

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Учебное текстовое электронное издание
локального распространения

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
Омского государственного технического университета*

Омск
Издательство ОмГТУ
2023

Составители: *Е. В. Богданова*, ассистент каф. «Физика»;
О. В. Лях, канд. техн. наук, доцент каф. «Физика»;
О. М. Сухарева, ст. преподаватель каф. «Физика»;
Н. Г. Эйсмонт, канд. пед. наук, доцент каф. «Физика»

Рецензент *В. И. Левченко*, канд. техн. наук, доцент каф. «Радиотехнические
устройства и системы диагностики»

Молекулярная физика и термодинамика : практикум / Минобрнауки России, Ом. гос. техн. ун-т ; сост.: *Е. В. Богданова*, *О. В. Лях*, *О. М. Сухарева*, *Н. Г. Эйсмонт*. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – 1 CD-ROM (2,00 Мб). – Систем. требования: процессор с частотой 800 МГц и выше ; 128 Мб RAM и более ; свободное место на жестком диске 300 Мб и более ; Linux / Windows XP и выше ; MacOS X 10.4 и выше ; CD/DVD-ROM-дисковод ; ПО для просмотра pdf- и mp4-файлов. – Загл. с титул. экрана.

Представлены задачи разной трудности, решение которых закрепляет знания, полученные в соответствующем лекционном курсе, и формирует понимание физических законов, определений и взаимосвязей физических величин.

Предназначено для студентов первого курса всех направлений подготовки ОмГТУ, учебный план которых включает дисциплину «Физика».

Редактор *Е. Н. Завьялова*

Компьютерная верстка *Е. В. Макаревиной*

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
I. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ (МКТ).....	6
II. СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ	26
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА	26
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬЦМАНА. БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА	35
III. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА	45
IV. РАБОТА И ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ	56
V. ЭНТРОПИЯ	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	95
ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ	96
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	97
ОТВЕТЫ	102

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное издание – второе в серии практикумов, необходимых для освоения дисциплины «Физика». Данный практикум обеспечивает практическое освоение второго раздела курса общей физики – раздела «Молекулярная физика и термодинамика» – посредством решения учебных задач.

Практикум состоит из пяти разделов, соответствующих темам курса. Каждый раздел включает в себя следующие подразделы:

1. Краткий теоретический материал.

Приведенные теоретические сведения предназначены для освежения в памяти студента основных знаний по соответствующей теме. Объем теоретического блока существенно сокращен по сравнению с лекционным курсом и не является его полноценной заменой.

2. Контрольные вопросы.

Вопросы предназначены для самопроверки студента при его подготовке к предстоящему практическому занятию. Формулируя ответы на поставленные вопросы, студент систематизирует свои знания и добивается более четкого, ясного понимания сути изучаемых физических явлений.

На часть вопросов можно найти ответы непосредственно в тексте пособия, для ответов на другие вопросы необходимо обратиться к курсу лекций и соответствующим учебникам. Некоторые вопросы требуют самостоятельных размышлений.

3. Задачи для аудиторных занятий.

Задачи разделены на три блока в соответствии с уровнем сложности. Задачи первого уровня – подготовительные – предназначены для знакомства с темой, для освоения базовых формул. Задачи второго уровня – основные – служат для тщательной проработки материала, освоения типичных приемов, выработки устойчивых навыков по решению задач соответствующей темы. Задачи третьего уровня – дополнительные – позволят одаренным студентам не скучать, опередив одногруппников при решении задач во время аудиторного занятия. Ответы к аудиторным задачам даны в конце пособия.

Из числа задач для аудиторных занятий могут быть заданы и задачи на дом – для более тщательной проработки и закрепления материала.

4. Индивидуальное домашнее задание.

Здесь приведены задачи, предназначенные для контроля знаний. Преподаватель, ведущий занятия, на свое усмотрение выбирает темы, по которым будет проводиться проверка. Такие задания выдаются индивидуально для каждого студента. Таблица вариантов приведена в конце пособия.

Завершается практикум приложением, в котором приведены справочные материалы, необходимые для решения задач.

Практикум ориентирован на обеспечение качества подготовки обучающихся в техническом вузе, соответствующего требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования, при актуальном объеме курса физики в ОмГТУ. В учебных планах разных направлений подготовки дисциплине «Физика» отводится разное количество времени. Данный практикум дает преподавателю необходимую свободу при подготовке к занятию: большое количество задач разного уровня позволяет подобрать нужные, опираясь на доступный временной объем и стартовый уровень учебной группы.

Приходится также отметить, что в настоящем для всех направлений обучения аудиторного времени совершенно недостаточно для качественного освоения дисциплины. Поэтому большую роль в процессе обучения играет трудолюбие и самодисциплина студента, использование им по назначению всего времени, отведенного на самостоятельную работу и подготовку к занятиям. Данный практикум дает заинтересованному студенту возможность самосовершенствования: не ограничиваясь указаниями преподавателя, он может выполнять дополнительные задания. Наличие ответов к аудиторным задачам позволяет студенту контролировать правильность своих действий.

I. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ (МКТ)

В молекулярной физике свойства макроскопических тел и их агрегатные состояния рассматриваются с точки зрения их молекулярного строения, взаимодействия и движения молекул.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МКТ

Основными положениями МКТ являются следующие утверждения:

1. Любое вещество состоит из мельчайших частиц – молекул и атомов. Они расположены в пространстве дискретно, то есть на некоторых расстояниях друг от друга.

2. Атомы или молекулы вещества находятся в состоянии беспорядочного движения, которое никогда не прекращается.

3. Атомы или молекулы вещества взаимодействуют друг с другом силами притяжения и отталкивания, которые зависят от расстояний между частицами. На расстояниях, сравнимых с размерами молекул (или больше), заметнее проявляется притяжение, а при уменьшении расстояний – отталкивание.

Масса любого тела может быть найдена как

$$m = \rho V, \quad (1.1)$$

где m – масса вещества [m] = кг, V – объем вещества [V] = м³, ρ – плотность вещества [ρ] = кг/м³.

$$m = m_0 N, \quad (1.2)$$

где N – число частиц вещества (атомов или молекул), m_0 – масса частицы вещества.

Концентрация вещества

$$n = \frac{N}{V}; \quad (1.3)$$

$$[n] = \text{м}^{-3}.$$

Количество вещества – это порция вещества с определенным числом структурных частиц. Обозначается ν , $[\nu] = \text{моль}$. Один моль – это количество вещества, в котором содержится примерно $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов. Это число называется *постоянной Авогадро*: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Найти количество вещества можно по следующим формулам:

$$\nu = \frac{N}{N_A}; \quad (1.4)$$

$$\nu = \frac{m}{M}, \quad (1.5)$$

где M – масса одного моля вещества – *молярная масса* ($[M] = \text{кг/моль}$).

Масса частицы, умноженная на число частиц в моле, даст массу моля, т. е. молярную массу:

$$M = m_0 N_A. \quad (1.6)$$

В молекулярной физике состояние тела можно охарактеризовать небольшим числом *макроскопических параметров*, относящихся к системе в целом, а не к отдельным атомам или молекулам: давление, объем, температура, масса, плотность и др.

Параметры, которые можно отнести к одной молекуле макросистемы, называются *микроскопическими*. К микропараметрам состояния можно отнести следующие физические величины: массу молекул, их скорости, среднюю квадратичную скорость молекул, импульсы молекул, среднюю кинетическую энергию молекул и др.

Температура рассматривается как мера средней кинетической энергии движения молекул.

Температурная шкала, началом отсчета которой является абсолютный нуль, а единицей температуры – градус Кельвина, называется *абсолютной температурной шкалой*.

Температура, измеряемая по абсолютной шкале, называется *абсолютной температурой* и обозначается буквой T . Единица абсолютной температуры называется кельвином (К).

Абсолютному нулю ($T = 0$) соответствует температура $t = -273,15$ °С. Поэтому связь абсолютной температуры и температуры по шкале Цельсия дается формулой: $T = t + 273,15$.

В задачах достаточно использовать формулу $T = t + 273$.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Для описания разреженных газов в физике используется модель *идеального газа*. В рамках этой модели делаются следующие допущения:

1. Молекулы газа считаются материальными точками (пренебрегаем их размерами).
2. Пренебрегаем взаимодействием молекул на расстоянии.
3. Соударения молекул друг с другом и со стенками сосуда считаем абсолютно упругими.

Связь между макроскопическими и микроскопическими параметрами идеального газа называется *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа*. Эта связь выводится из законов механики и может иметь вид:

$$p = \frac{2}{3}n\langle E \rangle. \quad (1.7)$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения $\langle E \rangle$ частиц газа – это среднее арифметическое их кинетических энергий поступательного движения:

$$\langle E \rangle = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_N}{N}. \quad (1.8)$$

При установлении теплового равновесия между двумя газами выравниваются средние кинетические энергии поступательного движения их частиц. Следовательно, *температура газа – это мера средней кинетической энергии поступательного движения его частиц.*

Связь средней кинетической энергии поступательного движения частиц и абсолютной температуры газа дается формулой:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT, \quad (1.9)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – *постоянная Больцмана.*

Еще одна запись основного уравнения МКТ имеет вид:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв}}^2, \quad (1.10)$$

где $v_{\text{ср.кв}}$ – средняя квадратичная скорость молекул массой m_0 .

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА.

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Уравнение состояния идеального газа – соотношение, связывающее параметры состояния газа: давление, объем, температуру.

Подставим формулу (1.9) в формулу (1.7). Получаем:

$$p = nkT. \quad (1.11)$$

Из этого соотношения можно получить *уравнение состояния идеального газа*

$$pV = \nu RT, \quad (1.12)$$

которое называется *уравнением Менделеева – Клапейрона*, где $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – *универсальная газовая постоянная.* Оно дает взаимосвязь трех важнейших макроскопических параметров, описывающих

состояние идеального газа: давления, объема и температуры. Также его можно записывать в виде:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (1.13)$$

Закон Дальтона (для смеси газов): давление смеси химически невзаимодействующих газов равно сумме их парциальных давлений.

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots + p_n. \quad (1.14)$$

Парциальное давление – это давление, которое создавал бы данный газ, если бы он один заполнял тот сосуд, в котором находится смесь (разумеется, в том же количестве, в каком он содержится в смеси).

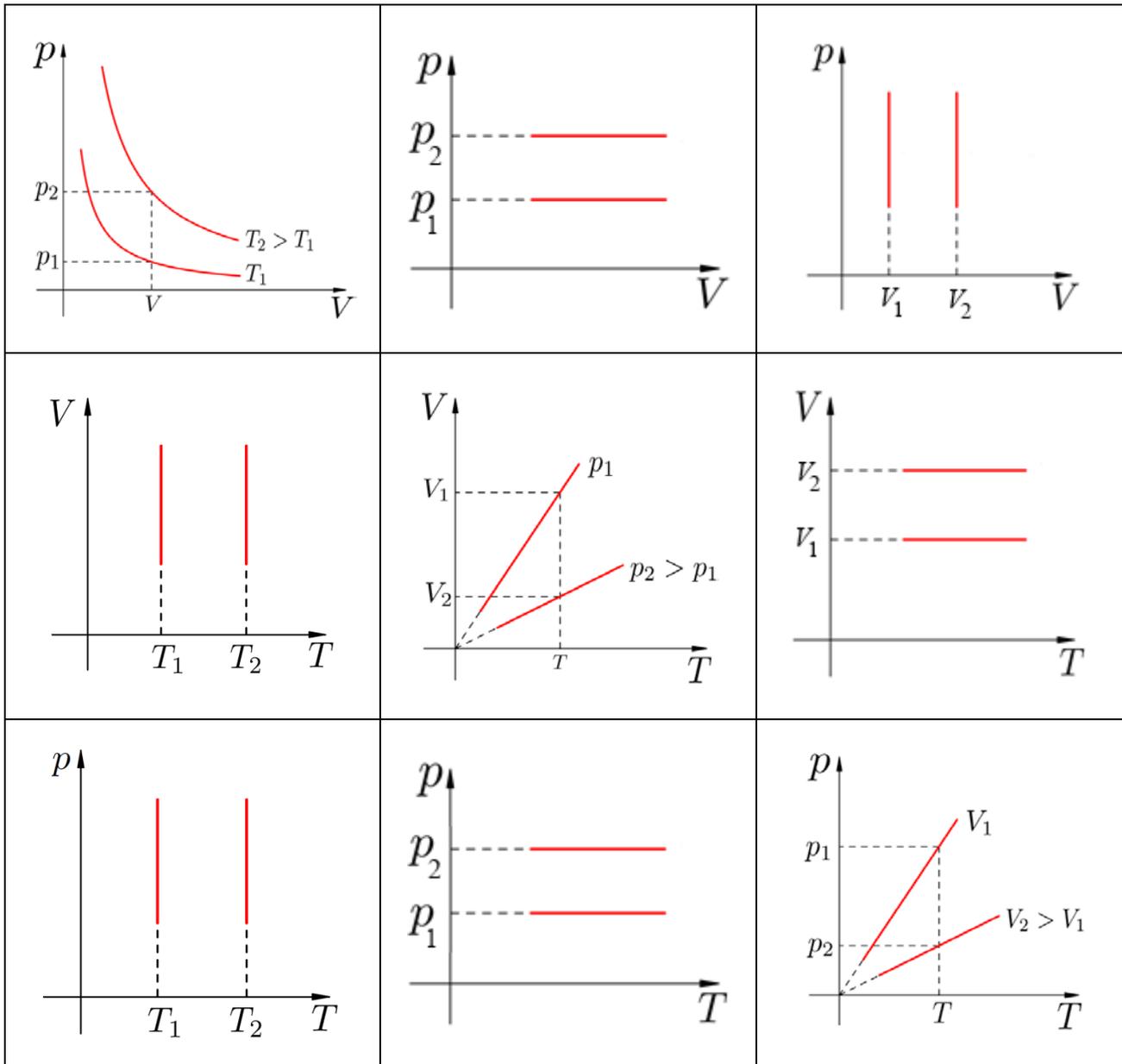
Термодинамический процесс – это изменение состояния газа с течением времени. В ходе термодинамического процесса меняются значения макроскопических параметров газа (p , V , T).

