла?
9. Число различных микросостояний, соответствующих данному макросостоянию называют _____.
10. Запишите формулу, выражающее статистическое определение (смысл) энтропии.

ТЕСТ №2

1. Какое состояние называют микроскопическим?
2. Сформулируйте первое положение МКТ.

3. Приведите формулу, связывающую давление газа со среднеквадратичной скоростью его молекул.
4. Наиболее вероятная скорость молекул соответствует _____ и рассчитывается _____.
5. Из формы распределения Максвелла видно, что с ростом температуры характерные скорости молекул _____, а высота кривой в максимуме _____.
6. Наиболее вероятная скорость определяется по формуле _____.
7. Средняя скорость находится из соотношения _____.
8. В каком состоянии системы статистический вес является максимальным?
9. Запишите соотношение для распределения Больцмана.
10. Приведите формулу, которая соответствует свойству аддитивности энтропии.

ТЕСТ№3

1. Состояние, которое характеризует положение и скорость каждой частицы системы называется _____.
2. В чем суть второго положения МКТ.
3. На основании какого подхода в молекулярной физике Клаузиус установил зависимость давления от средней кинетической энергии газа?
4. Приведите соотношение, связывающее давление и среднеквадратичную скорость.
5. При каком условии квантовые статистики сводятся к классической?
6. Приведите распределение Больцмана для произвольного поля потенциальных сил.
7. Чему равна средняя скорость в соответствии с распределением Максвелла?
8. Сформулируйте два основных свойства энтропии.
9. Что происходит с энтропией при стремлении температуры к абсолютному нулю?
10. Какой должен быть спин у частиц, подчиняющихся статистике Ферми - Дирака?

ТЕСТ№4

1. Какое состояние называется макроскопическим?
2. Как связана скорость хаотического движения молекул с температурой?
3. Соотношение между среднеквадратичной скоростью молекул и давлением показывает, что чем больше кинетическая энергия молекул газа, тем _____.
4. Приведите функцию распределения Максвелла по кинетическим энергиям.
5. Как найти наиболее вероятную скорость с помощью функции распределения Максвелла?
6. Какой вид имеет функция распределения Больцмана в поле сил тяготения?
7. Что такое энтропия?
8. При абсолютном нуле тело находится в основном состоянии, статистический вес которого _____.
9. В чем выражается свойство аддитивности энтропии?
10. Какой должен быть спин у частиц, подчиняющихся статистике Бозе – Эйнштейна?

Примеры заданий с решениями по теме

Задание №1. Во сколько раз надо расширить адиабатически газ, состоящий из жестких двухатомных молекул, чтобы их средняя квадратичная скорость уменьшилась в $\eta = 1.5$ раза.

Решение:

Из распределения Максвелла следует, что средняя квадратичная скорость молекул зависит от температуры газа. Поэтому уравнение адиабаты следует рассматривать относительно плоскости (Т,V) для двух заданных состояний:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \quad (1)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \quad (2)$$

Среднеквадратичная скорость молекул связана с температурой газа по формуле:

$$\langle v^2 \rangle = 3kT/m \quad (3)$$

По условию средняя квадратичная скорость в процессе расширения уменьшилась в η раз:

$$\eta^2 = \frac{\langle v_1^2 \rangle}{\langle v_2^2 \rangle} = \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \quad (4)$$

Искомое отношение объемов обозначим как:

$$\frac{V_2}{V_1} = \alpha \quad (5)$$

Преобразуем (4) с учетом (5):

$$\eta^2 = \alpha^{\gamma-1} \quad (6)$$

Выразим α из соотношения (6) и получим искомую величину (во сколько раз расширится газ при адиабатическом процессе):

$$\alpha = \eta^{\frac{2}{\gamma-1}} \quad (7)$$

Величина γ в (7) является коэффициентом Пуассона, который связан с числом степеней свободы газа i по формуле:

$$\gamma = \frac{i+2}{i} \quad (8)$$

Показатель степени в (7) преобразуем с помощью соотношения (8):

$$\frac{2}{\gamma-1} = \frac{2}{\frac{i+2}{i} - 1} = i \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), получаем:

$$\alpha = \eta^i \quad (10)$$

Число степеней свободы двухатомного газа с жесткой связью молекул равно пяти и учитывает только три поступательные степени и две вращательные. Находим α , используя данные задачи:

$$\alpha = 1.5^5 \approx 7.6 \text{ раза.}$$

Ответ: В $\alpha = \eta^i \approx 7.6$ раза расширится газ.

Задание №2. Смесь водорода и гелия находится при температуре $T = 300$ К. При каком значении скорости v молекул значения функций распределения Максвелла будут одинаковыми для обоих газов.

Решение:

Запишем функции распределения Максвелла для каждого элемента смеси, учитывая условие задачи о равенстве температур, а, следовательно, и скоростей молекул элементов смесей. При этом их молярные массы различны.

$$f_i(v) = 4\pi [m_i / (2\pi kT)]^{3/2} v^2 \exp(-m_i v^2 / 2kT) \quad (1)$$

где $i = 1, 2$ - номер элемента смеси.

Масса молекулы связана с молярной массой по формуле:

$$m_i = \frac{M_i}{N_A} \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем:

$$f_i(v) = 4\pi [M_i / (2\pi N_A kT)]^{3/2} v^2 \exp(-M_i v^2 / 2N_A kT) \quad (3)$$

По условию задачи функции распределения должны быть одинаковыми:

$$f_1(v) = f_2(v) \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), находим:

$$M_1^{3/2} \exp(-M_1 v^2 / 2N_A kT) = M_2^{3/2} \exp(-M_2 v^2 / 2N_A kT) \quad (4)$$

Отсюда:

$$\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^{\frac{3}{2}} = \exp\left(\frac{v^2}{2N_A kT}(M_1 - M_2)\right) \quad (6)$$

Возьмем натуральный логарифм от обеих частей соотношения (6):

$$\frac{3}{2} \ln\left(\frac{M_1}{M_2}\right) = \frac{v^2}{2N_A kT}(M_1 - M_2) = \frac{v^2}{2RT}(M_1 - M_2) \quad (7)$$

где $R = kN_A$ - универсальная газовая постоянная

Выразим из (7) искомую скорость:

$$v = \sqrt{\frac{3RT \ln(M_1/M_2)}{M_1 - M_2}} \quad (8)$$

Подставляя значения молярных масс элементов смеси из таблицы Менделеева и температуру, находим численное значение скорости:

$$v = 1.61 \text{ км/с}$$

Ответ: $v = \sqrt{\frac{3RT \ln(M_1/M_2)}{M_1 - M_2}} = 1.61 \text{ км/с}.$

Задание №3. Потенциальная энергия молекул газа в некотором центральном поле зависит от расстояния r до центра поля как $U(r) = \alpha r^2$, где α - положительная постоянная. Температура газа T , концентрация молекул в центре поля n_0 . Найти: 1) число молекул, находящихся в интервале расстояний $(r, r + dr)$; 2) наиболее вероятное расстояние молекул от центра поля; 3) относительное число всех молекул в слое $(r, r + dr)$.

