

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ГОУ ВПО ИГУ)
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Г.А. Кузнецова

«Молекулярная физика».
Самостоятельная работа студентов

Методические указания

Иркутск 2005 г

Печатается по решению учебно-методического совета ГОУ ВПО
Иркутского государственного университета

Рецензент: Доктор физ. – мат. наук, профессор кафедры общей и
космической физики В.Л. Паперный

Составитель: Г.А. Кузнецова

кандидат техн. наук, доц.
кафедры общей физики ИГУ

«Молекулярная физика» Самостоятельная работа студентов.
Методические указания – Иркутск: ИГУ, 2005 – с. – 16.

Приводятся контрольные вопросы по самостоятельно изучаемой
теме «Свойства жидкостей», по темам для коллоквиумов, задачи для
самостоятельного решения, а также методические рекомендации к
решению некоторых типичных задач. Предназначены для студентов 1
курса физических специальностей университета.

Данные методические указания являются руководством к самостоятельной работе по общей физике студентов первого курса физического факультета при изучении того круга явлений, которые обозначаются общим названием “Молекулярная физика”. Весь изучаемый в течение семестра материал разделен на три раздела, каждому из которых соответствует определенное задание, состоящее из теоретических вопросов к коллоквиуму, подборки качественных вопросов-задач, на которые студенту следует дать развернутые аргументированные ответы, и перечня задач, которые студент должен решить и представить преподавателю к указанному сроку. Преподаватель имеет возможность индивидуализировать задания.

Также включены методические рекомендации к решению некоторых типичных задач (по два примера для каждого раздела), а также перечень контрольных вопросов по теме “свойства жидкостей”, которую студенты изучают самостоятельно.

Приступая к решению задач того или иного раздела, студенту следует тщательно изучить соответствующие теоретические вопросы, которые выносятся на коллоквиум, и внимательно разобрать приведенные примеры решения задач. В затруднительных случаях студент имеет возможность индивидуальной консультации у преподавателя в часы, предусмотренные расписанием. Контрольное самостоятельное задание выполняется в отдельной тетради. Без представления выполненного задания студент к коллоквиуму не допускается.

Контрольные вопросы к теме “Свойства жидкостей”

1. Причины образования свободной поверхностной энергии. Ее связь с поверхностным натяжением.
2. Как возникает поверхностное натяжение? Как направлена сила поверхностного натяжения?
3. Зависит ли поверхностное натяжение от свойств вещества, с которым граничит поверхность жидкости?
4. Почему небольшие капли жидкости принимают форму шара?
5. Как ведет себя капля жидкости на поверхности другой жидкости?
6. Возможные варианты равновесия на границе жидкость – твердое тело.
7. Почему некоторые насекомые бегают по поверхности воды и при этом не тонут?
8. Что такое “лапласово давление”? Как рассчитать его величину?
9. Физический механизм капиллярных явлений.
10. При каких условиях растворенное вещество концентрируется либо в поверхностном слое, либо внутри жидкости? Какие вещества называются поверхностно активными?

11. Поверхностное натяжение не зависит от геометрических размеров сосуда или объема жидкости. Почему же его существование наиболее четко проявляется лишь в узких трубках и маленьких каплях?

Вопросы к коллоквиуму №1

1. Агрегатные состояния вещества. Основные признаки агрегатных состояний. Модель идеального газа.

2. Методы рассмотрения систем многих частиц: динамический, статистический, термодинамический.

3. Основные математические понятия теории вероятностей. Случайное событие, достоверное и невозможное, несовместимые события, противоположные события. Сумма и произведение событий. Полная группа событий. Вероятность случайного события. Частотное и классическое определение вероятности. Основные свойства вероятностей, вероятность достоверного и невозможного события, нормировка вероятностей. Сложение вероятностей независимых случайных событий. Умножение вероятностей случайных событий. Условная вероятность.

4. Случайные величины: дискретные и непрерывные. Плотность вероятности непрерывного случайного события. Закон распределения случайной величины.

5. Характеристики распределений. Среднее значение и математическое ожидание. Свойства математического ожидания. Средний квадрат случайной величины. Дисперсия. Среднее по времени и среднее по ансамблю.

6. Биномиальный закон распределения случайных величин.

7. Среднее число частиц в выделенном объеме.