Особый интерес представляют *изопроцессы* – термодинамические процессы, в которых значение одного из макроскопических параметров остается неизменным. В табл. 1.1 сформулированы газовые законы и приведена основная информация об изопроцессах в идеальном газе.

Таблица 1.1

Изопроцессы

$m = \text{const}, M = \text{const}$		
Изотермический процесс	Изобарный процесс	Изохорный процесс
$T = \text{const}$	$p = \text{const}$	$V = \text{const}$
<i>Закон Бойля – Мариотта:</i> для газа данной массы при постоянной температуре произведение давления газа на его объем постоянно.	<i>Закон Гей-Люссака:</i> для газа данной массы при постоянном давлении отношение объема к абсолютной температуре постоянно.	<i>Закон Шарля:</i> для газа данной массы при постоянном объеме отношение давления к абсолютной температуре постоянно.
$pV = \text{const};$ $p_1V_1 = p_2V_2 = \dots = p_nV_n$	$\frac{V}{T} = \text{const};$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots = \frac{V_n}{T_n}$	$\frac{p}{T} = \text{const};$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \dots = \frac{p_n}{T_n}$



Контрольные вопросы

1. Какие системы называют макроскопическими?
2. Назовите основные положения МКТ и запишите основные формулы МКТ.
3. Что такое термодинамическая система? Какая система называется изолированной?
4. Тепловое равновесие и температура.
5. Абсолютная шкала температур. Абсолютный ноль.

6. Модель идеального газа.
7. Средняя кинетическая энергия. Уравнение Клаузиуса. Связь средней кинетической энергии и температуры.
8. Уравнение Менделеева – Клапейрона.
9. Закон Дальтона. Закон Авогадро.
10. Изотермический процесс, закон Бойля – Мариотта и графики процесса.
11. Изобарный процесс, закон Гей-Люссака и графики процесса.
12. Изохорный процесс, закон Шарля и графики процесса.

ЗАДАЧИ ДЛЯ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

I уровень

- 1.1. Вычислите массу молекулы воды.
- 1.2. Какое количество вещества содержится в медном бруске массой 6 кг?
- 1.3. В сосуде находится $5,418 \cdot 10^6$ молекул кислорода. Какое количество вещества, выраженное в молях, находится в этом сосуде?
- 1.4. Капелька воды имеет массу 10^{-10} г. Из скольких молекул она состоит?
- 1.5. Какое количество молекул содержится в 10 г водорода?
- 1.6. Концентрацию молекул одноатомного идеального газа уменьшили в 5 раз. Одновременно в 2 раза увеличили среднюю энергию хаотичного движения молекул газа. Чему равно отношение конечного давления к начальному?
- 1.7. При неизменной концентрации молекул идеального газа средняя квадратичная скорость теплового движения его молекул уменьшилась в 2 раза. Чему равно отношение конечного давления к начальному?
- 1.8. Чему равно соотношение давлений в сосудах с кислородом и водородом, если концентрации газов и среднеквадратичные скорости одинаковы?

1.9. На рис. 1.1 показана зависимость давления от концентрации для двух идеальных газов при фиксированных температурах. Чему равно отношение температур $\frac{T_2}{T_1}$ этих газов?



Рис. 1.1

1.10. При неизменной плотности одноатомного идеального газа давление этого газа увеличивают в 4 раза. Во сколько раз изменяется при этом среднеквадратичная скорость движения его атомов?

1.11. Во сколько раз изменится давление молекул газа на стенки сосуда при уменьшении объема в 3 раза при неизменной температуре?

1.12. Идеальный газ находится в закрытом сосуде при нормальном атмосферном давлении. При неизменной концентрации молекул средняя кинетическая энергия хаотического теплового движения молекул уменьшается на 2 %. Определите конечное давление газа.

1.13. В закрытом сосуде находится идеальный газ при давлении 105750 Па и температуре, соответствующей среднеквадратичной скорости теплового хаотического движения молекул 494 м/с. Чему равна плотность этого газа? Ответ выразите в килограммах на кубический метр и округлите до десятых долей.

1.14. В сосуде находится газ при давлении 0,15 МПа и температуре 273 °С. Какое число молекул находится при этих условиях в единице объема сосуда?

1.15. Кислород при температуре 77 °С и давлении 0,2 МПа занимает объем 10 л. Какова его масса?

1.16. В сосуде находится некоторое количество идеального газа. Во сколько раз изменится температура газа, если он перейдет из состояния 1 в состояние 2 (см. рис. 1.2)?

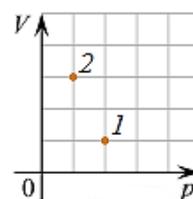


Рис. 1.2

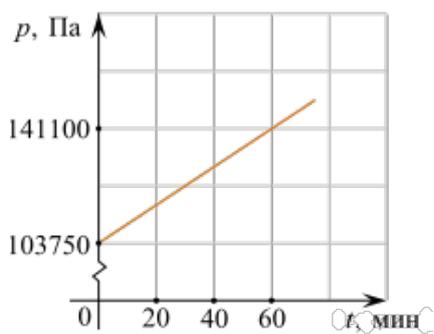


Рис. 1.3

1.17. 4,9 моль идеального газа, находящегося в закрытом сосуде, начинают нагревать. График зависимости давления p этого газа от времени t изображен на рис. 1.3. Через 60 минут после начала нагревания температура газа стала равна 350 К. Чему равен объем сосуда, в котором находится газ?

1.18. В закрытом сосуде содержится идеальный газ при температуре 27 °С. Температуру газа повысили до 177 °С. Во сколько раз изменилось давление этого газа?

1.19. Зная плотность воздуха при нормальных условиях, найдите молярную массу воздуха.

1.20. Газ изотермически сжат от объема 8 л до объема 6 л. Давление при этом возросло на $4 \cdot 10^3$ Па. Определите первоначальное давление.

1.21. Идеальный газ сжимают изотермически так, что давление газа изменяется в 3 раза. На сколько при этом изменяется объем, занимаемый газом, если начальный объем равен 6 л?

1.22. На рис. 1.4 точки 1 и 2 соответствуют состояниям одной и той же массы идеального газа. Установите, в каком из указанных состояний и во сколько раз больше: а) давление; б) объем; в) температура.

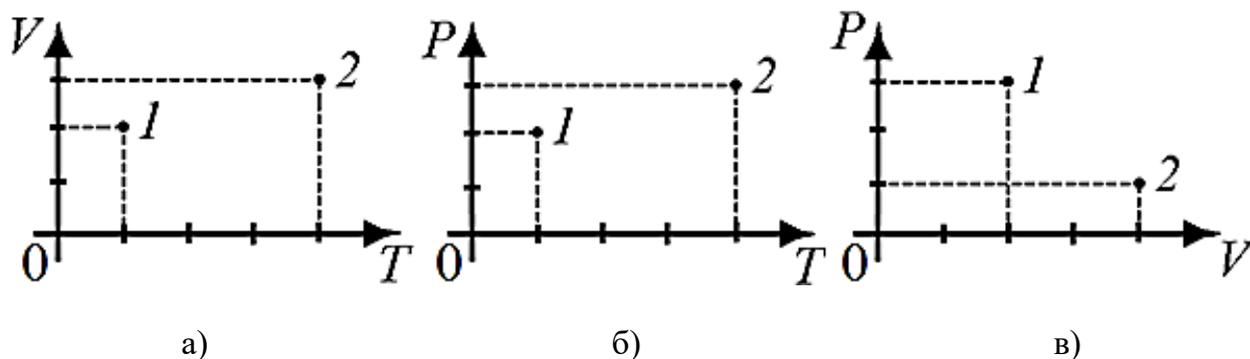


Рис. 1.4

II уровень

1.23. В горизонтально лежащей пробирке находится воздух, заблокированный ртутью. Уровень воздуха в горизонтальном состоянии 27 см, длина столбика ртути 17 см. Пробирку переворачивают в вертикальное положение так, что незапаянный конец пробирки находится сверху. Каков будет уровень воздуха в вертикальном положении, если длина столбика ртути не меняется, а атмосферное давление составляет 748 мм рт. ст.?

1.24. Чему равна средняя энергия поступательного движения молекулы водорода, если 2,5 кг этого газа, занимая объем 2 м^3 , производят давление $1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$?

1.25. Оцените скорость молекул идеального газа, имеющего плотность $1,8 \text{ кг/м}^3$ при давлении $1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

1.26. Из открытого стакана за 20 суток испарилась вода массой 200 г. Сколько молекул испарилось за 1 с?

1.27. Какая масса углекислого газа CO_2 растворена в бутылке с лимонадом объемом 0,5 л, если на одну молекулу газа приходится $5,56 \cdot 10^{18}$ молекул воды?

1.28. Если пометить все молекулы в одном стакане воды и вылить эту воду в Мировой океан, а потом вновь зачерпнуть стакан воды, то сколько в нем будет меченых молекул? Объем воды Мирового океана $1,335 \cdot 10^9 \text{ км}^3$, объем стакана 200 см^3 .

1.29. Оцените число ударов молекул воздуха о поверхность оконного стекла площадью 1 м^2 со стороны аудитории за интервал времени 1 с. Температура воздуха в аудитории $27 \text{ }^\circ\text{C}$, давление 10^5 Па , молярная масса воздуха 29 г/моль .

1.30. Атмосферное давление на пике Ленина (высота 7134 м над уровнем моря) $p_1 = 3,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Определите плотность воздуха ρ_1 на вершине при температуре $t_1 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, если при нормальных условиях ($t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_0 = 10^5 \text{ Па}$) плотность воздуха $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$.

1.31. Горизонтальный цилиндр с газом разделен на три камеры двумя неподвижными поршнями. Температура газа во всех камерах одинакова

и равна T_0 . Давление газа в первой камере p_1 , объем V_1 , во второй – p_2 , V_2 , в третьей – соответственно p_3 , V_3 . Каково будет давление p в камерах после того, как, освободив поршни, дать им возможность свободно двигаться, а температуру газа сделать равной T ?

1.32. На рис. 1.5 показан циклический процесс, совершаемый над идеальным газом, причем $1-2$ – изохорный, $2-3$ – изобарный процессы. Температуры газа в точках 1 и 3 равны соответственно $T_1 = 300$ К и $T_3 = 400$ К. Найдите температуру T_2 газа в точке 2 .

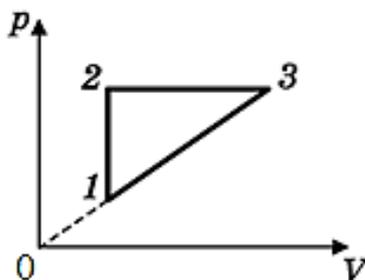


Рис. 1.5

1.33. При изотермическом сжатии объем газа уменьшился на 1 л. При этом его давление возросло на 20 %. На сколько процентов увеличилось бы давление, если бы объем был уменьшен на 2 л?