Решение:

Для решения задачи используем распределение Больцмана, задающее число молекул, находящихся в интервале расстояний $(r, r + dr)$, для поля потенциальных сил:

$$dN(x, y, z) = n_0 \exp(-E_n(x, y, z)/kT) dx dy dz \quad (1)$$

В нашем случае они являются центральными, поэтому удобно перейти от пространственной декартовой системы координат к сферической, учитывая, что потенциальная энергия не зависит от углов этой системы:

$$dx dy dz \rightarrow 4\pi r^2 dr \quad (2)$$

Подставляя замену (2) и выражение для потенциальной энергии рассматриваемого поля в (1), получаем:

$$dN(r) = 4\pi n_0 \exp(-\alpha r^2/kT) r^2 dr \quad (3)$$

где n_0 заданная концентрация в центре рассматриваемого поля.

Плотность вероятности этого распределения определяется из сравнения (3) со следующим математическим определением:

$$dN(r) = f(r) dr \quad (4)$$

$$f(r) = 4\pi n_0 \exp(-\alpha r^2/kT) r^2 \quad (5)$$

Наиболее вероятное расстояние молекул от центра поля может быть найдено из условия экстремума этой функции:

$$\frac{df}{dr} = 4\pi 2r n_0 \left(1 - \frac{\alpha}{kT} r^2\right) \exp(-\alpha r^2/kT) = 0 \quad (6)$$

Так в нуль может обращаться только выражение в скобках, получаем искомое значение:

$$1 = \frac{\alpha}{kT} r_s^2 \Rightarrow r_s = \sqrt{\frac{kT}{\alpha}} \quad (7)$$

Для того, чтобы найти относительное число всех молекул в слое $(r, r + dr)$, необходимо найти полное число молекул в пространстве и выразить отношение: dN/N , где dN определяется соотношением (3) данной задачи.

Полное число молекул для данного распределения можно рассчитать, проинтегрировав (3):

$$N(r) = 4\pi n_0 \int_0^{\infty} \exp(-\alpha r^2/kT) r^2 dr \quad (8)$$

Возьмем отдельно данный интеграл, сделав замену $y = \sqrt{\frac{\alpha}{kT}} \cdot r$,

$$dy = \sqrt{\frac{\alpha}{kT}} \cdot dr :$$

$$I = \int_0^{\infty} \exp(-\alpha r^2/kT) r^2 dr = \left(\frac{kT}{\alpha}\right)^{3/2} \int_0^{\infty} \exp(-y^2) y^2 dy \quad (9)$$

Интеграл в (9) табличный и равен:

$$\int_0^{\infty} \exp(-y^2) y^2 dy = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9), а затем (9) в (8), получаем:

$$N(r) = n_0 \left(\pi \frac{kT}{\alpha} \right)^{3/2} \quad (11)$$

Далее находим относительное число всех молекул в слое $(r, r + dr)$ как отношение dN/N , разделив (3) на (10):

$$\frac{dN}{N} = 4 \left(\frac{\alpha^3}{\pi k^3 T^3} \right)^{1/2} \exp(-\alpha r^2 / kT) r^2 dr \quad (12).$$

Ответ: 1) $dN(r) = 4\pi n_0 \exp(-\alpha r^2 / kT) r^2 dr$; 2) $r_g = \sqrt{\frac{kT}{\alpha}}$;

$$3) \frac{dN}{N} = 4 \left(\frac{\alpha^3}{\pi k^3 T^3} \right)^{1/2} \exp(-\alpha r^2 / kT) r^2 dr.$$

Фазовые превращения

Справочный материал к тестированию по теме

Фазой называют совокупность однородных и одинаковых по свойствам в бесконечно малом объеме физического пространства частей термодинамической системы. Например, фазой можно считать то или иное агрегатное состояние вещества или одну из его модификаций, возникающую при кристаллизации. Состояния, в которых с точки зрения термодинамики, может находиться каждое вещество, изображаются в виде **фазовой диаграммы**. **Фазовая диаграмма** вещества – это система кривых и образованных ими областей на плоскости термодинамических параметров (P, T) . Вид этой диаграммы зависит существенным образом от рода вещества и строится на основании экспериментальных данных. Однако для любого вещества на этой плоскости всегда можно выделить три основные области, выделенные кривыми на плоскости и соответствующие трем основным агрегатным состояниям: газообразному, жидкому, твердому. Газообразная фаза вещества имеет место при высоких температурах и низких давлениях, твердая фаза – при высоких давлениях и низких температурах, а жидкая фаза между ними. Кривые разграничивающие соответствующие области, соответствуют кривым перехода вещества из одного состояния в другое. Они называются **кривыми фазовых переходов (превращений)**. Одна кривая соответствует превращению вещества из газообразного состояния в жидкое состояние и наоборот (процессы испарения, кипения и конденсации), другая – соответствует переходу из жидкого состояния в твердое и наоборот (процессы плавления и кристаллизации); третья – соответствует превращению твердого вещества в газообразное (сублимация). Если состояние системы соответствует точке на фазовой кривой, то вещество находится в двух фазовых (агрегатных) состояниях находящихся в равновесии. Точка D – тройная точка, которая соответствует наличию в системе вещества сразу в трех агрегатных состояниях (фазах) в равновесии. Состояния с одновременным присутствием более трех фаз невозможны.

Выделяют фазовые переходы двух родов: первого и второго. **Фазовым переходом I рода** называют переход, при котором поглощается или выделяется энергия в виде тепла (скрытой теплоты перехода) и изменяется агрегатное

состояние вещества. **Фазовыми переходами II рода** называют переходы, при которых не происходит выделения или поглощения тепла, а вещество переходит из одной кристаллической модификации в другую, не меняя своего агрегатного состояния.

Кривой, разграничивающей газообразное и жидкое состояние, соответствуют процессы испарения, кипения и конденсации. **Испарение** – это процесс перехода наиболее быстрых молекул с поверхности жидкости в газообразное состояние. Этот процесс происходит при любых температурах. При этом выделяется энергия в виде тепла, а температура жидкости и ее внутренняя энергия понижаются. **Кипение** – это тоже процесс перехода молекул жидкости в газообразное состояние. Однако он происходит при определенной температуре (температуре кипения) и не только с поверхностных слоев жидкости, но и с объема, за счет наличия в любой жидкости газовых пузырьков, которые при некоторой температуре начинают, интенсивно расширяясь, подниматься на поверхность и там разрываться. **Конденсация** – это процесс обратный испарению. Он заключается в том, что при любой температуре наиболее медленные частицы газа переходят в жидкое состояние. При этом средняя энергия газа и температура повышаются, а тепло поглощается. При протекании данных процессов между жидкостью и ее паром может установиться равновесие. Это происходит при достижении определенного давления, при котором количество молекул покидающих жидкость будет равно количеству молекул, возвращающихся в нее. Равновесие между жидкостью и паром будет существовать до тех пор, пока не изменится объем или температура системы. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным**. Давление, при котором наблюдается равновесие, называется **давлением насыщенного пара**.

Процессы **плавления** и **кристаллизации** связаны с кривой перехода, разграничивающей жидкую и твердую фазу. **Плавление** – есть переход вещества из твердого в жидкое состояние при определенных значениях температуры – **температуры плавления** и давления. При этом для осуществления этого перехода требуется затрата определенного количества тепла – **теплоты плавления**. Процесс плавления протекает следующим образом. Веществу в твердом состоянии передается тепло, приводящее к его разогреву (повышению температуры). Затем оно, при некоторой температуре в зависимости от давления в веществе, начинает плавиться. При этом температура вещества не меняется. Далее температура вещества уже в жидкой фазе продолжает увеличиваться. **Кристаллизация** – это процесс обратный плавлению. Он также протекает при определенной температуре – **температуре кристаллизации**, соответствующей некоторому давлению на кривой фазового перехода. При осуществлении этого процесса тепло, наоборот, отнимается от вещества. При этом его температура постепенно понижается до определенного значения – **температуры кристаллизации**. Далее, **центры кристаллизации**, имеющиеся в веществе, начинают расти при неизменной температуре до тех пор, пока вещество не перейдет в твердое состояние. Затем, температура будет продолжать падать.