8. Понятие флуктуации. Абсолютная и относительная флуктуация среднего числа частиц в выделенном объеме.

9. Распределение молекул идеального газа по компонентам скорости.

10. Постулат равновероятности и эргодическая гипотеза.

11. Понятие о макрораспределении, микрораспределении и способе подсчета числа микрораспределений. Расчет вероятностей макросостояния.

12. Распределение Максвелла. Распределение молекул идеального газа по абсолютным значениям скоростей.

13. Характерные скорости распределения Максвелла: средняя, средняя квадратичная и наиболее вероятная скорости.

14. Экспериментальная проверка распределения Максвелла.

15. Функция распределения в сферических координатах.

16. Среднее число ударов молекул о стенку сосуда.

17. Давление газа. Основное уравнение кинетической теории идеального газа. Уравнение Клайперона-Клаузиуса и основные газовые законы. Измерение давления.

18. Температура. Термометрические тела. Эмпирическая шкала температур. Нуль Кельвина.
19. Распределения Больцмана. Распределение молекул идеального газа в однородном поле тяготения.
20. Распределение Больцмана для смеси газов.
21. Распределение Максвелла – Больцмана.
22. Барометрическая формула. Атмосфера планет.
23. Броуновское движение. Теория Эйнштейна – Смолуховского.
24. Опыты Перрена по определению числа Авогадро.

Задание № 1

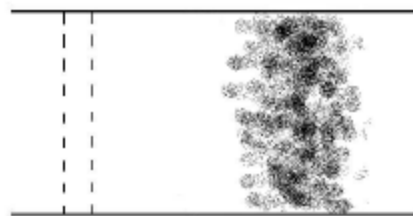
Уравнение состояния идеального газа. Молекулярно-кинетическая теория. Распределение Максвелла и Больцмана. Жидкости.

1. подготовить вопросы, выносимые на коллоквиум № 1.
2. Ответить на следующие вопросы.

Вопрос 1. Почему при измерении скорости молекул в опыте Штерна след молекул серебра при неподвижных цилиндрах (рис. А) резко ограничен, а при вращающихся – (рис. Б) – размыт?