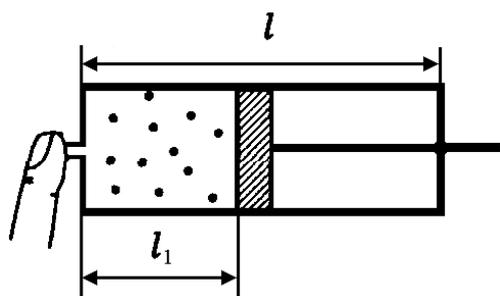


Рис. 1.6

1.34. Выходное отверстие велосипедного насоса диаметром 4 мм зажато пальцем (см. рис 1.6). Найдите силу давления воздуха на палец со стороны газа в сосуде в момент, когда поршень, сжимая воздух, не доходит до конца насоса на расстояние $l_1 = 2$ см. Длина насоса $l = 42$ см. Процесс считать изотермическим.

1.35. При давлении $2 \cdot 10^6$ Па идеальный газ занимает объем 5 л. В результате изотермического расширения его объем увеличивается на 1 л, а концентрация молекул становится равной $3,62 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$. При какой температуре протекал этот процесс?

1.36. Температура воздуха в горизонтальном цилиндре с поршнем равна 7°C . На какое расстояние переместится поршень при нагревании воздуха на 20 K , если изначально он находился на расстоянии 14 см от торца цилиндра?

1.37. Сколько молекул воздуха выходит из комнаты объемом 80 м^3 при повышении температуры от 15°C до 27°C ?

1.38. В цилиндре под поршнем площадью 100 см^2 и массой 50 кг находится воздух при температуре 7°C . Поршень находится на высоте 60 см от дна цилиндра. Воздух в цилиндре нагревают до 47°C , а на поршень ставят гирю массой 100 кг . На сколько опустится или поднимется поршень? Трением поршня о стенки цилиндра можно пренебречь.

1.39. На рис. 1.7 даны параметры двух состояний газа. Требуется совершить переход из состояния 1 в состояние 2 с помощью: а) изобары и изотермы; б) изотермы и изохоры; в) изобары и изохоры. Начертите в координатах p - T каждый из указанных переходов.

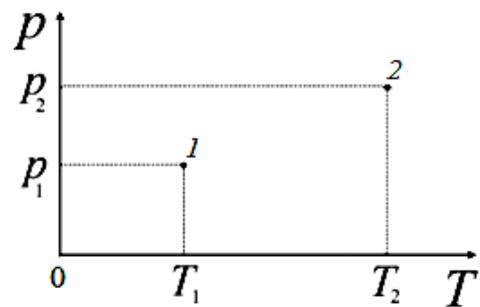


Рис. 1.7

1.40. Определите плотность смеси, содержащей 12 г аргона и 20 г криптона, при температуре 17°C и общем давлении 10^4 Па .

1.41. Два баллона с объемами $V_1 = 5\text{ л}$ и $V_2 = 7\text{ л}$ соединены короткой трубкой с краном. При закрытом кране баллоны заполняют газом до давлений $p_1 = 720\text{ мм рт. ст.}$ и $p_2 = 400\text{ мм рт. ст.}$ Определите установившееся давление газа в баллонах при открытии крана, если температура газов не изменилась.

1.42. Сосуд емкостью V разделен пополам полупроницаемой перегородкой. В одну половину сосуда введен водород массой m_1 и азот массой m_2 , а в другой половине вакуум. Через перегородку может диффундировать только водород. Какое давление установится в каждой части сосуда? Температуру газов считать постоянной и равной T . Молярная масса водорода равна M_1 , азота — M_2 .

III уровень

1.43. Два одинаковых сосуда соединены трубкой с клапаном, пропускающим газ из одного баллона в другой при разности давлений $\Delta p \geq 1,1$ атм. Сначала в одном баллоне был вакуум, а в другом идеальный газ при температуре 19°C под давлением 1 атм. Затем оба баллона нагрели до температуры 107°C . Найдите давление газа в баллоне, где был вакуум.

1.44. В вертикальном цилиндрическом сосуде находится идеальный газ, разделенный на две части тяжелым поршнем. Под поршнем масса газа в $n = 3$ раза больше, чем над поршнем. При одинаковой во всем объеме цилиндра температуре объемы газа над поршнем и под ним одинаковы. Чему будет равно отношение объемов газа над и под поршнем V_2/V_1 , если температуру во всем объеме цилиндра увеличить в $k = 2$ раза? Трение не учитывать.

1.45. Озеро «посолили», бросив пачку поваренной соли NaCl массой 1 кг. После полного растворения соли из озера зачерпнули стакан воды объемом 250 см^3 . Считая, что вода в озере до растворения соли была абсолютно пресной, найдите, сколько ионов натрия оказалось бы в этом стакане, если это:

- | | | |
|---------------------|---------------|--------------------|
| а) Ладожское озеро; | д) Ильмень; | и) Удьяль; |
| б) Таймыр; | е) Нюк; | к) Онежское озеро; |
| в) Убсу-Нур; | ж) Ковдозеро; | л) Красное озеро; |
| г) Лабаз; | з) Кизи; | м) Маныч-Гудило. |

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Основное уравнение МКТ и газовые законы

1.46. Какое давление должен выдерживать газовый баллон объемом 60 л, чтобы при температуре 30°C в нем можно было хранить 3 кг метана?

1.47. Давление газа в электронно-лучевой трубке телевизионного кинескопа $p \approx 10^{-9}$ атм. Какое число молекул газа содержится в объеме 1 см^3 при комнатной температуре?

1.48. Средняя квадратичная скорость молекул аргона равна 400 м/с , в одном кубическом метре находится $5 \cdot 10^{25}$ частиц. Какое давление оказывают на стенки сосуда молекулы аргона?

1.49. Вакуумный насос позволяет понижать давление до 10^{-12} мм рт. ст. Сколько молекул газа содержится в объеме 1 см^3 при этом давлении и температуре $48 \text{ }^\circ\text{C}$?

1.50. Каково количество вещества в газе, если объем газа равен 3 л при температуре $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 356 мм рт. ст. ?

1.51. Сколько молекул газа находится в сосуде объемом 500 см^3 при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 300 кПа ?

1.52. Какое давление рабочей смеси устанавливается в цилиндрах двигателя автомобиля, если к концу такта сжатия температура газовой смеси автомобиля повышается с $50 \text{ }^\circ\text{C}$ до $250 \text{ }^\circ\text{C}$, а ее объем уменьшается с $0,75$ до $0,12 \text{ л}$? Первоначальное давление 80 кПа .

1.53. Какое давление на стенки сосуда производит кислород, если средняя квадратичная скорость его молекул 500 м/с и в объеме 2 см^3 число молекул $9 \cdot 10^{19}$?

1.54. В цилиндре дизельного двигателя автомобиля температура воздуха в начале такта сжатия была $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Найдите температуру воздуха в конце такта, если его объем уменьшается в 17 раз, а давление возрастает в 50 раз.

1.55. Газ плотностью $5,95 \text{ кг/м}^3$ находится при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Найдите давление газа, если масса молекулы $7,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

1.56. После увеличения абсолютной температуры в $1,3$ раза давление газа в закрытом баллоне увеличилось на 150 кПа . Каким было начальное давление?

1.57. Гелий находился при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Кинетическая энергия хаотического теплового движения всех молекул газа равна 10 Дж . Чему равно число молекул гелия?

1.58. Когда солнце нагрело баллон с газом на 15 К, показание манометра на баллоне увеличилось от 19 до 20 атм. Какой была начальная температура баллона?

1.59. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул идеального газа, если при давлении в 2 атм в одном кубическом сантиметре газа содержится $5 \cdot 10^{22}$ молекул.

1.60. Идеальный газ нагревают от 300 К до 750 К при постоянном давлении, в результате чего его объем увеличивается на 6 л. Определите первоначальный объем газа.

1.61. На сколько изменится средняя кинетическая энергия атома неона, если его температура уменьшится в 4 раза? Начальное значение энергии $7 \cdot 10^{-21}$ Дж.

1.62. Какой объем занимает газ при температуре 300 К и давлении 414 Па, если число молекул газа составляет $5 \cdot 10^{24}$?

1.63. Газ в трубе плавильной печи охлаждается от 1150 °С до 200 °С. Во сколько раз увеличивается плотность газа при этом? Давление газа не меняется.

1.64. В баллоне объемом 3 л содержится газ при температуре 177 °С и давлении 2 атм. Найдите объем газа при температуре 27 °С и давлении 1 атм.

1.65. Определите давление воздуха в сосуде объемом 2 л, если его масса 12 г, а температура 27 °С.

1.66. Определите, на сколько изменилась кинетическая энергия 10^5 атомов гелия при изменении температуры от 27 °С до 47 °С.

1.67. Идеальный газ расширяют изотермически так, что объем газа изменяется в 1,4 раза, а давление на 2 атм. Найдите начальное давление газа.

1.68. Гелий находится при температуре 27 °С. Кинетическая энергия теплового движения всех молекул газа 10 Дж. Определите число молекул газа.

1.69. Баллон содержит газ при температуре 300 К и давлении 200 кПа. Каким будет давление в баллоне, когда из него будет выпущено 0,7 массы газа, а температура понизится до 273 К?

1.70. В баллоне емкостью 50 л находится одноатомный газ в количестве 0,12 кмоль при давлении 6 МПа. Определите среднюю энергию теплового движения молекул газа.

1.71. В баллоне находится газ при температуре 15 °С. Во сколько раз уменьшится давление газа, если 40 % его выйдет из баллона, а температура при этом понизится на 8 °С?

1.72. При давлении 1 атм и температуре 15 °С воздух имеет объем 2 л. При каком давлении данная масса воздуха займет объем 4 л, если его температура станет 20 °С?

1.73. Определите плотность водорода при температуре 17 °С и давлении 204 кПа.

1.74. Когда из сосуда выпустили некоторое количество газа, давление в нем упало на 40 %, а абсолютная температура на 10 %. Какую часть газа выпустили?

1.75. Каково давление газа, если в каждом кубическом сантиметре его содержится 10^6 молекул, а температура газа 87 °С?

Изопроцессы

1.76. На рис. 1.8 представлен процесс, проводимый с идеальным газом. Необходимо: а) изобразить этот процесс на $V-T$ -диаграмме; б) определить, во сколько раз температура газа в состоянии 4 больше температуры в состоянии 1.

1.77. На рис. 1.9 представлен процесс, проводимый с идеальным газом. Необходимо: а) изобразить этот процесс на $p-V$ -диаграмме; б) определить, в каком состоянии, 2 или 4, объем больше и во сколько раз.

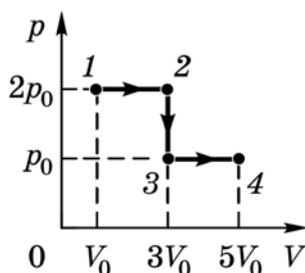


Рис. 1.8

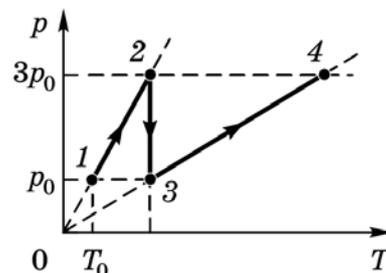


Рис. 1.9

1.78. На рис. 1.10 изображена p - V -диаграмма цикла, проводимого с ν молями одноатомного газа. Точки a и b принадлежат изотерме, известно, что $p_1 = p$; $V_1 = V$; $V_2 = 8V$. Необходимо: а) изобразить этот процесс на V - T -диаграмме; б) найти температуру и давление в состоянии a .

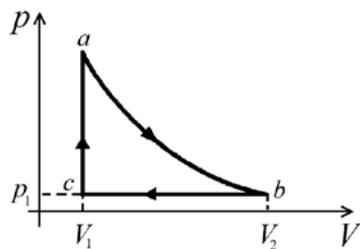


Рис. 1.10

1.79. На рис. 1.11 показан цикл, совершаемый над идеальным газом. Необходимо: а) изобразить этот процесс на V - T -диаграмме; б) определить отношение максимальной и минимальной плотностей газа, достигаемых в ходе этого цикла.

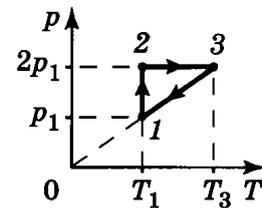


Рис. 1.11

1.80. На рис. 1.12 показан цикл, совершаемый над идеальным газом. Необходимо: а) изобразить этот процесс на p - T -диаграмме; б) определить отношение максимальной и минимальной плотностей газа, достигаемых в ходе этого цикла.