Кривой, разграничивающей твердое и газообразное состояние вещества, соответствует процесс сублимации (возгонки). **Сублимация** – это процесс перехода вещества из твердой фазы в газообразное состояние при определенной температуре и соответствующем ей давлении за счет того, что поверхность тела

покидают наиболее быстрые молекулы, вследствие чего вещество охлаждается, а средняя энергия оставшихся в нем молекул уменьшается.

В пределах модели идеального газа невозможно учесть взаимодействие молекул газа и наличие у них геометрических размеров. Поэтому, чтобы описать переход вещества из газообразного в жидкое состояние, необходимо учесть взаимодействие молекул газа и их размеры. Это приведет к изменению вида уравнения, описывающего состояние идеального газа.

Чтобы совершить переход от уравнения Менделеева – Клапейрона к **уравнению Ван – дер – Ваальса для реального газа** нужно учесть следующие моменты и ввести соответствующие поправки. В уравнении реального газа **объем**, предоставленный для свободного перемещения частиц, меньше чем в случае идеального, так как учитываются размеры молекул и, следовательно, занимаемый ими объем b' . **Давление** же оказывается большим за счет учета давления, создаваемого вследствие взаимодействия молекул друг с другом. Это давление обратно пропорционально квадрату объема ($\frac{a'}{V^2}$). Внутренняя энергия реального

газа, в отличие от идеального, должна содержать слагаемое, описывающее взаимодействие молекул (их потенциальную энергию). **Потенциальная энергия реального газа** зависит от объема, занимаемого этим газом. Учет потенциальной энергии взаимодействия молекул приводит к уменьшению внутренней энергии газа. Внутренняя энергия реального газа зависит не только от температуры, но и от его объема.

Уравнение Ван – дер – Ваальса является кубическим по объему. Кривые, соответствующие на плоскости (P, V) этому уравнению, называют **изотермами Ван – дер – Ваальса**. Эксперименты показывают, что вместо характерного S – образного участка изотермы Ван – дер – Ваальса имеет место **горизонтальный участок (плато)**, соответствующий некоторому постоянному значению давления (это давление насыщенного пара) при фиксированной температуре. Причем, **каждой температуре соответствует свое значение давления насыщенного пара**. С ростом температуры значение насыщенного пара растет, а размер горизонтального участка уменьшается. При критической температуре плато вырождается в точку (точку перегиба изотермы). Причем, с приближением к этой температуре, различие в плотностях жидкости и насыщенного пара уменьшается, а в самой точке они оказываются равными, то есть исчезает различие между жидкостью и паром в целом. При температуре выше некоторой критической газ ведет себя как идеальный и не меняет своего агрегатного состояния. В этом случае его изотерма, соответствует изотерме идеального газа.

В области горизонтального участка (плато) изотермы жидкость и ее **насыщенный пар находятся в равновесии**. Этот результат является общим для всех двухфазных состояний. Концы этого участка отвечают объемам V_1 и V_2 , занимаемым веществом в первой и второй фазе. **Отношение масс вещества** в первой и второй фазе, соответствующего двухфазного состояния равно отношению отрезков, на которые делит горизонтальный участок изотермы точка, изображающая состояние.

Уравнение Клапейрона – Клаузиуса устанавливает зависимость равновесного давления (давления насыщенного пара) от температуры системы.

Оно показывает, что производная равновесного давления по температуре $\frac{dP}{dT}$ прямо пропорциональна скрытой теплоте перехода q_{12} и обратно пропорциональна температуре T и разности удельных объемов фаз, находящихся в равновесии $V_2' - V_1'$. Знак производной $\frac{dP}{dT}$ зависит от того какое изменение объема происходит при фазовом переходе, сопровождающимся поглощением тепла. При возрастании объема $\frac{dP}{dT} > 0$, а при уменьшении $\frac{dP}{dT} < 0$.

Температура перехода из одной кристаллической модификации в другую будет повышаться или понижаться с ростом давления в зависимости от того, какая из твердых фаз обладает большим удельным объемом.

Некоторые состояния соответствующие S – образному участку также можно получить на опыте. Однако они будут являться **метастабильными** (неустойчивыми). Даже слабое воздействие на такое состояние приводит к его переходу в более устойчивое, лежащее на соответствующем плато изотермы. Средняя часть S – образного участка нереализуема в природе. Краевые части соответствуют перегретой жидкости и пересыщенному пару.

У **пересыщенного пара давление больше**, чем у насыщенного пара при той же температуре. **Пересыщенный пар** можно получить с помощью резкого адиабатического расширения непересыщенного пара. При этом пар охладиться и состояние газа будет соответствовать изотерме лежащей ниже (то есть с меньшей температурой), а давление слабо измениться и окажется большим, чем давление насыщенного пара, соответствующего этой изотерме.

Давление у **перегретой жидкости** оказывается меньшим, чем давление насыщенного пара соответствующего рассматриваемой изотерме. Для того, чтобы перевести жидкость в перегретое состояние, необходимо ее тщательно очистить от неоднородностей в виде твердых включений и растворенных в ней газов и, путем нагревания, не доводя до кипения, перевести ее в состояние с меньшим давлением по отношению к давлению насыщенного пара при данной температуре.

При достаточно низких температурах изотерма Ван – дер – Ваальса может пересекать ось объема и опускаться в область отрицательных давлений. При отрицательных давлениях вещество будет находиться в очень растянутом состоянии. **Жидкость** в таком состоянии называется **растянутой**.

Основные соотношения:

Уравнение Ван – дер – Ваальса (реального газа)
$$\left(P + \frac{a'}{V^2}\right)(V - b') = \nu RT \quad (1)$$

Уравнение Ван – дер – Ваальса для одного моля
$$\left(P + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad (2)$$

где $V = \nu V_m$ - объем, занимаемый идеальным газом, V_m - объем одного моля идеального газа, ν - число молей газа, а коэффициенты связаны соотношениями:
 $a' = \nu^2 a$, $b' = \nu b$

Энергия взаимодействия между молекулами

одного моля газа
$$E_p = -\frac{a}{V_m} \quad (3)$$

ν молей газа

$$E_p = -\frac{a'}{V^2} \quad (4)$$

Внутренняя энергия реального газа

одного моля газа

$$W_m = C_V T - \frac{a}{V_m^2} \quad (5)$$

ν молей газа

$$W = \nu C_V T - \frac{a'}{V^2} \quad (6)$$

Отношение масс различных фаз вещества

в двухфазном равновесном состоянии

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{V_1 - V}{V - V_2} \quad (7)$$

Уравнение Клапейрона - Клаузиуса

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q_{12}}{T(V'_2 - V'_1)} \quad (8)$$

Варианты тестов промежуточного контроля по теме

ТЕСТ №1

1. Совокупность однородных и одинаковых по свойствам частей термодинамической системы называется _____.
2. Чем реальный газ отличается от идеального?
3. Какие процессы разграничиваются кривой фазового перехода, разделяющей газообразную и жидкую фазы?
4. Что представляет процесс испарения
5. Фазовый переход, при котором поглощается или выделяется энергия в виде тепла и изменяется агрегатное состояние вещества, называется _____.
6. Напишите уравнение Клапейрона – Клаузиуса.
7. Как называются неустойчивые состояния вещества?
8. Какое состояние называют растянутой жидкостью?
9. Как можно получить пересыщенный пар.
10. Знак производной $\frac{dP}{dT}$ зависит от того _____.