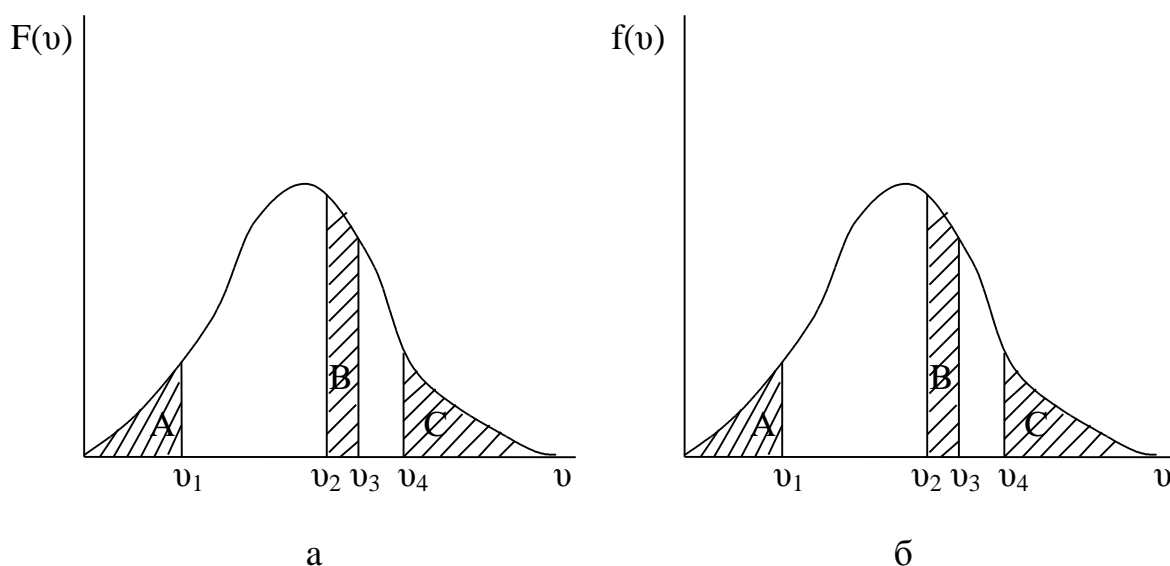


а

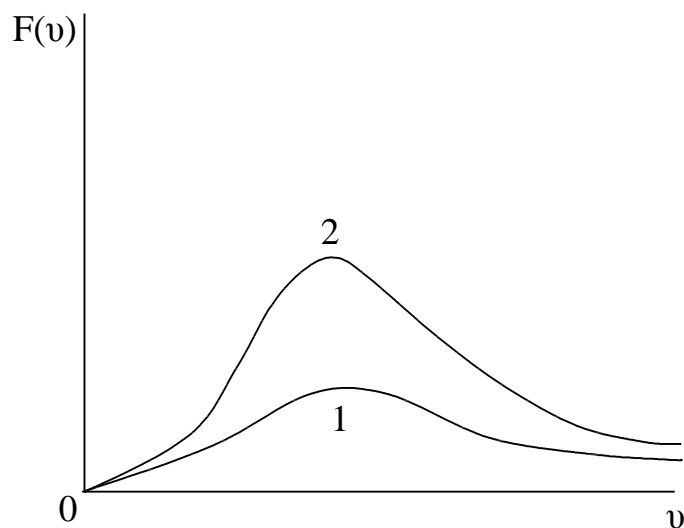


б

Вопрос 2. По оси ординат на рис. а и б отложены соответственно функции $F(n) = \frac{dN}{dn}$ и $f(n) = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN}{dn}$, где N – число молекул, имеющих скорость v , и N_0 – общее число молекул в данном объеме. Какой физический смысл каждый из заштрихованных участков на каждом рисунке?



Вопрос 3. Все ординаты кривой 2 в два раза больше, чем соответствующие координаты кривой 1. Чем отличаются функции распределения молекул по скоростям, изображаемые этими кривыми?



Вопрос 4. Предлагаются два объяснения подъемной силы воздушного шарика, наполненного легким газом. Согласно одному, подъемная сила – это архимедова сила, равная весу воздуха в объеме шарика. Согласно второму, подъемная сила обусловлена разностью в барометрическом давлении на верхнюю и нижнюю части шарика. Не находятся ли объяснения в противоречии?

Вопрос 5. Изменится ли подъемная сила аэростата и дирижабля при изменении температуры газа внутри и снаружи летательных аппаратов на одну и ту же величину?

Вопрос 6. Искривление поверхности жидкости создает дополнительное (лапласово) давление. Вследствие этого давление воздуха в мыльном пузыре несколько больше атмосферного. Повышенное давление существует и в капле. Имеются одного диаметра капля и мыльный пузырь из одной и той же жидкости. Где давление больше – внутри капли или внутри пузыря?

Решить следующие задачи

6-1, 6-2, 6-3, 6-4, 6-5, 6-6, 6-10, 6-11, 6-13, 6-15, 6-21, 6-67, 6-68, 6-92, 6-93, 6-95, 6-96, 6-97, 6-99, 6-103, 6-104, 6-105, 6-106, 6-111, 6-115, 6-116, 6-117 6-118, 6-119, 6-122.

Вопросы к коллоквиуму № 2

1. Число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул газа, зависимость ее от давления и температуры газа.
2. Рассеяние молекулярного пучка в газе. Формула Клаузиуса. Экспериментальное определение средней длины свободного пробега молекул.
3. Теплопроводность, внутреннее трение и самодиффузия в газах.
4. Общая теория процессов переноса в газах. Вычисление коэффициентов переноса, связь между этими коэффициентами.
5. Взаимная (концентрационная) диффузия.
6. Физические явления в вакууме. Вакуумные насосы. Измерение молекул давлений.
7. Течение газа через отверстие при малых давлениях. Эффузия.
8. основные термодинамические понятия: термодинамическая система, параметры состояния системы, процесс, стационарные и равновесные состояния, равновесный процесс, обратимые процесс.
9. Работа расширения системы в изопрцессах.
10. Принцип эквивалентности между теплотой и работой.
11. Внутренняя энергия термодинамической системы.
12. Первое начало термодинамики.
13. Понятие теплоемкости. Теплоемкость системы при постоянном объеме и теплоемкости при постоянном давлении.
14. Теплоемкость идеального газа. Уравнение Р.Майера.
15. Классическая теория теплоемкости газов.
16. Зависимость теплоемкости газов от температуры. Характеристические температуры.
17. Адиабатный процесс, уравнение Пуассона; работа при адиабатном изменении объема газа.
18. Политропный процесс. Изопрцессы как частный случай политропного процесса.
19. Невозможность вечного двигателя 1-го рода.