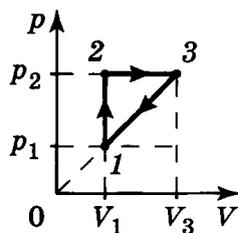


Рис. 1.12

1.81. На рис. 1.13 изображен график процесса, происходящего с одним молем идеального газа. Участки $4-1$ и $2-3$ – изотермы. Необходимо: а) изобразить этот процесс на V - T -диаграмме; б) найти объем V_3 , если V_1 и $V_2 = V_4$ заданы.

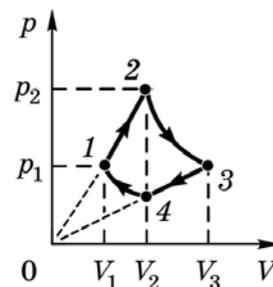


Рис. 1.13

1.82. На рис. 1.14 изображена диаграмма цикла, совершаемого идеальным газом. Необходимо: а) изобразить этот процесс на p - V -диаграмме; б) найти отношение наибольшего давления газа в этом цикле к наименьшему.

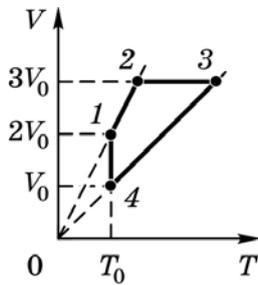


Рис. 1.14

1.83. На рис. 1.15 изображена диаграмма цикла, совершаемого идеальным газом. Необходимо: а) изобразить этот процесс на p - V -диаграмме; б) найти отношение наибольшего давления газа в этом цикле к наименьшему.

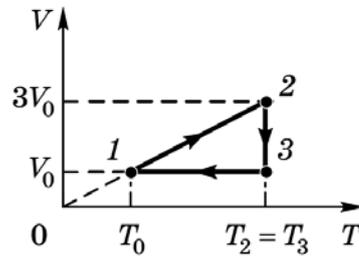


Рис. 1.15

1.84. На рис. 1.16 изображена диаграмма цикла, совершаемого идеальным газом. Необходимо: а) изобразить этот процесс на p - V -диаграмме; б) найти отношение наибольшего объема газа в этом цикле к наименьшему.

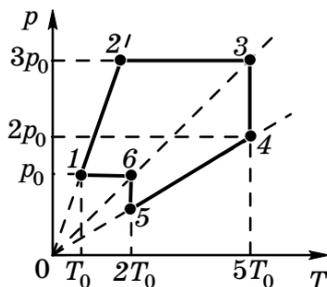


Рис. 1.16

1.85. Идеальный газ совершает цикл, график которого показан на рис. 1.17. Необходимо: а) изобразить этот процесс на p - T -диаграмме; б) определить отношение наибольшей и наименьшей температур в этом процессе.

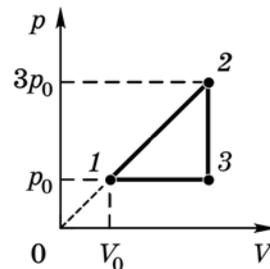


Рис. 1.17

1.86. На рис. 1.18 изображен график процесса, происходящего с одним молем идеального газа. Необходимо: а) изобразить этот процесс на p - T -диаграмме; б) найти отношение наибольшего объема газа в этом процессе к наименьшему.

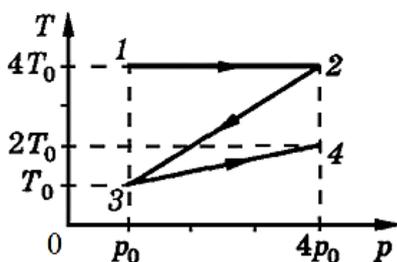


Рис. 1.18

1.87. На рис. 1.19 представлен график некоторого процесса, происходящего с одним молем идеального газа. Необходимо: а) изобразить этот процесс на p - V -диаграмме; б) найти максимальный и минимальный объемы газа в этом процессе, если известно, что $p_1 = p$; $p_2 = 3p$; $T_1 = T$; $T_2 = 4T$.

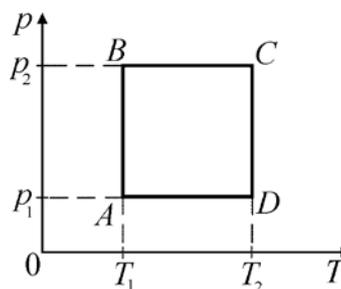


Рис. 1.19

1.88. Идеальный газ совершает процесс, представленный на рис. 1.20. Необходимо: а) изобразить график этого процесса в $(p; T)$ и $(V; T)$ координатах; б) найти отношение максимальной и минимальной температур в этом процессе.

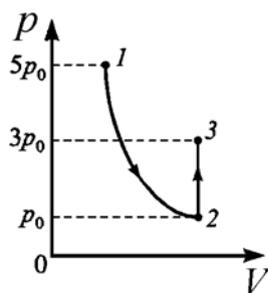


Рис. 1.20

1.89. На рис. 1.21 изображен цикл, проведенный с ν молями газа. Известно, что $p_1 = p_0/2$; $p_2 = p_0$; $V_1 = V_0$; $V_2 = 2V_0$. Необходимо: а) представить диаграмму цикла в $(T; p)$ координатах; б) определить максимальное значение температуры в циклическом процессе.

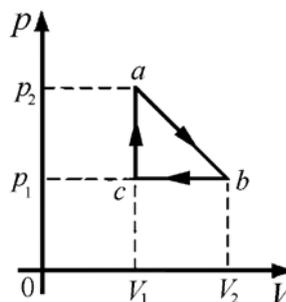


Рис. 1.21

1.90. На рис. 1.22 изображен цикл, проведенный с ν молями газа. Известно, что $p_a = 3p_0/4$; $p_b = p_0/2$; $V_a = 3V_0/2$; $V_b = 2V_0$. Необходимо: а) изобразить диаграмму цикла в $(T; p)$ координатах; б) определить наименьшее значение температуры в циклическом процессе.

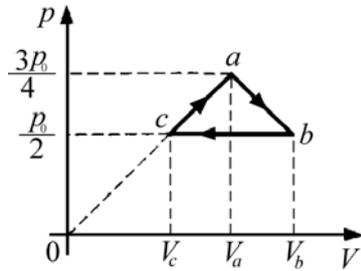


Рис. 1.22

II. СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

Для идеального газа в условиях статистического равновесия в отсутствие внешних силовых полей справедливы некоторые статистические закономерности.

Вследствие хаотичного движения молекул газа все направления движения молекул являются равновероятными. В результате многократных взаимных соударений скорость каждой молекулы изменяется как по модулю, так и по направлению, но в любом направлении в среднем движется одинаковое число молекул.

Из МКТ следует, что как бы ни изменялись скорости молекул при столкновениях, средняя квадратичная скорость молекул массой m_0 в газе при $T = \text{const}$ остается постоянной и равной

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (2.1)$$

Это объясняется тем, что в газе, находящемся в равновесии, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям, которое подчиняется некоторому статистическому закону. Теоретически этот закон выведен Дж. Максвеллом. Закон Максвелла описывается некоторой функцией $f(v)$, называемой функцией Максвелла, или функцией распределения молекул по скоростям. Она определяет долю молекул dN из общего числа молекул N идеального газа, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $(v + dv)$:

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv}. \quad (2.2)$$

Ее вид задается уравнением (2.3):

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}. \quad (2.3)$$

На рис. 2.1 изображен вид этой функции, отмечены характеристические скорости распределения Максвелла и проиллюстрирован графический смысл распределения – площадь фигуры под частью кривой равна доле частиц от их общего количества $\frac{dN}{N}$, обладающих скоростями в соответствующем диапазоне $(v, v + dv)$.

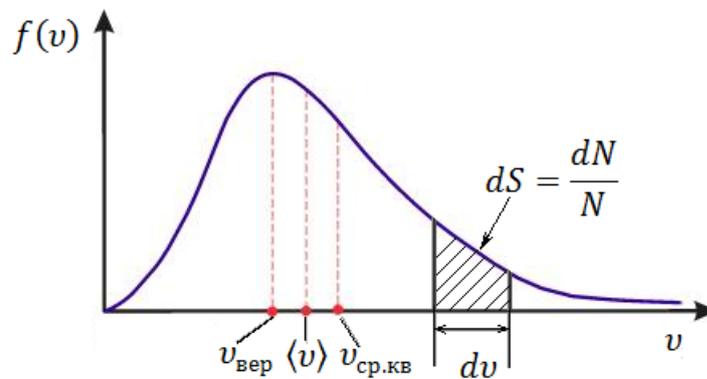


Рис. 2.1

Из уравнения (2.3) видно, что конкретный вид функции зависит от рода газа (массы молекулы m_0) и от параметров состояния (температуры T).

Площадь, ограниченная кривой $f(v)$ (рис. 2.1) и осью абсцисс, равна 1:

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1. \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) носит название условия нормировки.

Скорость, при которой функция распределения молекул по скоростям максимальна, называется наиболее вероятной.

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}. \quad (2.5)$$

Средняя арифметическая скорость движения молекул находится так:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v dN(v) = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (2.6)$$

Для определения числа молекул, обладающих скоростями, лежащими в интервале от v_1 до v_2 , необходимо вычислить интеграл вида:

$$\frac{\Delta N}{N} = \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv, \quad (2.7)$$

т. е. найти площадь под кривой $f(v)$ в заданном интервале скоростей (рис. 2.1).

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический смысл функции распределения Максвелла?
2. От чего зависит функция распределения Максвелла?
3. Условие нормировки функции распределения Максвелла.
4. Объясните разницу между следующими понятиями: среднеквадратичная скорость, наиболее вероятная скорость, средняя скорость.
5. От чего зависит положение максимума функции распределения Максвелла и его высота?

ЗАДАЧИ ДЛЯ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

I уровень

2.1. На рис. 2.2 представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла), где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале скоростей от v до $v + dv$, в расчете на единицу этого интервала.

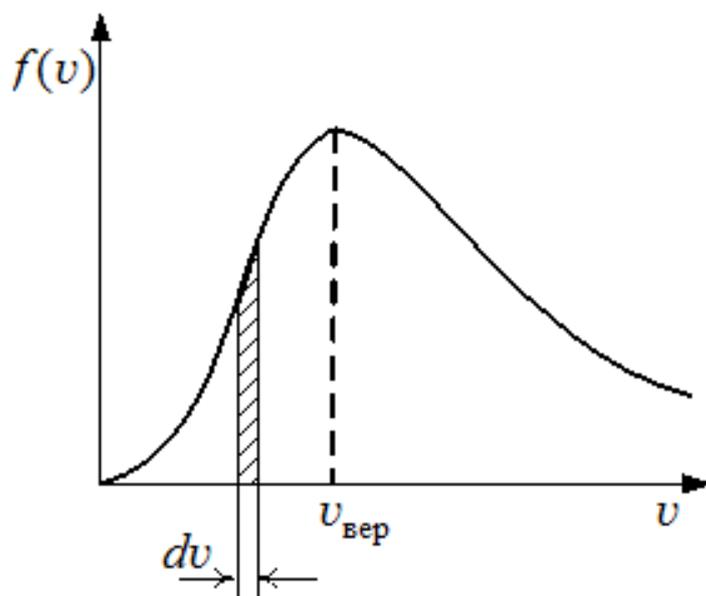


Рис. 2.2

Дайте ответы с обоснованием на следующие вопросы:

1. От чего зависит положение максимума кривой? Зависит от температуры? От природы газа?

2. Как меняется положение максимума функции (максимум смещается вправо, влево) с ростом температуры? С понижением температуры?

3. Как будет меняться площадь заштрихованной полоски с ростом температуры? С убывью температуры?

4. Как изменится высота максимума с убывью температуры (увеличится, уменьшится)?

5. Чему равна площадь заштрихованной полоски?

6. Как изменяется площадь под кривой при любом изменении температуры?

2.2. Как изменится средняя скорость молекул идеального газа при увеличении температуры в n раз?

2.3. В трех сосудах находятся газы, причем для температур и масс молекул газов имеют место следующие соотношения: $T_1 = T_2 = T_3$, $m_{01} = 4m_{02} = 2m_{03}$. На рис. 2.3 схематически представлены графики распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение

Максвелла) для этих газов, где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале от v до $(v + dv)$, в расчете на единицу этого интервала. Выберите верные для этого графика утверждения и обоснуйте свой выбор.