ТЕСТ №2

1. Что называют фазой вещества?
2. Что представляет фазовый переход второго рода?
3. Переход вещества из твердого в жидкое состояние при определенных значениях температуры и давления называется _____.
4. Уравнение Ван – дер – Ваальса для одного моля вещества имеет вид _____.
5. Запишите энергию взаимодействия молекул для одного моля газа.
6. Чему равна внутренняя энергия ν молей реального газа?
7. На какой плоскости принято изображать фазовую диаграмму состояния вещества?
8. Какой пар называется пересыщенным?
9. Какой знак у $\frac{dP}{dT}$ при испарении жидкости?
10. Как называется процесс перехода из твердого состояния в газообразное?

ТЕСТ №3

1. Система кривых и образованных ими областей на плоскости термодинамических параметров (P, T) называется _____.
2. Фазовые переходы вещества из одной кристаллической модификации в другую, при которых не происходит выделения (поглощения) тепла называют _____.
3. Какие процессы разграничиваются кривой фазового перехода, разделяющей твердую и жидкую фазы?
4. Что называют конденсацией?
5. Чем процесс кипения отличается от испарения?
6. Чему равна внутренняя энергия одного моля реального газа?
7. Что такое тройная точка.
8. Чему равно отношение масс различных фаз вещества в двухфазном равновесном состоянии?
9. Как получить перегретую жидкость?
10. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется _____.

ТЕСТ №4

1. Что представляет фазовый переход первого рода?
2. Давлением насыщенного пара называют _____.
3. Кратко опишите процесс кристаллизации.
4. В каком состоянии и при какой температуре стираются различия между жидким и газообразным состоянием вещества?
5. Запишите уравнение Ван – дер – Ваальса для ν молей вещества.
6. Чем внутренняя энергия идеального газа отличается от внутренней энергии реального газа.
7. Какому участку изотермы реального газа соответствует равновесное двухфазное состояние?
8. Энтропия какого состояния больше: жидкого или газообразного?
9. Какой знак у $\frac{dP}{dT}$ при плавлении льда?
10. Какую жидкость называют перегретой?

Примеры заданий с решениями по теме

Задание №1. Пространство в цилиндре под поршнем, имеющее объем $V_0 = 5$ л, занимает один насыщенный водяной пар, температура которого $t = 100^\circ\text{C}$. Найти массу жидкой фазы, образовавшейся в результате изотермического уменьшения объема под поршнем до $V = 1.6$ л. Насыщенный пар считать идеальным газом.

Решение:

Так как насыщенный пар по условию задачи можно считать идеальным газом, то для его начального и конечного состояния можно записать соответствующие уравнения состояния идеального газа. При этом нужно учесть, что при изотермическом уменьшении объема, давление остается прежним, а объем уменьшается из-за конденсации некоторой части пара (то есть превращения пара в жидкость).

$$PV_0 = \frac{m}{M} RT \quad (1)$$

$$PV = \frac{(m - m_{жс})}{M} RT \quad (2)$$

Разделим правую и левую части уравнения (1) на соответствующие части уравнения (2) и получим:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{m - m_{жс}}{m} \quad (3)$$

$$Vm = V_0(m - m_{жс}) \quad (4)$$

Отсюда выразим искомую массу образовавшейся жидкости:

$$m_{жс} = m \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (5)$$

Начальную массу пара m можно выразит из уравнения состояния (1):

$$m = \frac{PV_0M}{RT} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), находим окончательный результат:

$$m_{жс} = \frac{PM}{RT} (V_0 - V) \quad (7)$$

Используя исходные данные из условия задачи (P - нормальное атмосферное давление равно 10^5 Па, а M - молярная масса воды), получаем численное значение для массы сконденсированной жидкости:

$$m_{жс} = 2 \text{ г}$$

Ответ: $m_{жс} = \frac{PM}{RT} (V_0 - V) = 2 \text{ г}$.

Задание №2. Вода массой $m = 20$ г находится при температуре 0°C в теплоизолированном вертикальном цилиндре под невесомым поршнем, площадь которого $S = 440 \text{ м}^2$. Внешнее давление равно нормальному атмосферному. На какую высоту поднимется поршень, если воде сообщить количество тепла $Q = 20 \text{ кДж}$.

Решение:

Поршень начнет подниматься за счет превращения ее в насыщенный пар при увеличении температуры воды. Причем затраченное тепло пойдет не только на ее нагревание, но и на превращение воды в насыщенный пар.

Уравнение состояния насыщенного пара можно задать с помощью уравнения идеального газа:

$$PV = \frac{m_x}{M} RT_K \quad (1)$$

где $T_K = 373\text{K}$ - температура кипения воды, m_x - масса пара, а $V = Sh$ - объем цилиндра в конечном состоянии.

Полное количество теплоты можно представить в виде:

$$Q = Q_0 + cm\Delta T \quad (2)$$

где $\Delta T = T_K - T$ есть разность температуры кипения воды и начальной ее температуры, которая дана в условии задачи, c - удельная теплоемкость воды.

В формуле (2) первое слагаемое есть теплота парообразования, а второе - связано с простым нагреванием жидкости без изменения ее фазового состояния.

Теплота парообразования определяется соотношением:

$$Q_0 = qm_x \quad (3)$$

где q - удельная теплота парообразования для воды, значение которой можно определить в таблице

Из формулы (3) можно выразить массу пара и подставить ее в (1). В результате получим:

$$PSh = \frac{Q_0}{qM} RT_K \quad (4)$$

Выразим теплоту парообразования в соотношении (2) и подставим в (4). В результате получим:

$$PSh = \frac{Q - cm\Delta T}{qM} RT_K \quad (5)$$

Используя соотношение (5) найдем высоту h , на которую поднимется поршень:

$$h = \frac{Q - cm\Delta T}{qMPS} RT_K \quad (6)$$

Подставляя данные задачи и справочные величины, определяем численное значение искомой величины:

$$h = 20 \text{ см.}$$

Ответ: $h = \frac{Q - cm\Delta T}{qMPS} RT_K = 20 \text{ см.}$

Задание №3. Лед, находившийся при нормальных условиях, подвергли сжатию до давления $P = 640$ атм. Считая, что понижение температуры льда в этих условиях линейно зависит от давления, найти какая часть льда растаяла. Удельный объем воды на $\Delta V' = 0.09 \text{ см}^3/\text{г}$ меньше удельного объема льда.

Решение:

Для решения данной задачи воспользуемся уравнением Клапейрона – Клаузиуса, учитывая что при линейной зависимости $\frac{dP}{dT} = \text{const}$. Следовательно, производную можно заменить на приращения соответствующих величин.

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{q}{T(V'_2 - V'_1)} \quad (1)$$

где:

$$V'_2 - V'_1 = \Delta V' \quad (2)$$

$$\Delta P = P - P_0 \quad (3)$$

Соотношение (2) соответствует разности удельных объемов льда и воды. Формула (3) характеризует разность давлений в конечном и начальном состоянии, а ΔT - разность температур плавления при различных значениях.

При сжатии выделяется количество теплоты, идущее на плавление льда. Поэтому должен иметь место соответствующий тепловой баланс:

$$cm\Delta T = qm_x \quad (4)$$

где m - начальная масса льда, а m_x - масса расплавленного льда.