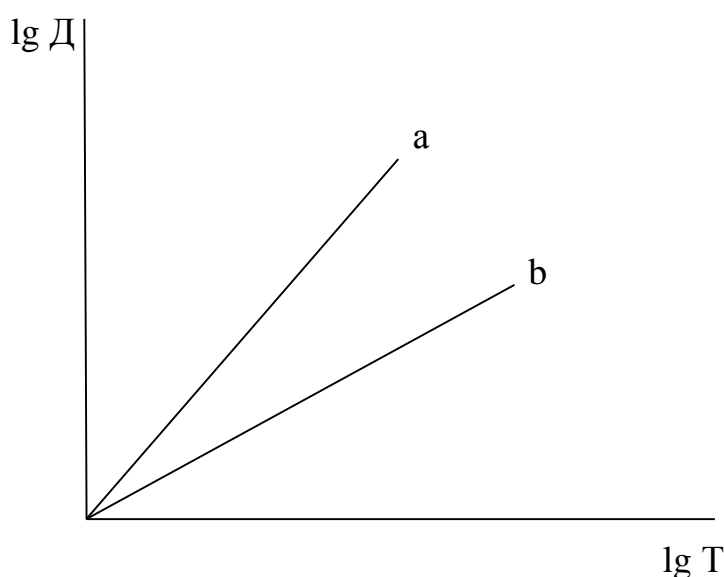
20. Циклические процессы. КПД цикла.
21. Цикл Карно, его КПД.
22. Тепловая и холодильная машины. Формулировка второго начала термодинамики по Кельвину и Клаузиусу.
23. Теоремы Карно.
24. Приведенная теплота. Теорема Клаузиуса.
25. Понятие энтропии. Ее физический смысл.
26. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Основное уравнение термодинамики.
27. Статистическое определение энтропии. Формула Больцмана.
28. Направление термодинамических процессов в изолированной системе.
29. Границы применимости второго закона термодинамики.
30. Термодинамические потенциалы. Связь между ними.
31. Отклонение реального газа от идеальности.
32. Эмпирические изотермы реального газа; фазовый переход; давление насыщенных паров; молярный объём пара и жидкости.
33. Уравнение состояния реального газа.
34. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Физический смысл постоянных «а» и «в».
35. Изотермы Ван-дер-Ваальса, сравнение их с эмпирическими.
36. Метастабильные состояния.
37. Критическое состояние. Его параметры.
38. Сравнение уравнения Ван-дер-Ваальса с экспериментальными данными. Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса.
39. Расширение газа в пустоту. Коэффициент Джоуля.
40. Эффект Джоуля-Томпсона. Температура инверсии.
41. Адиабатное расширение газа с совершением внешней работы. Детандер.
42. Сжижение газов. Методы Линде и Клода. Свойства вещества вблизи нуля Кельвина.
43. Свойства жидкостей. Испарение и кипение.
44. Структура жидкостей. Жидкие кристаллы.
45. Жидкие растворы. Закон Рауля и Генри.
46. Симметрия твёрдых тел. Точечные группы симметрии.
47. Примитивная кристаллическая решётка. Элементы симметрии решётки.
48. Кристаллические классы. Кристаллические системы координат; обозначения атомных плоскостей и направлений.
49. Дефекты кристаллических решёток.
50. Теплоёмкость твёрдых тел. Закон Дюлонга и Пти. Фононы.

Задание № 2

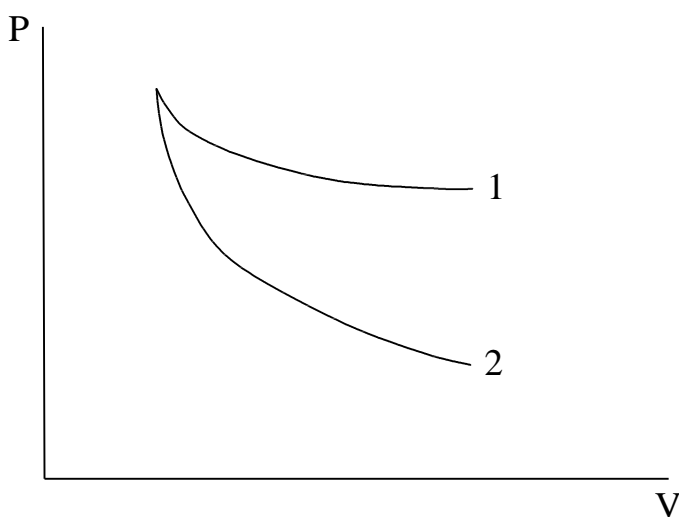
Процессы переноса в газах. Первое начало термодинамики. Теплоёмкость. Политропные процессы. Второе начало термодинамики. Циклы.