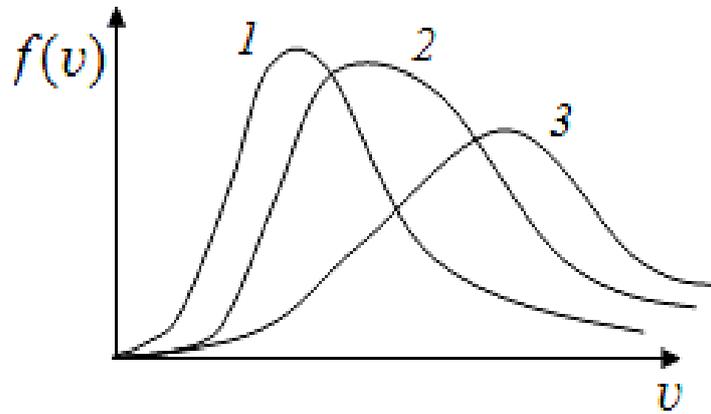


Рис. 2.3

а) Кривая 1 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 2;

б) кривая 3 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 1;

в) кривая 2 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 2;

г) кривая 3 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 3.

2.4. В трех сосудах находятся газы, причем для температур и масс молекул газов имеют место следующие соотношения: $T_1 = 2T_2 = 4T_3$, $m_{01} = m_{02} = m_{03}$. На рис. 2.3 схематически представлены графики распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла) для этих газов, где $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале от v до $(v + dv)$, в расчете на единицу этого интервала. Выберите верные для этого графика утверждения и обоснуйте свой выбор.

а) Кривая 1 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 2;

б) кривая 3 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 1;

в) кривая 2 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 2;

г) кривая 3 соответствует распределению по скоростям молекул газа в сосуде 3.

2.5. На рис. 2.2 представлен график функции распределения молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла), $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$ – доля молекул, скорости которых заключены в интервале от v до $(v + dv)$, в расчете на единицу этого интервала. Если, не меняя температуры, взять другой газ с большей молярной массой и таким же числом молекул, то:

а) величина максимума уменьшится;

б) площадь под кривой увеличится;

в) максимум кривой сместится влево, в сторону меньших скоростей;

г) максимум кривой сместится вправо, в сторону больших скоростей.

II уровень

2.6. Зная вид функции распределения по скоростям $f(v)$, выведите функцию распределения $\varphi(u)$, где $u = v/v_{\text{вер}}$ (относительная скорость молекул идеального газа). Сделайте при выводе пояснения алгебраического типа. Нарисуйте график функции $\varphi(u)$.

2.7. Зная функцию распределения молекул по скорости, выведите формулу наиболее вероятной скорости.

2.8. Найдите среднюю арифметическую, среднюю квадратичную и наиболее вероятную скорости молекул газа, плотность которого при давлении 300 мм рт. ст. равна 0,3 г/л.

2.9. Определите температуру кислорода, при которой функция распределения по скоростям будет иметь максимум при скорости $v = 420$ м/с.

2.10. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул азота больше их наиболее вероятной скорости на 50 м/с?

2.11. Определите относительное число молекул идеального газа, скорости которых заключены в пределах от нуля до одной сотой наиболее вероятной скорости.

2.12. Какая часть молекул кислорода при 100 °С обладает скоростями от 150 м/с до 160 м/с?

2.13. Найдите для газообразного азота температуру, при которой скоростям молекул 300 и 600 м/с будут соответствовать одинаковые значения функции распределения Максвелла.

2.14. Водород находится при температуре $T = 273$ К. Найдите относительное число молекул водорода, скорости которых лежат в интервале от $v_{\text{вер}}$ до $(v_{\text{вер}} + \Delta v)$, где $\Delta v = 1$ м/с, $v_{\text{вер}}$ – наиболее вероятная скорость.

2.15. Определите относительное число молекул азота, скорости которых при температуре $T = 300$ К заключены в пределах от $\langle v \rangle$ до $(\langle v \rangle + \Delta v)$, где $\Delta v = 2$ м/с, $\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул.

2.16. Определите температуру водорода, при которой средняя квадратичная скорость молекул больше их наиболее вероятной скорости на $\Delta v = 400$ м/с.

2.17. Во сколько раз средняя квадратичная скорость молекул водорода больше средней квадратичной скорости молекул водяных паров при той же температуре?

III уровень

2.18. Зная функцию распределения молекул по скоростям, выведите формулу для расчета: а) средней арифметической скорости молекул $\langle v \rangle$; б) средней квадратичной скорости $v_{\text{ср.кв}}$.

2.19. Распределение молекул по скоростям в пучке, выходящем из небольшого отверстия в сосуде, описывается функцией $F(v) = Av^3 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$, где T – температура газа внутри сосуда, A – некая константа. Найдите наиболее вероятные значения:

- а) скорости молекул в пучке; сравните полученную величину с наиболее вероятной скоростью молекул в сосуде;
- б) кинетической энергии молекул в пучке.

2.20. Какая часть общего числа N молекул имеет скорости: а) больше наиболее вероятной скорости и 2) меньше наиболее вероятной скорости?

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

2.21–2.50. Величины, которые необходимо рассчитать в индивидуальном домашнем задании, определяются преподавателем и разделяются по сложности на два уровня: I уровень – пункты а, б, в, г, д; II уровень – пункты е, ж, з.

Идеальный газ находится в сосуде при температуре T . Тип газа и значение температуры T по вариантам приведены в табл. 2.1.

Определите:

- а) молярную массу газа;
- б) наиболее вероятную скорость молекул $u_{\text{вер}}$ (положение максимума распределения Максвелла) при температуре T (здесь и далее округляйте результаты до трех значащих цифр);
- в) максимальное значение функции распределения Максвелла f_{max} (величину максимума) при температуре T ;
- г) наиболее вероятную кинетическую энергию поступательного движения молекул $\epsilon_{\text{вер}}$ при температуре T ;
- д) среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул ϵ при температуре T ;

- е) среднюю квадратичную скорость молекул $v_{\text{ср.кв}}$ при температуре T ;
- ж) значение функции распределения Максвелла $f(v_{\text{ср.кв}})$, соответствующее этой скорости, при температуре T ;
- з) долю молекул от общего числа частиц, имеющих при температуре T скорости в интервале от $v_{\text{вер}}$ до $(1,01 \cdot v_{\text{вер}})$.

Таблица 2.1

Исходные данные для задач 2.21–2.50

	Газ	$T, \text{ К}$		Газ	$T, \text{ К}$
2.21	азот	300	2.36	азот	400
2.22	аммиак	400	2.37	аммиак	500
2.23	аргон	500	2.38	аргон	600
2.24	бутан	600	2.39	бутан	700
2.25	водород	700	2.40	водород	300
2.26	водяной пар	300	2.41	водяной пар	400
2.27	гелий	400	2.42	гелий	500
2.28	кислород	500	2.43	кислород	600
2.29	метан	600	2.44	метан	700
2.30	неон	700	2.45	неон	300
2.31	озон	300	2.46	озон	400
2.32	пропан	400	2.47	пропан	500
2.33	угарный газ	500	2.48	угарный газ	600
2.34	углекислый газ	600	2.49	углекислый газ	700
2.35	сероводород	700	2.50	сероводород	300

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬЦМАНА. БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

Распределение Больцмана – это статистическое распределение частиц системы по потенциальным энергиям во внешних потенциальных силовых полях (гравитационном, электрическом и др.) (2.8):

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_{\text{п}}}{kT}\right), \quad (2.8)$$

где n – концентрация частиц в области пространства, где они обладают потенциальной энергией $E_{\text{п}}$;

n_0 – концентрация частиц в области пространства, где они обладают потенциальной энергией $E_{\text{п}} = 0$;

k – постоянная Больцмана;

T – температура системы.

Если молекулы газа находятся в однородном гравитационном поле Земли ($g = \text{const}$ – ускорение свободного падения), то можно найти распределение по их потенциальным энергиям, т. е. установить концентрацию частиц с определенным значением потенциальной энергии на произвольной высоте над поверхностью Земли в изотермической атмосфере (2.9):

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{kT}\right), \quad (2.9)$$

где n – концентрация частиц газа на высоте h ;

n_0 – концентрация частиц газа на высоте $h = 0$;

m_0 – масса одной частицы (молекулы);

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура системы.

Из распределения Больцмана для молекул газа в гравитационном поле Земли вытекает зависимость атмосферного давления от высоты над поверхностью Земли, которая математически записывается в виде *барометрической формулы* (2.10):

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{kT}\right) = p_0 \exp\left(-\frac{M g h}{RT}\right), \quad (2.10)$$

где p – атмосферное давление на высоте h ;

p_0 – атмосферное давление на высоте $h = 0$;

M – молярная масса газа;

R – универсальная газовая постоянная.

Эта формула справедлива в случае, если пренебречь изменением температуры атмосферы, ускорения свободного падения и молярной массы воздуха при изменении высоты.

В зависимости от значений температуры газа и его молярной массы убывание концентрации молекул с увеличением высоты происходит по-разному. Качественно зависимость концентрации молекул (и давления газа) от высоты для разных значений температуры и молярной массы газа показана на рис. 2.4.

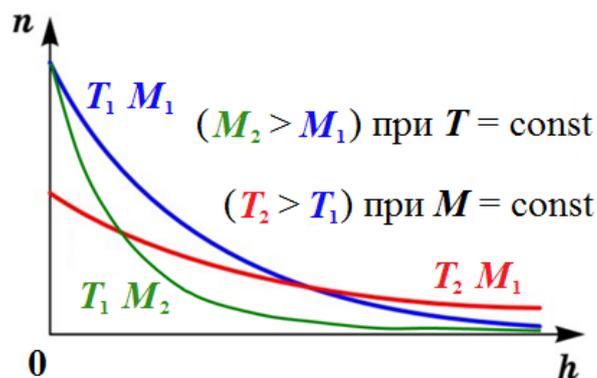


Рис. 2.4

Отсюда следуют некоторые закономерности:

1. С уменьшением температуры T число молекул на высотах, отличных от нуля, убывает быстрее.
2. При высоких температурах молекулы оказываются распределенными по высоте более равномерно.
3. Число более тяжелых молекул с высотой убывает быстрее, чем легких.

Контрольные вопросы

1. Что такое функция распределения Больцмана?
2. Что такое барометрическая формула?
3. От какого уровня начинается отсчет высоты в барометрической формуле?
4. Какие факторы приводят к тому, что в атмосфере давление убывает с высотой?
5. Как влияют на распределение молекул газа в гравитационном поле Земли температура газа и масса молекул?
6. Может ли значение высоты h в барометрической формуле быть отрицательным? Какой физический смысл будет иметь такое значение величины?
7. Как будет меняться процентное содержание в воздухе таких газов, как азот, кислород и углекислый газ при подъеме в горы? Ответ обоснуйте.
8. Что происходит в приближении чрезвычайно низких температур с концентрацией молекул газа, находящегося в поле действия сил тяжести, на высоте $h \neq 0$? Ответ обоснуйте.
9. Как изменится плотность газа на высоте h , если при неизменной молярной массе газа и начальной плотности увеличить температуру газа? Ответ поясните.
10. Как изменится плотность газа на высоте h , если при неизменной температуре газа и начальной плотности увеличить молярную массу газа? Ответ поясните.

Задачи для аудиторных занятий

I уровень

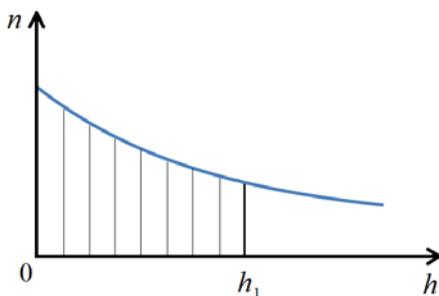


Рис. 2.5

2.51. Дан график зависимости концентрации воздуха от высоты над поверхностью Земли (рис. 2.5). Заштрихованная площадь на нем определяет...

- а) концентрацию молекул на высоте h_1 ;
- б) число молекул в кубе с ребром h_1 ;

в) число молекул в столбе высотой h_1 с площадью основания 1 м^2 ;

г) среднюю концентрацию молекул на высотах от 0 до h_1 .

2.52. При одинаковых значениях температуры и одинаковых давлениях на нулевом уровне (выберите правильные утверждения)...

а) график зависимости давления от высоты для водорода будет проходить выше, чем для кислорода;

б) график зависимости давления от высоты для водяного пара будет проходить выше, чем для кислорода;

в) график зависимости давления от высоты для азота будет пересекаться с аналогичным графиком для кислорода;

г) график зависимости давления от высоты для водяного пара будет проходить выше трех других графиков.