Из соотношения (4) можно найти ту часть льда, которая растает. Она будет равна отношению массы расплавленного льда к его начальной массе:

$$\beta = \frac{m_x}{m} = \frac{c\Delta T}{q} \quad (5)$$

Из уравнения Клапейрона – Клаузиуса выразим ΔT :

$$\Delta T = \frac{\Delta P T \Delta V'}{q} \quad (6)$$

Подставим (6) в (5) и получим:

$$\beta = \frac{c \Delta P T \Delta V'}{q^2} \quad (7)$$

Так как давление после сжатия намного больше начального (нормального атмосферного давления), то величиной второго можно в (3) и соответственно в (7) пренебречь:

$$P \gg P_0, \Rightarrow \Delta P \approx P \quad (8)$$

Учитывая (8) для искомой величины окончательно получаем:

$$\beta = \frac{c P T \Delta V'}{q^2}$$

Подставляя значения заданных и соответствующих табличных величин, находим численной значение искомой величины:

$$\beta = 0.03$$

Ответ: $\beta = \frac{c P T \Delta V'}{q^2} = 0.03$

Явления переноса в молекулярной физике

Справочный материал к тестированию по теме

Явления переноса возникают в молекулярной физике в том случае, если равновесие в ТД системе по каким либо причинам нарушено. Область молекулярной физики, в пределах которой изучаются процессы, вызванные нарушением равновесия в ТД системе, называется **физической кинетикой**. **Явления переноса** являются **необратимыми процессами**, так как нарушение равновесия сопровождается, как правило, возникновением нескомпенсированных в некотором направлении или направлениях потоков тепла, молекул и так далее.

Три основных явления переноса в молекулярной физике это: **диффузия, теплопроводность, вязкость (внутреннее трение)**.

Основной характеристикой, при описании какого либо явления переноса, является **поток**. **Потоком физической величины** называют количество этой величины, переносимое в единицу времени через некоторую поверхность. Поток есть величина скалярная. Однако в зависимости от выбранного направления он может иметь как положительный, так и отрицательный знак. Выбор направления может быть произвольным. При наличии замкнутых поверхностей выходящий поток считается положительным, а входящий отрицательным.

Все явления переноса обусловлены перемещением молекул в соответствующих средах, в процессе которого они могут сталкиваться и взаимодействовать друг с другом. При этом они изменяют свои характеристики (например, направление движения). Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется **эффективным диаметром молекулы** d , а площадь, которая выражается через этот диаметр – **эффективным сечением молекулы** σ . **Эффективный диаметр молекулы** зависит от ее энергии, а, следовательно, и от температуры. С ростом температуры

эффективный диаметр молекулы уменьшается. Еще одной важной характеристикой для взаимодействия молекул при столкновениях является длина свободного пробега молекулы. **Длиной свободного пробега λ** называют то среднее расстояние, которое молекула проходит между двумя последовательными столкновениями. Она прямопропорциональна **средней скорости движения молекул $\langle u \rangle$** и обратно пропорциональна **частоте столкновений ν** . **Длина свободного пробега** зависит от **площади эффективного сечения σ** и **концентрации молекул n** . Так как зависимость от этих величин обратная, то с ростом температуры длина свободного пробега увеличивается, а при увеличении концентрации, а, следовательно, и давления она уменьшается.

Диффузией называется самопроизвольное выравнивание концентраций в смеси различных веществ, обусловленное тепловым движением молекул веществ этих смесей. Выравнивание концентраций связано с переносом массы каждой из компонент смеси в направлении убывания ее концентрации. Уравнения, описывающие перенос потоков частиц или их масс при диффузии были получены опытным путем (эмпирически) и носят название **уравнений Фика**. Из этих уравнений видно, что **количество переносимых частиц** каждой компоненты смеси N_i (**количество переносимой массы** каждой компоненты M_i) пропорционально **площади поперечного сечения S** , **градиента концентрации** компоненты dn_i/dz (**градиента плотности** компоненты $d\rho_i/dz$) и связано с ними коэффициентом диффузии D . В рассматриваемом случае ось OZ совпадает с направлением переноса вещества.

Коэффициент диффузии зависит от рода вещества, его температуры и давления (концентрации). С ростом **температуры** коэффициент диффузии растет, а с ростом **концентрации (давления)** – он уменьшается. Диффузия характерна не только для газообразного состояния вещества, но также и для жидкого, твердого состояний.

Теплопроводностью называют перенос тепла в направлении менее нагретой области ТД системы или от более нагретого тела к менее нагретому телу, при наличии непосредственного контакта между ними. **Этот процесс** является **необратимым**. Перенос тепла обусловлен наличием **неравновесного распределения температур в системе**. **Поток переносимого тепла q** пропорционален **градиенту температуры dT/dz** в некотором направлении (например, OZ) и **площади поперечного сечения S** и связан с ними через **коэффициент теплопроводности κ** . Уравнение для потока тепла называют уравнение теплопроводности или уравнением Фурье. Оно было получено экспериментально. Знак минус в формуле для потока тепла указывает на то, что оно переносится к менее нагретым областям. Процесс переноса тепла возможен для любых агрегатных состояний вещества.

Коэффициент теплопроводности κ зависит от рода вещества и его параметров состояния. Для газов с ростом температуры коэффициент теплопроводности растет. Зависимость от давления обусловлена соотношением между длиной свободного пробега и расстояния между поверхностями вещества, обменивающимися теплом (с расстоянием на которое это тепло передается). Если это расстояние намного больше длины свободного пробега, то коэффициент теплопроводности не зависит от давления. Если оно соизмеримо с этой длиной, то коэффициент теплопроводности уменьшается с понижением давления.

Вязкостью (внутренним трением) называют явление переноса импульса между слоями вязких газов или жидкостей при их течении или движении твердых тел в этих средах. Это явление переноса происходит из-за сцепления между этими слоями и поверхностями твердых тел, к которым они примыкают, за счет межмолекулярных сил. **Межмолекулярные силы сцепления** (силы внутреннего трения) приводят к возникновению градиента скорости (импульса) для этих слоев в направлении перпендикулярном течению. Если рассматривается движение газа или жидкости по трубе, то те слои, которые примыкают к ее стенкам, не движутся как и ее стенки, а слой в центре имеет максимально возможную скорость. Если рассматривается движение твердого тела в газе или жидкости, то быстрее всего движутся слои примыкающие к телу и их скорость равна или близка к скорости этого тела. Скорость стальных слоев монотонно убывает при удалении от этого слоя. **Поток импульса за единицу времени** K пропорционален **градиенту скорости слоев** в направлении перпендикулярном к течению или поверхности тела, движущегося в жидкой или газообразной среде dv/dz , и **площади их поверхности** соприкосновения S и связаны коэффициентом вязкости η . Уравнение, описывающее перенос импульса, называется **уравнением вязкости** или **уравнением Ньютона**. Оно получено опытным путем и выполняется только для сред, в которых течение является **ламинарным**. Знак минус в уравнении вязкости показывает, что импульс передается от более быстрых слоев к менее быстрым.

Коэффициент вязкости η также как и другие коэффициенты переноса зависят от рода веществ и их параметров состояния. **Коэффициент вязкости газа** растет с ростом температуры, а **коэффициент вязкости жидкости** при этом убывает. **Зависимость** коэффициента вязкости газа **от давления** такая же как у **коэффициента теплопроводности**.