1. Подготовить вопросы, выносимые на коллоквиум №2.
2. Ответить на следующие вопросы.

Вопрос 1. В зависимости от того, как меняется температура газа – в закрытом или открытом сосуде – по-разному изменяется его коэффициент диффузии. На рисунке в логарифмическом масштабе представлена зависимость коэффициента диффузии D от температуры для обоих случаев. Какая из прямых изображает эту зависимость для открытого сосуда и какая – для закрытого? Эффективное поперечное сечение молекул считать постоянным.

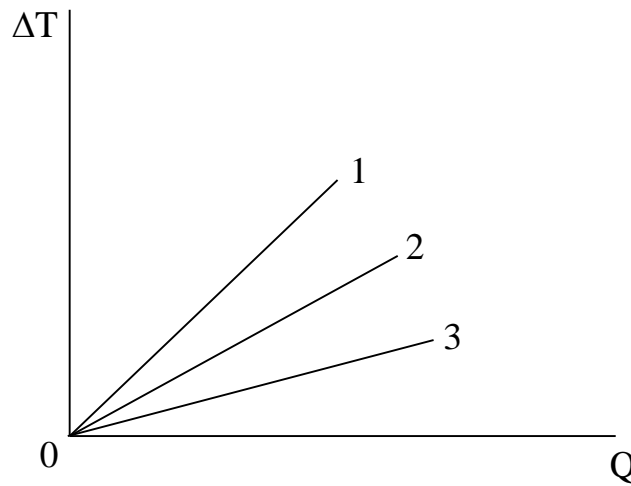


Вопрос 2. На рисунке представлены адиабаты двух газов – гелия и углекислого газа. Какая кривая, какому газу принадлежит?

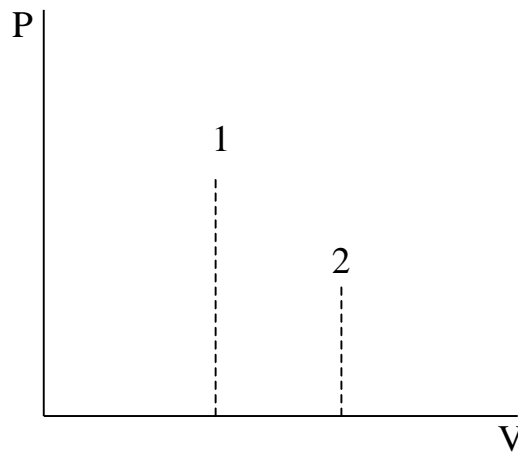


Вопрос 3. Прямые на рисунке изображают зависимость изменения температуры от количества подведённой теплоты для различных

процессов изменения состояния одноатомного и двухатомного газов. Каким процессам соответствуют эти прямые? Графики, каких процессов совпадают с координатными осями? Начальные состояния (температура, объём, давление) обоих газов одинаковые.

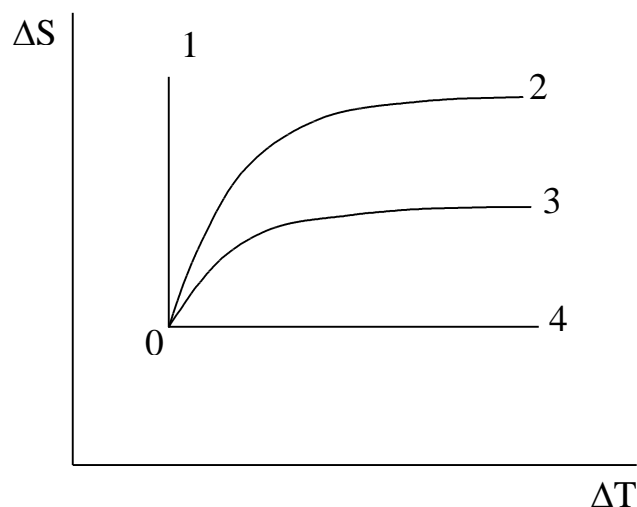


Вопрос 4. Газ переходит из состояния 1 в состояние 2 в одном случае сначала по изохоре, а затем по изобаре, а в другом случае, наоборот, сначала по изобаре, а затем по изохоре. Будет ли в обоих случаях совершена одинаковая работа, потребуется ли одинаковое количество теплоты и одинаково ли приращение энтропии газа?