2.53. Парциальные давления азота, кислорода и водяного пара на уровне моря равны соответственно 597 мм рт. ст., 159 мм рт. ст. и 4 мм рт. ст. Считая температуры этих газов всюду одинаковыми, выберите правильные утверждения относительно графиков зависимости давления этих газов от высоты:

а) график зависимости давления от высоты для азота будет проходить выше, чем для водяного пара, во всем диапазоне высот;

б) график зависимости давления от высоты для азота будет проходить выше, чем для водяного пара, при небольших значениях высоты;

в) график зависимости давления от высоты для водяного пара будет проходить выше, чем для кислорода, во всем диапазоне высот;

г) график зависимости давления от высоты для водяного пара будет пересекаться с аналогичным графиком для кислорода;

д) график зависимости давления от высоты для азота будет проходить выше, чем для кислорода, во всем диапазоне высот.

II уровень

2.54. Во сколько раз различаются давления воздуха на уровне моря и на высоте 1000 м? Температура воздуха не меняется с высотой и равна 290 К. Молярная масса воздуха $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

2.55. Вертикально расположенная ректификационная колонна высотой 30 м, запаянная с двух сторон, заполнена кислородом ($M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль). На сколько процентов различаются концентрации молекул газа у нижнего и верхнего оснований трубы? Температура газа 100 К. Ускорение свободного падения принять $9,8 \text{ м/с}^2$.

2.56. На какой высоте над поверхностью Земли плотность воздуха в 2 раза меньше, чем на уровне моря? При расчетах принять среднюю температуру атмосферы равной $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.57. У поверхности Земли молекул гелия почти в $3 \cdot 10^4$ раз меньше, чем молекул кислорода. На какой высоте от поверхности Земли число молекул гелия будет равно числу молекул кислорода? При расчетах принять среднюю температуру атмосферы равной $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.58. Пассажирский самолет совершает полеты на высоте $h_1 = 8300$ м. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в кабине при помощи компрессора поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте $h_2 = 2700$ м. Во сколько раз плотность ρ_2 воздуха в кабине больше плотности ρ_1 воздуха вне ее, если температура наружного воздуха $t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура воздуха в кабине $t_2 = +20 \text{ }^\circ\text{C}$?

2.59. Закрытую с торцов горизонтальную трубку длиной 1 м перемещают с ускорением, направленным вдоль ее оси. Внутри трубки находится аргон при температуре 330 К. При каком значении ускорения концентрации аргона вблизи торцов трубки будут отличаться друг от друга на 1,0 %?

2.60. Азот находится в очень высоком вертикальном сосуде в однородном поле силы тяжести при температуре T . Температуру увеличили в η раз. На какой высоте h концентрация молекул осталась прежней?

2.61. Определите массу m газа, заключенного в вертикальном цилиндрическом сосуде. Площадь основания сосуда S , высота h . Давление на уровне нижнего основания сосуда p_0 . Температура газа T , молярная масса газа M . Считать, что температура газа и ускорение свободного падения не зависят от высоты.

2.62. Найдите силу, действующую на частицу со стороны однородного потенциального поля, если концентрация этих частиц на двух уровнях, отстоящих друг от друга на расстоянии 30 см (вдоль поля), отличается в 3 раза. Температура системы $T = 300$ К.

III уровень

2.63. Закрытую с торцов горизонтальную трубку длиной 1 м вращают с угловой скоростью ω вокруг вертикальной оси, проходящей через один из ее торцов. В трубке находится углекислый газ при температуре 300 К. Найдите угловую скорость, при которой отношение концентраций молекул газа у противоположных торцов будет равно 2.

2.64. Потенциальная энергия молекул газа 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 . Найдите:

- а) число молекул в слое $(r, r + dr)$;
- б) наиболее вероятное расстояние молекул $r_{\text{вер}}$;
- в) во сколько раз изменится концентрация молекул в центре поля при уменьшении температуры в η раз.

2.65. Найдите массу моля коллоидных частиц, если при вращении центрифуги с угловой скоростью ω вокруг вертикальной оси концентрация этих частиц на расстоянии r_2 от оси вращения в η раз больше, чем на расстоянии r_1 (в одной горизонтальной плоскости). Плотности частиц и растворителя равны соответственно ρ и ρ_0 .

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

2.66. Каково давление воздуха в шахте на глубине 1 км, если считать, что температура по всей высоте постоянна и равна $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, а ускорение свободного падения не зависит от высоты? Давление воздуха у поверхности Земли равно p_0 .

2.67. На какой высоте давление воздуха составляет 60 % от давления на уровне моря? При решении считать, что температура воздуха везде одинакова и равна $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.68. Определите отношение давления воздуха на высоте 1 км к давлению на дне скважины глубиной 1 км. Воздух у поверхности Земли находится при нормальных условиях, и его температура не зависит от высоты.

2.69. На какой высоте плотность воздуха в e раз (e – основание натурального логарифма) меньше по сравнению с его плотностью на уровне моря? Температуру воздуха и ускорение свободного падения считайте не зависящими от высоты.

2.70. В очень высоком вертикальном цилиндрическом сосуде находится углекислый газ при некоторой температуре T . Считая ускорение свободного падения постоянным, найдите, как изменится давление газа на дно сосуда, если температуру газа увеличить в η раз.

2.71. Пусть η_0 – отношение концентрации молекул водорода к концентрации молекул азота вблизи поверхности Земли, а η – соответствующее отношение на высоте $h = 3000$ м. Найдите отношение η/η_0 при $T = 280$ К, полагая, что температура и ускорение свободного падения не зависят от высоты.

2.72. Найдите плотность ρ воздуха: а) у поверхности Земли; б) на высоте 4 км от поверхности Земли. Температуру воздуха считать постоянной и равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление воздуха у поверхности Земли $p_0 = 100$ кПа.

2.73. На какой высоте h плотность воздуха составляет 75 % от плотности на уровне моря? Температуру воздуха считать постоянной и равной $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.74. Обсерватория расположена на высоте 3250 м над уровнем моря. Найдите давление воздуха на этой высоте. Температуру воздуха считать постоянной и равной $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление воздуха на уровне моря $p_0 = 101,3\text{ кПа}$.

2.75. Пассажирский самолет совершает полеты на высоте $h_1 = 10\text{ км}$. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в салоне поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте $h_2 = 2,7\text{ км}$. Найдите разность давлений внутри и снаружи кабины. Температуру наружного воздуха t_1 считать равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.76. На какой высоте плотность газа втрое меньше его плотности на уровне моря? Температуру газа считать постоянной и равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Задачу решить для: а) воздуха; б) водорода.

2.77. Найдите изменение высоты, соответствующее изменению давления на 1 кПа, в случае, если за нулевой уровень принимается высота, где температура составляет 220 К, а давление 25 кПа.

2.78. Барометр в кабине летящего самолета все время показывает одинаковое давление $79 \cdot 10^3\text{ Па}$, благодаря чему летчик считает высоту полета неизменной. Однако температура воздуха за бортом изменилась с $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какую ошибку Δh в определении высоты допустил летчик? Давление у поверхности Земли считать нормальным.

2.79. Пылинки массой 10^{-18} г взвешены в воздухе. Определите толщину слоя воздуха, в пределах которого концентрация пылинок различается не более чем на $\delta = 1\text{ \%}$. Температура воздуха во всем объеме постоянна и равна 300 К. Выталкивающей силой Архимеда пренебречь.

2.80. Пылинки массой 10^{-18} г взвешены в воздухе. Определите, на сколько различается относительная величина концентрации частиц в пределах толщины слоя воздуха 5 см. Температура воздуха во всем объеме одинакова и равна 300 К.

2.81. Определите число молекул N газа, заключенного в вертикальном цилиндрическом сосуде площадью основания S , высотой h . Давление на уровне нижнего основания сосуда p_0 . Температура газа T . Считать, что

температура газа и ускорение свободного падения не зависят от высоты. Молярная масса газа M .

2.82. Каким будет давление воздуха на дне скважины глубиной 8 км, если считать, что молярная масса воздуха равна $29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, температура по высоте постоянна и равна 27°C , а давление воздуха у поверхности Земли равно одной атмосфере?

2.83. Полагая температуру воздуха и ускорение свободного падения не зависящими от высоты, определите, на какой высоте h над уровнем моря концентрация молекул воздуха в 1,5 раза меньше своего значения на уровне моря. Температуру воздуха примите равной 0°C .

2.84. Самолет летит на высоте 9000 м при температуре за бортом -10°C . В салоне самолета устанавливается давление, соответствующее высоте 2500 м над уровнем моря. Во сколько раз давление воздуха в салоне больше атмосферного давления за бортом?

2.85. На какой высоте над поверхностью Земли парциальные давления кислорода и водяного пара станут одинаковыми, если вблизи поверхности они составляют 159 мм рт. ст. для кислорода и 4 мм рт. ст. для водяного пара? Температуру воздуха примите равной 0°C .

2.86. В шахте какой глубины давление воздуха составляет 120 % от давления на уровне моря? При решении считать, что температура воздуха везде одинакова и равна 20°C .

2.87. Пылинки массой 1 аг взвешены в воздухе. Во сколько раз изменится концентрация пылинок при увеличении высоты на 10 м? Температура воздуха во всем объеме одинакова и равна 300 К.

2.88. Вертолет стартовал со взлетной площадки, находящейся на высоте 2 км над уровнем моря, и поднялся еще на 2 км вверх. На сколько при этом изменилось давление в кабине вертолета? Температуру воздуха примите всюду равной 0°C . Давление у поверхности Земли считать нормальным.

2.89. Какой перепад высот преодолел альпинист, поднимаясь в горы, если атмосферное давление в процессе подъема упало в 2 раза? Считайте

температуру воздуха всюду равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а давление у подножия горы 94 кПа .

2.90. Высота Эвереста составляет 8848 м . Вычислите давление на вершине этой горы, считая, что на уровне моря воздух находится при нормальных условиях.

2.91. Высота Эвереста составляет 8848 м . Во сколько раз упадет концентрация кислорода, содержащегося в воздухе, при подъеме на эту вершину по сравнению с концентрацией кислорода на уровне моря? Температуру воздуха примите всюду равной $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление у поверхности Земли считать нормальным.

2.92. Рассчитайте, на сколько будет отличаться атмосферное давление на вершине Эвереста (8848 м над уровнем моря) летом и зимой, принимая температуру воздуха равной соответственно $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом и $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой. Давление у подножия Эвереста считать нормальным.

2.93. Какова масса одного кубометра воздуха, находящегося на высоте 5 км ? Считать, что на уровне моря воздух находится при нормальных условиях.

2.94. Город Потоси в Боливии расположен на высоте 4090 м над уровнем моря. Определите примерное значение атмосферного давления в этом населенном пункте, считая, что на уровне моря воздух находится при нормальных условиях.

2.95. На какой высоте над поверхностью Земли атмосферное давление было бы в 2 раза меньше, чем на уровне моря, если бы атмосфера Земли состояла преимущественно из углекислого газа? При расчетах принять среднюю температуру атмосферы равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

III. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

Явления переноса – круг явлений в термодинамически неравновесных системах, в процессе которых происходит выравнивание параметров макроскопической системы, при этом система стремится к состоянию равновесия.

Процессы выравнивания сопровождаются направленным переносом ряда физических величин (массы, энергии, импульса и т. д.) и поэтому называются явлениями переноса.

К явлениям переноса относятся:

- а) диффузия,
- б) внутреннее трение (вязкость),
- в) теплопроводность.

Диффузия – процесс переноса массы вещества молекулами за счет их хаотического движения при наличии градиента плотности (или концентрации молекул).

Диффузия имеет место в газах, жидкостях и твердых телах.

При диффузии масса переносится из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией, что приводит к ее равномерному распределению по занимаемому объему.

Математически диффузия описывается *законом Фика* (3.1):

$$dm = -D \frac{d\rho}{dr} dS_{\perp} dt. \quad (3.1)$$

Масса вещества dm , переносимая молекулами за время dt через площадку dS_{\perp} , расположенную перпендикулярно направлению переноса (оси r), прямо пропорциональна проекции градиента плотности $d\rho/dr$ на направление быстрейшего возрастания плотности.

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle - \text{коэффициент диффузии}; \quad (3.2)$$

$$[D] = \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

$\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость движения молекул:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}; \quad (3.3)$$

$\langle Z \rangle$ – среднее число соударений молекул в единицу времени:

$$\langle Z \rangle = \sqrt{2}\pi d_{\text{эф}}^2 n \langle v \rangle, \quad (3.4)$$

где $d_{\text{эф}}$ – *эффективный диаметр молекулы* – минимальное расстояние, на которое сближаются центры молекул при их соударении;

$\langle \lambda \rangle$ – *средняя длина свободного пробега молекулы* – среднее расстояние, которое молекула проходит между двумя последовательными соударениями:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle Z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_{\text{эф}}^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d_{\text{эф}}^2 p}. \quad (3.5)$$

Внутреннее трение (вязкость) – возникновение силы внутреннего трения при взаимодействии между слоями газа (жидкости), движущимися с различными скоростями.