Основные соотношения:

Эффективное сечение рассеяния

$$\sigma = \pi \cdot d^2 \quad (1)$$

Длина свободного пробега (определение)

$$\lambda = \frac{\langle u \rangle}{\nu} \quad (2)$$

Зависимость длины свободного пробега от n и σ

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} \quad (3)$$

Уравнение диффузии (Фика)

для потока числа молекул i - ого вида

$$N_i = -D \frac{dn_i}{dz} S \quad (4)$$

Уравнение диффузии (Фика)

для потока массы молекул i - ого вида

$$M_i = -D \frac{d\rho_i}{dz} S \quad (5)$$

Определение для коэффициента диффузии

$$D = \frac{1}{3} \langle u \rangle \lambda \quad (6)$$

Коэффициент диффузии для смеси

из двух молекул с массами m_1 и m_2

$$D = \frac{3}{8} \left(\frac{\pi kT}{2\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{n\sigma} \quad (7)$$

где $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ - приведенная масса молекул смеси, а $\sigma = \pi \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2$ - эффективное сечение молекул смеси.

Уравнение теплопроводности (Фурье) для потока тепла $q = -\kappa \frac{dT}{dz} S$ (8)

Определение коэффициента теплопроводности для газа $\kappa = \frac{1}{3} \langle u \rangle \lambda \rho c_v$ (9)

где ρ - плотность газа, c_v - его удельная изохорная теплоемкость

Уравнение вязкости для сил внутреннего трения $F = -\eta \frac{dv}{dz} S$ (10)

Уравнение вязкости для потока импульса при ламинарном течении газа или жидкости $K = -\eta \frac{dv}{dz} S$ (11)

Определение коэффициента вязкости $\eta = \frac{1}{3} \langle u \rangle \lambda \rho$ (12)

Варианты тестов промежуточного контроля по теме

ТЕСТ №1

1. При каких условиях или условии возникают явления переноса?
2. Количество величины, переносимое в единицу времени через некоторую поверхность называют _____.
3. Какую величину называют длиной свободного пробега.
4. Самопроизвольное выравнивание концентраций в смеси различных веществ, обусловленное тепловым движением молекул называется _____.
5. При каком условии коэффициент теплопроводности не зависит от давления?
6. Уравнение, описывающее перенос импульса, называется _____.
7. Чему равно эффективное сечение рассеяния?
8. Зависит ли длина свободного пробега от концентрации вещества? Какова эта зависимость?
9. Запишите уравнение Фика для потока числа молекул.
10. Чему равен коэффициент вязкости?

ТЕСТ №2

1. К каким процессам относятся явления переноса?
2. Какая область молекулярной физики изучает явления переноса.
3. При протекании явлений переноса энтропия системы _____.
4. Среднее расстояние, которое молекула проходит между двумя последовательными столкновениями называют _____.
5. Что такое эффективный диаметр молекулы?
6. Какое явление называют теплопроводностью?
7. Запишите математическое соотношение для коэффициента диффузии.
8. Уравнение Фурье имеет вид _____.
9. Запишите уравнение Фика для потока массы молекул.
10. Как изменяется коэффициент диффузии при понижении давления газа?

ТЕСТ №3

1. Что называют потоком физической величины?
2. Могут ли явления переноса протекать при постоянной максимально возможной энтропии? Почему?
3. Что изучает физическая кинетика?
4. Как связаны эффективный диаметр и эффективное сечение молекулы.
5. Явление переноса импульса между слоями вязких газов или жидкостей при их течении или движении твердых тел в этих средах называют _____.
6. Соотношение для коэффициента теплопроводности имеет вид _____.
7. Что происходит с коэффициентом вязкости при росте температуры газа?
8. Длина свободного пробега зависит от _____.
9. Определение длины свободного пробега дается соотношением
10. Приведите уравнение вязкости для потока импульса.

ТЕСТ №4

1. Может ли возникнуть явление переноса без нарушения равновесия в системе? Почему?
2. С понижением температуры эффективный диаметр молекул _____.
3. Какова связь между давлением (концентрацией) и длиной свободного пробега молекул?
4. Какое явление называют диффузией?
5. Поток переносимого тепла q пропорционален _____.
6. Приведите уравнение вязкости для сил внутреннего трения.
7. Какое уравнение характеризует перенос массы молекул определенного вида?
8. Поток чего зависит от градиента температуры? Запишите уравнение для него.
9. Какова связь между коэффициентом диффузии и вязкости?
10. Что происходит с коэффициентом вязкости жидкости при повышении ее температуры?

Примеры заданий с решениями по теме

Задание №1. В результате некоторого процесса вязкость идеального газа увеличилась в $\alpha = 2$ раза, а коэффициент диффузии – в $\beta = 4$ раза. Как и во сколько раз изменилось давление газа.

Решение:

Воспользуемся соотношениями, которые являются математическими определениями для коэффициентов диффузии и вязкости:

$$D = \frac{1}{3} \langle u \rangle \lambda \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \langle u \rangle \lambda \rho \quad (2)$$

Плотность идеального газа выражается через давление и температуру с помощью его уравнения состояния:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (3)$$

Средняя скорость молекул идеального газа связана с температурой соотношением:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (4)$$

Длина свободного пробега выражается через концентрацию молекул, а значит и через давление ($P = nkT$):

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} = \frac{kT}{\sqrt{2}P\sigma} \quad (5)$$

где σ эффективное сечение молекулы, значение которого слабо зависит от давления и температуры

Подставим (3) – (5) в соотношения (1) и (2) и получим:

$$D = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2RT}{M}} \frac{kT}{\sqrt{2}P\sigma} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{k^2 R}{M\sigma^2}} \frac{T^{3/2}}{P} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2RT}{M}} \frac{kT}{\sqrt{2}P\sigma} \frac{PM}{RT} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{k^2 M}{R\sigma^2}} T^{1/2} \quad (7)$$

Из (6) и (7) видно, что коэффициент диффузии зависит как от температуры, так и от давления, а коэффициент вязкости только от температуры. Используя эти формулы, установим связь между D и η :

$$D = \frac{9R^2\sigma^2}{k^2M^2} \frac{\eta^3}{P} \quad (8)$$

Формула верна как для конечного, так и для начального состояния, причем изменяться в ней будут только величины D , η и P :

$$D_1 = \frac{9R^2\sigma^2}{k^2M^2} \frac{\eta_1^3}{P_1} \quad (9.1)$$

$$D_2 = \frac{9R^2\sigma^2}{k^2M^2} \frac{\eta_2^3}{P_2} \quad (9.2)$$

Разделим (9.2) на (9.1) и получим:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{\eta_2^3 P_1}{\eta_1^3 P_2} \quad (10)$$

По условию $\eta_2/\eta_1 = \alpha$, а $D_2/D_1 = \beta$, следовательно (10) примет вид:

$$\beta = \alpha^3 \frac{P_1}{P_2} \quad (11)$$

Из (11) можно найти как изменилось давление:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\alpha^3}{\beta} = \frac{2^3}{4} = 2 \quad (12)$$

Ответ: В результате данного процесса давление увеличилось в 2 раза.

Задание №2. Найти показатель политропы n процесса, совершаемого идеальным газом, при котором остается неизменным 1) коэффициент диффузии; 2) вязкость, 3) теплопроводность.