Вопрос 5. Нарисовать цикл Карно для одноатомного газа в логарифмическом масштабе и координатах $P - T$ и $V - T$.

Вопрос 6. Из начального состояния O газ переходит в другие состояния 1, 2, 3, 4 по различным изопроцессам. Какой график зависимости энтропии от температуры какому процессу соответствует?



Решить следующие задачи

6-26, 6-28, 6-29, 6-31, 6-33, 6-38, 6-39, 6-42, 6-44, 6-50, 6-53, 6-77, 6-79, 6-138, 6-140, 6-143, 6-145, 6-146, 6-148, 6-150, 6-153, 6-156, 6-160, 6-172(б), 6-176, 6-190, 6-58, 6-59, 6-60, 6-165, 6-172, 6-201, 6-202, 6-203, 6-207, 6-208, 6-215, 6-219, 6-220, 6-226, 6-255.

Методические рекомендации к решению задач

Пример 1. Сосуд объёмом $V=20$ л. Содержит смесь водорода и гелия при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$ и давлении $P=2,0$ атм. Масса смеси $m=5,0$ г. Найти отношение массы водорода к массе гелия в данной смеси.

Решение

$V=20$ л, $t=20^{\circ}\text{C}$, $P=2,0$ атм., $m=5$ г.	$V=2 \cdot 10^{-3}$ м ³ $T=293$ К $P=2 \cdot 10^5$ Па $m=5 \cdot 10^{-3}$ кг
$\frac{m_{\text{H}_2}}{m_{\text{He}}} = ?$	

Для смеси газов можно записать:

1) Закон Дальтона

$$P_{\text{см}} = P_{\text{H}_2} + P_{\text{He}} \quad (1)$$

2) Уравнение состояния

$$P_{\text{см}} V = \frac{m_{\text{см}}}{M_{\text{см}}} RT \quad (2)$$

Уравнение состояния можно записать и для каждого газа:

$$P_{H_2} V = \frac{m_{H_2}}{m_{H_2}} RT \quad (3)$$

$$P_{He} V = \frac{m_{He}}{m_{He}} RT \quad (4)$$

Сложив эти уравнения, получим:

$$(P_{H_2} + P_{He}) = \left(\frac{m_{H_2}}{m_{H_2}} + \frac{m_{He}}{m_{He}} \right) RT \quad (5)$$

Сопоставив уравнения (5) и (2), можно записать

$$\frac{m_{H_2}}{m_{H_2}} + \frac{(m - m_{H_2})}{m_{He}} = \frac{m}{m_{cm}} \quad (6)$$

m_{cm} определяем из уравнения (2)

$$m_{cm} = \frac{mRT}{PV} \quad (7)$$

Подставим m_{cm} в (6)

$$\begin{aligned} \frac{m_{H_2}}{m_{H_2}} + \frac{m}{m_{He}} - \frac{m_{H_2}}{m_{He}} &= \frac{PV}{RT} ; \\ m_{H_2} \left(\frac{1}{m_{H_2}} - \frac{1}{m_{He}} \right) &= \frac{PV}{RT} - \frac{m}{m_{He}} ; \\ m_{H_2} &= \frac{\frac{PV}{RT} - \frac{m}{m_{He}}}{\frac{1}{m_{H_2}} - \frac{1}{m_{He}}} = \frac{(PVm_{He} - RTm) \cdot m_{H_2}}{RT \cdot (m_{He} - m_{H_2})} ; \\ m_{He} &= \frac{m_{He} \cdot (RTm - PVm_{H_2})}{RT \cdot (m_{He} - m_{H_2})} ; \\ \frac{m_{H_2}}{m_{He}} &= \frac{(PVm_{He} - RTm) \cdot m_{H_2}}{(RTm - PVm_{H_2}) \cdot m_{He}} ; \\ \frac{m_{H_2}}{m_{He}} &= \frac{\left(2 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2} \cdot 2 \cdot 10^{-2} M^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \frac{KJ}{MOL} - 8.31 \frac{Дж}{MOL \cdot K} \cdot 293K \cdot 5 \cdot 10^{-3} KJ \right)}{\left(8.31 \frac{Дж}{MOL \cdot K} \cdot 293K \cdot 5 \cdot 10^{-3} KJ - 2 \cdot 10^5 \frac{H}{M^2} \cdot 2 \cdot 10^{-2} M^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \frac{KJ}{MOL} \right)} \cdot \\ &\frac{2 \cdot 10^{-3} \frac{KJ}{MOL}}{4 \cdot 10^{-3} \frac{KJ}{MOL}} = 0.5 \end{aligned}$$