Вязкое трение в газе (жидкости) – это результат переноса импульса направленного движения слоев газа за счет хаотического движения при наличии в газе (жидкости) градиента скорости направленного движения.

Внутреннее трение подчиняется *закону Ньютона* (3.6):

$$dp = -\eta \frac{dv}{dr} dS_{\perp} dt. \quad (3.6)$$

Импульс направленного движения слоев газа dp , перенесенный молекулами за время dt через площадку dS_{\perp} , расположенную перпендикулярно направлению переноса (оси r), прямо пропорционален проекции градиента скорости направленного движения dv/dr на направление быстрого возрастания скорости.

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho - \text{динамическая вязкость (коэффициент вязкости)}; \quad (3.7)$$

$$[\eta] = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

Закон Стокса: Стокс установил, что при движении тел малых размеров в вязкой среде сила внутреннего трения F_c пропорциональна скорости v , коэффициенту вязкости η и характеристическому размеру тела. Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шарика формула Стокса имеет вид (3.8):

$$F_c = 6\pi\eta r v, \quad (3.8)$$

где r – радиус шарика.

Теплопроводность – процесс выравнивания температуры, сопровождающийся направленным переносом тепловой энергии из более нагретых слоев в менее нагретые за счет хаотического движения молекул.

При теплопроводности энергия в виде тепла переносится из мест с большей температурой в места с меньшей температурой, что приводит к ее выравниванию.

Процесс теплопроводности описывается *законом Фурье* (3.9):

$$\delta Q = -\chi \frac{dT}{dr} dS_{\perp} dt. \quad (3.9)$$

Элементарное количество тепла δQ , переносимое в стационарном процессе теплопроводности за время dt через площадку dS_{\perp} , расположенную перпендикулярно направлению переноса (оси r), прямо пропорционально проекции градиента температуры dT/dr на направление быстрого возрастания температуры.

$$\chi = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho c_V - \text{коэффициент теплопроводности}; \quad (3.10)$$

$$c_V = \frac{iR}{2M} - \text{удельная теплоемкость при постоянном объеме.} \quad (3.11)$$

$$[\chi] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{К} \cdot \text{с}^3} = \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Связь коэффициентов переноса с величинами, характеризующими движение молекул газа:

$$\eta = D\rho; \quad (3.12)$$

$$\chi = c_V\eta; \quad (3.13)$$

$$\chi = Dc_V\rho. \quad (3.14)$$

Тогда зависимость между коэффициентами и термодинамическими параметрами следующая:

$$D \sim \frac{T\sqrt{T}}{p}; \quad (3.15)$$

$$\chi \sim \sqrt{T}; \quad (3.16)$$

$$\eta \sim \sqrt{T}. \quad (3.17)$$

Контрольные вопросы

1. Что характерно для всех явлений переноса?
2. Что такое средняя длина свободного пробега молекулы? От каких величин она зависит?
3. Что такое эффективный диаметр молекулы? От каких величин он зависит?
4. Какие процессы происходят при диффузии? Запишите уравнения этих процессов.
5. Какие процессы происходят при внутреннем трении? Запишите уравнения этих процессов.

6. Какие процессы происходят при теплопроводности? Запишите уравнения этих процессов.

7. Как коэффициенты переноса связаны друг с другом и с макроскопическими параметрами, описывающими состояние термодинамических систем?

8. Что означает минус в законах, описывающих явления переноса?

ЗАДАЧИ ДЛЯ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

I уровень

3.1. По графику зависимости температуры от расстояния (рис. 3.1) укажите направление градиента температуры.

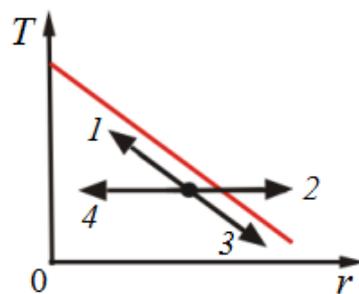


Рис. 3.1

3.2. На каком графике (рис. 3.2) правильно изображены зависимости коэффициента диффузии D и коэффициента теплопроводности χ от давления при изотермическом процессе?

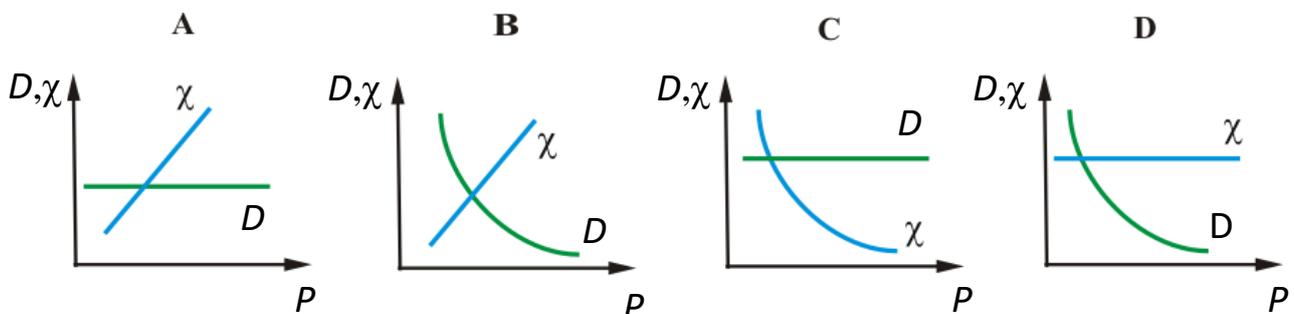


Рис. 3.2

3.3. На каком графике (рис. 3.3) правильно изображены зависимости коэффициентов диффузии D , вязкости η и теплопроводности χ от давления при изотермическом процессе?

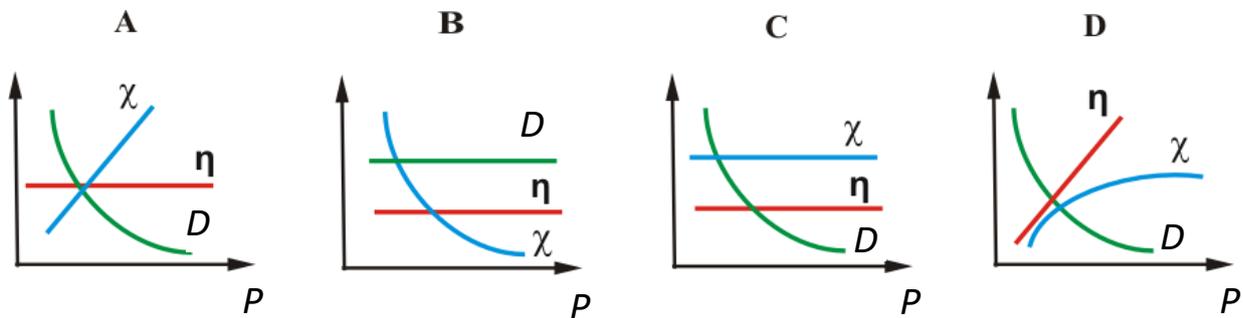


Рис. 3.3

3.4. Как изменится средняя длина свободного пробега молекул в результате двукратного увеличения объема газа при постоянном давлении?

3.5. Как изменится коэффициент диффузии молекул азота в результате двукратного увеличения объема газа при постоянном давлении?

3.6. Как изменится число ударов, испытываемых 1 см^2 стенки сосуда за 1 с при двукратном увеличении объема идеального газа в случае изобарного расширения?

II уровень

3.7. Какова температура T азота, если средняя длина свободного пробега молекул азота при давлении $p = 8 \text{ кПа}$ составляет 1 мкм ? Эффективный диаметр молекул азота $d = 0,38 \text{ нм}$.

3.8. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул водорода равна $2,5 \text{ см}$, если температура газа равна $67 \text{ }^\circ\text{C}$? Диаметр молекулы водорода примите равным $0,28 \text{ нм}$.

3.9. Определите коэффициент диффузии кислорода при нормальных условиях (давление $0,1 \text{ МПа}$, температура $0 \text{ }^\circ\text{C}$). Эффективный диаметр молекул кислорода примите равным $0,36 \text{ нм}$.

3.10. Определите, во сколько раз отличается коэффициент диффузии азота ($M_1 = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$) и углекислого газа ($M_2 = 44 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$), ес-

ли оба газа находятся при одинаковых температурах и давлении. Эффективные диаметры молекул этих газов считать одинаковыми.

3.11. Определите коэффициент диффузии и коэффициент внутреннего трения азота, находящегося при нормальных условиях. Эффективный диаметр молекулы азота примите равным 0,38 нм.

3.12. Определите коэффициент теплопроводности кислорода, находящегося в сосуде при температуре $T = 300$ К. Эффективный диаметр молекулы кислорода $d = 0,36$ нм.

3.13. Определите коэффициент теплопроводности азота, если коэффициент динамической вязкости для него при тех же условиях равен 10 мкПа·с.

3.14. Пространство между двумя параллельными пластинами площадью 150 см² каждая, находящимися на расстоянии 5 мм друг от друга, заполнено кислородом. Одна пластина поддерживается при температуре 17 °С, а другая – при температуре 27 °С. Определите количество теплоты, прошедшее за 5 минут посредством теплопроводности от одной пластины к другой. Кислород находится при нормальных условиях. Эффективный диаметр молекул кислорода считать равным $0,36$ нм.

3.15. Определите потерю теплоты через кирпичную стенку длиной 5 м, высотой 3 м и толщиной $0,25$ м, если на поверхностях стенки поддерживаются температуры $t_1 = 20$ °С и $t_2 = -30$ °С. Коэффициент теплопроводности кирпича принять постоянным и равным $0,6$ Вт/(м·°С).

3.16. Наружная поверхность кирпичной стены площадью 25 м² и толщиной 37 см имеет температуру 259 К, а внутренняя поверхность – 293 К. Помещение отапливается электроплитой. Определите ее мощность, если температура в помещении поддерживается постоянной. Теплопроводность кирпича $0,4$ Вт/(м·К).

3.17. Вычислите количество льда, которое образуется в течение часа в технологическом бассейне, площадь которого 10 м². Начальная толщина льда 15 см, температура воздуха равна -10 °С, коэффициент теплопроводности льда $2,1$ Вт/(м·К). Температуру верхней поверхности льда считать равной температуре воздуха.

3.18. Стальной шарик радиусом 2 мм падает в жидкости со скоростью 2 м/с. Определите вязкость жидкости, если ее плотность 1200 кг/м^3 .

3.19. Какой наибольшей скорости может достичь дождевая капля диаметром 0,3 мм? Диаметр молекулы воздуха считать равным $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Температура воздуха $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Считать, что для дождевой капли справедлив закон Стокса.

3.20. Определите массу азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку диаметром 50 см^2 за 20 с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном площадке, равен 1 кг/м^4 . Температура азота 290 К , а средняя длина свободного пробега его молекул равна 1 мкм .

3.21. Ниже какого давления можно говорить о вакууме между стенками сосуда Дьюара, если расстояние между стенками сосуда равно 8 мм , а температура $17 \text{ }^\circ\text{C}$? Эффективный диаметр молекул воздуха принять равным $0,27 \text{ нм}$.

III уровень

3.22. Докажите, что зависимость коэффициента диффузии от основных макроскопических параметров газа соответствует выражению (3.14).

3.23. Паропровод диаметром $160/170 \text{ мм}$ покрыт двуслойной изоляцией. Толщина первого слоя $\delta_2 = 30 \text{ мм}$ и второго $\delta_3 = 50 \text{ мм}$. Коэффициенты теплопроводности трубы, первого и второго слоев изоляции соответственно равны: $\chi_1 = 50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\chi_2 = 0,15 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $\chi_3 = 0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Температура внутренней поверхности паропровода $t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ и внешней поверхности изоляции $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите линейную плотность теплового потока и температуры на поверхностях раздела отдельных слоев.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

3.24. Средняя длина свободного пробега молекул водорода при нормальных условиях составляет $0,1 \text{ мкм}$. Определите среднюю длину их свободного пробега при давлении $0,1 \text{ мПа}$, если температура газа остается постоянной.

3.25. Найдите коэффициент диффузии гелия при нормальных условиях.

3.26. Найдите среднюю длину свободного пробега молекул гелия при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 10^5 Па , если при этих условиях коэффициент внутреннего трения равен $1,3 \cdot 10^{-4}\text{ г}/(\text{см}\cdot\text{с})$.