Решение:

Используем соотношение (6) из прошлой задачи для коэффициента диффузии:

$$D = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{k^2 R}{M \sigma^2}} \frac{T^{3/2}}{P} \quad (1)$$

Удовлетворим условию 1) о неизменности коэффициента диффузии для двух произвольных состояний и подставим правую часть (1):

$$D_1 = D_2 \quad (2)$$

$$\frac{T_1^{3/2}}{P_1} = \frac{T_2^{3/2}}{P_2} \quad (3)$$

Используя уравнение состояния идеального газа переедем в (3) на плоскость (T, V) :

$$P = \frac{\nu R T}{V} \quad (4)$$

$$T_1 V_1^2 = T_2 V_2^2 \quad (5)$$

Так как уравнение политропы на соответствующей плоскости в общем случае имеет вид:

$$T V^{n-1} = \text{const} \quad (6)$$

то показатель политропы n можно найти из уравнения для показателя степени, полученного из сравнения (5) с (6):

$$n - 1 = 2, \Rightarrow n = 3$$

Далее используем соотношение (7) из прошлой задачи для коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{k^2 M}{R \sigma^2}} T^{1/2} \quad (7)$$

При условии, что коэффициенты вязкости в двух различных состояниях одинаковы, следует равенство и их температур (то есть рассматриваемый процесс изотермический):

$$\eta_1 = \eta_2 \quad (8)$$

$$T_1 = T_2 \quad (9)$$

Уравнения изотермы на плоскости (P, V) и политропы имеют соответствующий вид:

$$P V = \text{const} \quad (10)$$

$$P V^n = \text{const} \quad (11)$$

Сравнивая (10) с (11) находим, что:

$$n = 1$$

Зависимость коэффициента теплопроводности от параметров P и T такая же, как и для коэффициента вязкости (c_V - в формуле для коэффициента теплопроводности не зависит от данных параметров, а только от степени свободы и молярной массы данного газа). Следовательно, при равенстве соответствующих коэффициентов $\kappa_1 = \kappa_2$, температуры также одинаковы $T_1 = T_2$ и показатель политропы равен единице ($n = 1$)

Ответ: 1) $n = 3$; 2) $n = 1$, 3) $n = 1$.

Задание №3. Найти распределение температур в веществе, находящимся между двумя большими параллельными пластинами, если последние поддерживают при

температурах T_1 и T_2 , расстояние между ними равно l и теплопроводность вещества $\kappa \sim \sqrt{T}$.

Решение:

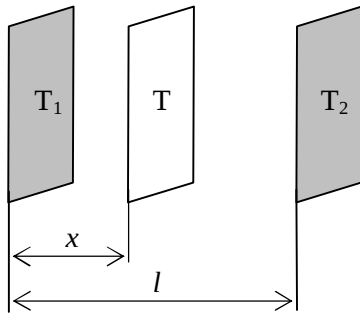


Рис. 4.

Воспользуемся уравнением теплопроводности для потока тепла:

$$q = -\kappa \frac{dT}{dx} S \quad (1)$$

где ось ОХ перпендикулярна пластинам

Решим дифференциальное уравнение (1) в рассматриваемом интервале температур от T_1 до T_2 при заданной теплопроводности вещества. Определим с помощью него неизвестные величины:

$$q = -\alpha \sqrt{T} \frac{dT}{dx} S \quad (2)$$

где α - некоторый коэффициент пропорциональности

$$\sqrt{T} dT = -\frac{q}{\alpha S} dx \quad (3)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \sqrt{T} dT = -\frac{q}{\alpha S} \int_0^l dx \quad (4)$$

$$\frac{2}{3} (T_2^{3/2} - T_1^{3/2}) = -\frac{ql}{\alpha S} \quad (5)$$

Из соотношения (5) можно выразит неизвестные величины в задаче:

$$-\frac{q}{\alpha S} = \frac{2}{3} \frac{(T_2^{3/2} - T_1^{3/2})}{l} \quad (6)$$

Проведем мысленно параллельную плоскость на малом расстоянии x от пластины с температурой T_1 . Температура на этой произвольно выбранной параллельной плоскости будет соответствовать искомой T (см. рис.). Тогда при решении уравнения (3) необходимо использовать новые пределы интегрирования. Для температуры верхний предел будет равен T , а для расстояния вдоль оси ОХ верхний предел будет равен x . В результате соответствующих изменений получим:

$$\int_{T_1}^T \sqrt{T'} dT' = -\frac{q}{\alpha S} \int_0^x dx' \quad (7)$$

Уравнение (7) даст решения вида (6):

$$-\frac{q}{\alpha S} = \frac{2}{3} \frac{(T^{3/2} - T_1^{3/2})}{x} \quad (8)$$

Сравнивая соотношения (6) и (8), делаем заключение о равенстве их правых частей. Из этого равенство следует уравнение из которого затем можно выразить температуру как функцию от расстояния между пластинами $T(x)$.

$$\frac{(T^{3/2} - T_1^{3/2})}{x} = \frac{(T_2^{3/2} - T_1^{3/2})}{l} \quad (9)$$

$$T(x) = T_1 \left(1 + \frac{x}{l} \left[\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} - 1 \right] \right)^{2/3} \quad (10)$$

$$\text{Ответ: } T(x) = T_1 \left(1 + \frac{x}{l} \left[\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} - 1 \right] \right)^{2/3}$$

Варианты тестов итогового контроля по разделу: молекулярная физика

ТЕСТ №1

1. Какие подходы используются для описания процессов и явлений в молекулярной физике?
2. В чем состоит суть термодинамического подхода?
3. Какой процесс называется обратимым?
4. Мера нагретости тела характеризует _____.
5. Основными термодинамическими параметрами являются:
6. Уравнение состояния идеального газа имеет вид _____.
7. Процесс, который происходит при постоянной температуре и массе вещества называется _____.
8. В случае адиабатического процесса газ охлаждаясь _____ (указать, что происходит с его объемом).
9. Уравнение адиабаты на плоскости P, V имеет вид _____.
10. Запишите уравнение Майера.
11. Чему равен показатель политропы.
12. Какие из перечисленных функций являются функциями состояния: термодинамическая работа, теплота, внутренняя энергия, энтропия, энтальпия, свободная энергия?
13. Что представляет собой внутренняя энергия газа? Функцией чего она является?
14. При каком процессе термодинамическая работа равна нулю?
15. Каков физический смысл энтропии с точки зрения термодинамического подхода? Чему она равна?
16. Фазовыми переходами первого рода называют _____.
17. Записать уравнение Клайперона - Клаузиуса.
18. Критической температурой называют такое ее значение, при котором вещество _____.
19. Что является общей чертой всех явлений переноса

20. Что называют диффузией? Приведите уравнение Фика (диффузии).

ТЕСТ №2

1. В чем состоит суть статистического подхода?
2. Какой процесс называется необратимым?
3. Записать основное уравнение МКТ.
4. Процесс, который происходит при постоянной массе и объеме вещества называется _____.
5. Все процессы, которые происходят с постоянной теплоемкостью, называют _____.
6. Чему равен коэффициент Пуассона.? (через молярные теплоемкости).
7. В чем заключается физический смысл универсальной газовой постоянной?
8. Выражение для термодинамической работы в дифференциальной форме имеет вид _____.
9. Уравнение адиабаты на плоскости T, V имеет вид _____.
10. Какие из перечисленных функций являются функциями процесса: термодинамическая работа, теплота, внутренняя энергия, энтропия, энтальпия, свободная энергия?
11. Функцией какого параметра является термодинамическая работа?
12. Возможен ли теплообмен при постоянной энтропии системы? (Поясните).
13. Каков физический смысл энтропии с точки зрения статистического подхода? Чему она равна?
14. Фазовыми переходами второго рода называют _____.
15. Уравнение Ван-дер-Ваальса для одного моля вещества имеет вид _____.
16. С ростом высоты над уровнем моря атмосферное давление _____. (Дать ответ и привести барометрическую формулу)
17. Чему равно значение наиболее вероятной скорости молекул?
18. Записать в общей форме классическое распределение Максвелла – Больцмана.
19. Записать уравнение Ньютона для коэффициента вязкости.
20. Что называют теплопроводностью? Записать уравнение Фурье (теплопроводности).