Пример 2. Найти относительное число молекул водорода, скорости которых отличаются от наиболее вероятной не более чем на 10 м/с при $t_1=27^{\circ}\text{C}$ и при $t_2= 227^{\circ}\text{C}$.

Решение

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{p}} \cdot \frac{C_2 n^2}{C_1 n_g^2} e^{-n^2/n_g^2} \frac{dn}{n_g} ;$$

Если рассматриваемый интервал скоростей настолько мал, что подинтегральная функция изменяется незначительно, её можно вынести за знак интеграла и искомое относительное число молекул может быть приближённо найдено по формуле

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{p}} \cdot \frac{n^2}{n_g^2} e^{-n^2/n_g^2} \frac{\Delta n}{n_g} ;$$

$$\Delta n = n_2 - n_1 ; \quad n = \frac{n_1 + n_2}{2} = n_g ;$$

$$n_1 = (n_g - 10 \text{ м/с}) ; \quad n_2 = (n_g + 10 \text{ м/с}) ;$$

$$\Delta n = 20 \text{ м/с}$$

$$t_1=27^{\circ}\text{C} \quad n_{g_1} = 15,8 \cdot 10^2 \text{ м/с}$$

$$t_2=227^{\circ}\text{C} \quad n_{g_2} = 20,4 \cdot 10^2 \text{ м/с}$$

$$\frac{\Delta N_1}{N_1} = \frac{4}{\sqrt{p}} \cdot e^{-1} \frac{0,2}{15,8} \approx 0,01 ; \quad \frac{\Delta N_2}{N_2} = \frac{4}{\sqrt{p}} \cdot e^{-1} \frac{0,2}{20,4} \approx 0,0081 ;$$

При росте температуры число молекул вблизи n_g уменьшается.

Пример 3. Идеальный газ с показателем адиабаты g расширили по закону $p = aV$, где a - постоянная. Первоначальный объём газа V_1 . В результате расширения объём увеличился в h раз. Найти:

- приращение внутренней энергии газа;
- работу, совершённую газом;
- молярную теплоёмкость газа в этом процессе.

Решение

$g ; p = a n ;$ $\frac{V_2}{V_1} = h$	Найти: а) $\Delta U = ?$ б) $A = ?$ в) $C_m = ?$
--	---

Для решения задач подобного типа применим термодинамический метод, в основе которого лежит несколько фундаментальных законов, полученных из опыта: уравнение Менделеева – Клапейрона для идеального газа, первое начало термодинамики, выражения для количества теплоты, энергии, работы, совершённой системой, и теплоёмкости газа.

Представив закон расширения газа в виде $PV^{-1} = a$, видим, что процесс можно считать политропическим, с показателем политропы $n = -1$.

а) Найдём начальное и конечное значения внутренней энергии газа

$$U_1 = \nu C_{mm} T_1 = \frac{\nu R T_1}{g-1} = \frac{P_1 V_1}{g-1} = \frac{a V_1^2}{g-1}$$

в последнем равенстве использовано условие задачи $P_1 = a V_1$

$$U_2 = \frac{P_2 V_2}{g-1} = \frac{a V_2^2}{g-1} = \frac{a h^2 V_1^2}{g-1}$$

Здесь также учтено условие задачи $P_2 = a V_2$ и $V_2 = h V_1$
Тогда искомое приращение внутренней энергии газа