Примеры контрольных работ с ответами по разделу: молекулярная физика.

Вариант I

1. В сосуде находится смесь $m_1 = 7\text{г}$ азота и $m_2 = 11\text{г}$ углекислого газа при температуре $T = 290\text{К}$ и давлении $P = 1\text{атм}$. Найти плотность этой смеси, считая газ идеальным. (Ответ: $\rho = \frac{P(m_1 + m_2)}{RT(m_1/M_1 + m_2/M_2)} = 1.5 \text{ г/л}$)
2. Один моль идеального газа, теплоемкость которого при постоянном давлении C_p , совершает процесс по закону: $T = T_0 + \alpha V^2$. Найти теплоемкость газа как функцию от его объема; сообщенное газу тепло при его расширении от V_1 до V_2 . (Ответ: $P_{\min} = 2R\sqrt{\alpha T_0}$)
3. У тепловой машины, работающей по циклу Карно, температура нагревателя в $n = 1.6$ раза больше температуры холодильника. За один цикл машина производит

работу $A = 12$ кДж. Какая работа за цикл затрачивается на изотермическое сжатие рабочего вещества? (Ответ: $A' = A/(n-1) = 20$ кДж)

Вариант II

1. В баллоне, объемом $V = 7.5$ л при температуре $T = 300$ К находится смесь идеальных газов: $\nu_1 = 0.1$ моля кислорода, $\nu_2 = 0.2$ моля азота и $\nu_3 = 0.3$ моля углекислого газа. Считать газы идеальными. Найти молярную массу смеси. (Ответ: $M = \frac{(\nu_1 M_1 + \nu_2 M_2 + \nu_3 M_3)}{(\nu_1 + \nu_2 + \nu_3)} = 36.7$ г/моль)

2. Во сколько раз следует увеличить изотермически объем идеального газа в количестве $\nu = 4$ моля, чтобы его энтропия испытала приращение $\Delta S = 23$ Дж/К?

(Ответ: в $n = \exp\left(\frac{\Delta S}{\nu R}\right) = 2$ раза)

3. В каком случае КПД цикла Карно повысится больше: при увеличении температуры нагревателя на ΔT или при уменьшении температуры холодильника на такую же величину? (Ответ: во втором случае)

Вариант III

1. В идеальной тепловой машине абсолютная температура нагревателя в два раза больше абсолютной температуры холодильника. Если за один цикл холодильнику было передано количество теплоты $Q = 200$ Дж, то, какое количество теплоты передал газу нагреватель? (Ответ: $Q_0 = 2Q = 400$ Дж)

2. Имеется идеальный газ, молярная теплоемкость которого C_V известна. Найти молярную теплоемкость этого газа как функцию его объема V , если газ совершает процесс по закону: $P = P_0 \cdot e^{\alpha \cdot V}$. (Ответ: $C = C_V + R/(1 + \alpha V)$)

3. Как изменится коэффициент диффузии D и вязкость η идеального газа, если его объем увеличить в n раз изотермически? (Ответ: D увеличится в n раз, $\eta = \text{const}$)

Вариант IV

1. При очень низких температурах теплоемкость кристаллов $C = \alpha \cdot T^3$, где $\alpha = \text{const}$, Найти энтропию как функцию температуры в этой области. (Ответ: $S = \alpha T^3/3$)

2. Найти уравнение процесса в переменных T, V при котором молярная теплоемкость идеального газа изменяется по закону: $C = C_V + \beta \cdot V$. (Ответ: $T e^{R/\beta V} = \text{const}$)

3. Как изменится коэффициент диффузии D и вязкость η идеального газа, если его объем увеличить в n раз изобарически? (Ответ: D увеличится в $n^{3/2}$ раз, η - в $\sqrt{n}$ раз)

Приложение 1

Таблица 1.

Единицы физических величин раздела молекулярная физика
в СИ и СГС.

Наименование величины	Единица величины		Отношение ед. СИ/ед. СГС
	СИ	СГС	
Длина, высота, l, h	м	см	10^2
Температура, T	К	К	1
Скорость, $\vec{v}$	м/с	см/с	10^2
Масса, m	кг	г	10^3
Молярная масса, M	кг/моль	г/моль	10^3
Количество молей, ν	моль	моль	1
Плотность, ρ	кг/м ³	г/см ³	10^{-3}
Удельная теплоемкость, c	Дж/(кг·К)	эрг/(г·К)	10^4
Молярная теплоемкость, C	Дж/(моль·К)	эрг/(моль·К)	10^7
Объем, V	м ³	см ³	10^{-6}
Давление, P	Па	дин/см ²	10
Количество теплоты, внутренняя энергия и другие ТД потенциалы, термодинамическая работа Q, W, A	Дж	эрг	10^7
Коэффициент диффузии, D	м ² /с	см ² /с	10^4
Коэффициент вязкости, η	Па·с	П (пуаз)	10
Коэффициент теплопроводности, κ	Вт/(м·К)	эрг/(с·см·К)	10^5
Сила внутреннего трения, F	Н	дин	10^5
Поток импульса за единицу времени, K	кг·м/с ²	г·см/с ²	10^5
Удельная теплота, энтропия, $\tilde{q}, S$	Дж/К	эрг/К	10^7
Поток тепла, q	Вт	эрг/с	10^7
Поток массы молекул, M_i	кг/с	г/с	10^3
Поток числа молекул, N_i	с ⁻¹	с ⁻¹	1

Приложение 2

Некоторые внесистемные единицы

$$1 \text{ атм} = \begin{cases} 101.3 \text{ кПа} \\ 760 \text{ мм рт. ст.} \end{cases}$$

$$1 \text{ бар} = 100 \text{ кПа}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133.3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ л} \cdot \text{атм} = 101.3 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кал} = 4.18 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

Связь между абсолютной шкалой температур и шкалой в градусах Цельсия:

$$T = t + 273$$

где T - температура в Кельвинах (К), а t - температура в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$)

Таблица 2.

Основные физические константы в молекулярной физике

Наименование физической константы	Обозначение	Численное значение	Единицы измерения
Постоянная Больцмана	k	$1.3807 \cdot 10^{-23}$	Дж/К
Постоянная Авогадро	N_A	$6.022 \cdot 10^{23}$	моль ⁻¹
Универсальная молярная газовая постоянная	R	8.314	Дж/(моль·К)
Молярный объем газа	V_{μ}	22.41	л/моль

Литература

1. Савельев И.В., Курс общей физики, Т.1, Москва «Наука»,1987.
2. Матвеев А.Н. , Молекулярная физика, Москва «Высшая школа», 1987.
3. Иродов И.Е., Задачи по общей физике, С. – Петербург «Лань», 2001.
4. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. Курс физики. М., Высшая школа, 2002.
5. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М., Наука, 1975.
6. Д.И. Сахаров. Сборник задач по физике. М., Просвещение, 1973.
7. В.С. Волькенштейн. Сборник задач по физике. М., Просвещение, 1984.