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{a V_1^2}{g-1} (h^2 - 1)$$

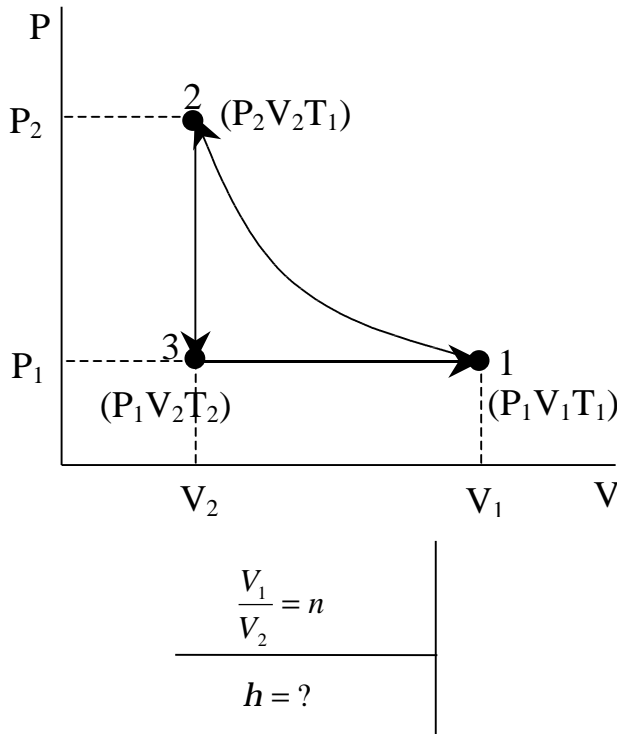
Дальнейшее решение задачи выполняется на основе формул для вычисления физических величин

$$\text{б) } A = \int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{V_1}^{V_2} a V dV = \frac{a V^2}{2} \Big|_{V_1}^{V_2 = hV_1} = \frac{a h^2 V_1^2 - a V_1^2}{2} = \frac{a V_1^2 (h^2 - 1)}{2}$$

$$\text{в) } C_m = \frac{R(n-g)}{(n-1)(g-1)} = \frac{R(g+1)}{2(g-1)} \quad (\text{при } n = -1)$$

Пример 4. Вычислить КПД цикла, состоящего из изотермы, изобары и изохоры, если при изотермическом процессе объём идеального газа с показателем адиабаты g уменьшается в n раз.

Решение



Изобразим цикл на рисунке в координатах p, v и укажем стрелкой направление процесса. КПД произвольного цикла может быть найден по формуле $h = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$, где в числителе стоит алгебраическая сумма теплоты, полученной системой от нагревателя (положительная) и отданной системой холодильнику (отрицательная), в знаменателе – теплота, полученная системой от нагревателя.

Для нахождения знаков теплоты исследуемых процессов в задаче определим соотношение температур T_1 и T_2 . Для состояний (1) и (3) справедливо соотношение:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Отсюда $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} = n$, т. к. $V_1 > V_2$, то $T_1 > T_2$

1. При изотермическом процессе (1→2) для одного моля газа

$$Q_1 = RT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = -RT_1 \ln(n) < 0$$

теплота отрицательна, система отдаёт тепло.

2. При изохорическом процессе (2→3)

$$Q_2 = C_v(T_2 - T_1) = -C_v(T_1 - T_2) < 0$$

газ охлаждается, система также отдаёт тепло.

3. При изобарическом процессе (3→1)

$$Q_3 = C_p(T_1 - T_2) > 0$$

газ нагревается, система получает тепло от нагревателя.

Поэтому КПД

$$h = \frac{Q_3 - Q_1 - Q_2}{Q_3} = 1 - \frac{Q_1 + Q_2}{Q_3}$$

Учитывая, что

$$C_v = \frac{R}{g-1}, \quad C_p = \frac{Rg}{g-1}$$

ПОЛУЧИМ

$$h = 1 - \frac{RT_1 \ln(n) + \frac{RT_1}{(g-1) \left(1 - \frac{1}{n}\right)}}{\frac{Rg}{g-1} T_1 \left(1 - \frac{1}{n}\right)} = 1 - \frac{(g-1)n \ln(n) + (n-1)}{g(n-1)}$$

$$h = 1 - \frac{n-1 + (g-1)n \ln(n)}{g(n-1)}$$

Список литературы

1. Иродов И.Е. Задачи по физике.-3-е издание, 1997