3.27. Найдите диаметр молекулы кислорода, если известно, что для кислорода коэффициент внутреннего трения при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $18,8 \cdot 10^{-6}\text{ (Н}\cdot\text{с)}/\text{м}^2$.

3.28. Найдите коэффициент диффузии и коэффициент внутреннего трения воздуха при давлении 10^5 Па и температуре $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаметр молекулы воздуха принять равным $3 \cdot 10^{-10}\text{ м}$.

3.29. Во сколько раз коэффициент внутреннего трения кислорода больше коэффициента внутреннего трения азота? Температура газов одинакова.

3.30. Коэффициенты диффузии и внутреннего трения водорода при нормальных условиях равны соответственно $D = 1,42\text{ см}^2/\text{с}$ и $\eta = 8,5 \cdot 10^{-6}\text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$. Найдите число молекул в 1 м^3 при этих условиях.

3.31. Коэффициенты диффузии и внутреннего трения кислорода при температуре 273 К равны соответственно $D = 1,22 \cdot 10^5\text{ м}^2/\text{с}$ и $\eta = 1,95 \cdot 10^{-5}\text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$. Найдите при этих условиях: 1) плотность кислорода; 2) среднюю длину свободного пробега его молекул; 3) среднюю арифметическую скорость его молекул.

3.32. Какое количество тепла теряется еже часно через окно за счет теплопроводности воздуха, заключенного между рамами? Площадь рамы 4 м^2 , расстояние между рамами 30 см . Температура помещения $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура наружного пространства $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаметр молекулы воздуха $3 \cdot 10^{-10}\text{ м}$. Температуру между рамами можно считать равной среднему арифметическому температур помещения и наружного пространства. Давление равно 10^5 Па .

3.33. Между пластинами, находящимися на расстоянии 1 мм друг от друга, находится воздух и поддерживается разность температур $\Delta T = 1\text{ К}$. Площадь каждой пластины $S = 100\text{ см}^2$. Какое количество тепла передается за счет теплопроводности от одной пластины к другой за 10 мин ? Считать, что воздух находится при нормальных условиях. Диаметр молекулы воздуха принять равным $3 \cdot 10^{-10}\text{ м}$.

3.34. Во сколько раз коэффициент внутреннего трения кислорода больше коэффициента внутреннего трения водорода при одинаковой температуре?

3.35. Во сколько раз коэффициент диффузии азота больше коэффициента диффузии водорода при одинаковой температуре?

3.36. Вычислите коэффициент внутреннего трения азота при нормальных условиях.

3.37. Вычислите коэффициент внутреннего трения кислорода, давление которого $7,8 \cdot 10^4$ Па, а плотность $1,5 \text{ кг/м}^3$.

3.38. Вычислите коэффициент внутреннего трения водорода, температура которого 27°C , а коэффициент диффузии равен $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Давление нормальное.

3.39. Вычислите коэффициент диффузии гелия при нормальных условиях.

3.40. Вычислите коэффициент диффузии азота, давление которого 10^5 Па, а плотность $1,25 \text{ кг/м}^3$.

3.41. Определите массу азота, диффундирующего за 5 с через площадку, перпендикулярную потоку частиц и имеющую площадь 10^{-2} м^2 , при нормальных условиях и градиенте плотности, равном $1,26 \text{ кг/м}^4$, считая, что поток частиц не меняется со временем, равномерно распределен и постоянен в пределах площадки.

3.42. Через площадку площадью 10 см^2 , перпендикулярную потоку частиц, за 2 мин диффундирует $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ кислорода, температура которого 27°C . Процесс диффузии происходит так, что поток частиц не меняется со временем, равномерно распределен и постоянен в пределах площадки. Определите градиент плотности кислорода, если средняя длина свободного пробега его молекул 10^{-5} см .

3.43. Вычислите концентрацию молекул аргона, если коэффициент диффузии равен $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, а коэффициент внутреннего трения $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

3.44. Вычислите температуру азота, давление которого $1,34 \cdot 10^5$ Па, коэффициент диффузии $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент внутреннего трения $2 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$.

3.45. Определите давление кислорода, если средняя квадратичная скорость его молекул равна 450 м/с, коэффициент диффузии 10^{-5} м²/с, коэффициент внутреннего трения $2 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с).

3.46. Средняя длина свободного пробега молекул некоторого газа при 0 °С равна $1,6 \cdot 10^{-7}$ м, а коэффициент диффузии этого газа $0,91 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Что это за газ?

3.47. В баллоне емкостью 1 дм³ находится $8,9 \cdot 10^{-2}$ кг водорода, коэффициент диффузии которого равен 10^{-4} м²/с. Определите коэффициент теплопроводности газа.

3.48. Вычислите коэффициент теплопроводности гелия для условий, когда его коэффициент внутреннего трения равен $1,3 \cdot 10^{-4}$ г/(см·с).

3.49. Коэффициент внутреннего трения водорода равен $8,5 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Найдите коэффициент теплопроводности водорода при этих условиях.

3.50. Вычислите коэффициент диффузии водорода, плотность которого при 17 °С равна 0,1 кг/м³. Эффективный диаметр молекулы водорода $d = 2,3 \cdot 10^{-10}$ м.

3.51. Определите внутреннюю энергию 0,1 кмоль водорода, коэффициент диффузии которого равен $0,9 \cdot 10^{-4}$ м²/с, а средняя длина свободного пробега молекул равна $1,8 \cdot 10^{-7}$ м.

3.52. Как изменится коэффициент диффузии водорода при двукратном увеличении его объема в адиабатном процессе?

3.53. Определите коэффициент диффузии D кислорода при температуре 20 °С и давлении 2 атм. Эффективный диаметр молекул кислорода $d = 0,36$ нм.

IV. РАБОТА И ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

РАБОТА И ТЕПЛОБМЕН

При взаимодействии термодинамической системы с окружающими телами происходит обмен энергией. Существуют два различных способа передачи энергии: путем совершения работы и посредством теплообмена (теплопередачи).

Работа в термодинамике – это способ передачи энергии от системы к внешним телам (или от внешних тел к системе) с изменением внешних макроскопических параметров.

Теплообмен (теплопередача) – это передача энергии от системы к внешним телам (и наоборот) без изменения внешних параметров, но связанная с изменением термодинамического параметра самой системы – энтропии.

Принято считать работу A положительной, если она совершается системой над внешними телами, а количество теплоты Q величина положительная, если энергия передается системе.

Элементарная работа, совершаемая системой при бесконечно малом изменении объема системы dV , равна $\delta A = pdV$, где p – давление газа в сосуде. Работа системы при изменении ее объема от V_1 до V_2 определяется выражением

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV. \quad (4.1)$$

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

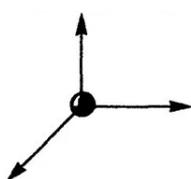
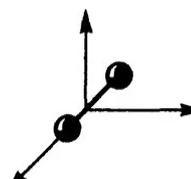
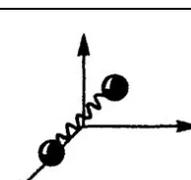
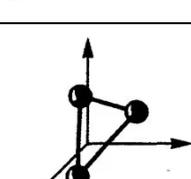
Под *внутренней энергией* идеального газа понимают энергию хаотического движения его молекул. Внутреннюю энергию термодинамической системы можно вычислить, зная число степеней свободы.

Число степеней свободы i материального объекта называется число независимых движений, благодаря которым объект обладает энергией или, что то же самое, число независимых координат, которые необходимо задать, чтобы однозначно определить положение этого объекта в пространстве.

Общее число степеней свободы молекулы газа можно определить следующим образом: $i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{колеб}}$, где $i_{\text{пост}}$, $i_{\text{вращ}}$, $i_{\text{колеб}}$ – числа поступательных, вращательных, колебательных степеней свободы соответственно. Число колебательных степеней свободы $i_{\text{колеб}}$ равно числу упругих связей. В молекуле с жесткой связью $i_{\text{колеб}} = 0$. В табл. 4.1 приведены значения степеней свободы для различных моделей молекулы.

Таблица 4.1

Число степеней свободы для различных моделей молекулы

Газ	Модель молекулы		Число степеней свободы			
			$i_{\text{пост}}$	$i_{\text{вращ}}$	$i_{\text{колеб}}$	i
Одноатомный	Материальная точка		3	0	0	3
Двухатомный	Две материальные точки, жесткая связь		3	2	0	5
Двухатомный	Две материальные точки, нежесткая связь		3	2	1	7
Трехатомный, многоатомный	Три (много) атома, жесткая связь		3	3	0	6

Средняя энергия хаотического теплового движения одной молекулы равна

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT. \quad (4.2)$$

Внутренняя энергия произвольной массы идеального газа, содержащей N частиц, равна

$$U = N\langle \varepsilon \rangle = \frac{N}{N_A} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} \nu RT, \quad (4.3)$$

где ν – количество вещества; m – масса газа; M – молярная масса газа.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗА

Теплоемкость – скалярная физическая величина, характеризующая связь между количеством сообщенного системе тепла и изменением температуры этой системы.

Различают полную, молярную и удельную теплоемкости.

Полная теплоемкость C_0 – это скалярная физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить системе, чтобы повысить ее температуру на один градус:

$$C_0 = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (4.4)$$

Молярная теплоемкость C – это скалярная физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молю вещества, чтобы повысить его температуру на один градус:

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT}. \quad (4.5)$$

Удельная теплоемкость c – это скалярная физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы вещества, чтобы повысить ее температуру на один градус:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (4.6)$$

Сопоставляя (4.6) и (4.7), получим

$$C = M \cdot c. \quad (4.7)$$

Теплоемкость газа зависит от характера процесса, при котором система получает тепло. В связи с этим различают теплоемкость газа при постоянном объеме C_V , постоянном давлении C_p и т. п.

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

В термодинамике первым началом называется закон сохранения энергии для термодинамических систем, в которых существенную роль играют тепловые процессы.

Количество теплоты Q , подведенное к системе, затрачивается на изменение внутренней энергии системы ΔU и на совершение системой работы A над внешними телами:

$$Q = \Delta U + A$$

или

(4.8)

$$\delta Q = dU + \delta A,$$

где δQ – бесконечно малое количество теплоты, подведенное к системе; dU – бесконечно малое изменение внутренней энергии системы; δA – элементарная работа, совершаемая системой при бесконечно малом изменении объема системы dV .

В табл. 4.2 приведено применение первого начала термодинамики к изопроцессам.

Таблица 4.2

Применение первого начала термодинамики к изопроцессам

Процесс	Первое начало термодинамики	Молярная теплоемкость	Работа
Изохорный $V = \text{const}, dV = 0$	$Q = \Delta U$ $\delta Q = dU$	$C_V = \frac{i}{2}R$	$A = 0$
Изотермический $T = \text{const}, dT = 0$	$Q = A$ $\delta Q = \delta A$	∞	$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$
Изобарный $p = \text{const}$	$Q = \Delta U + A$ $\delta Q = dU + \delta A$	$C_p = \frac{i+2}{2}R$	$A = p(V_2 - V_1)$

Уравнение Роберта Майера связывает молярные теплоемкости при постоянном давлении C_p и при постоянном объеме C_V :

$$C_p - C_V = \frac{i+2}{2}R - \frac{i}{2}R = R. \quad (4.9)$$

Коэффициент Пуассона:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (4.10)$$

АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Адиабатический процесс – процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой: $\delta Q = 0$.

Условия осуществления равновесного адиабатического процесса: идеальная тепловая изоляция системы и бесконечно малая скорость протекания.

Уравнения адиабатического процесса выводятся из первого начала термодинамики и имеют вид (рис. 4.1):

$$\begin{aligned} TV^{\gamma-1} &= \text{const}_1; \\ pV^{\gamma} &= \text{const}_2; \\ p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T &= \text{const}_3. \end{aligned} \quad (4.11)$$

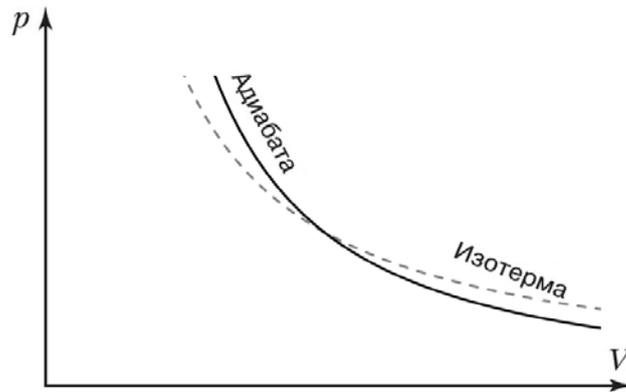


Рис. 4.1

Работу идеального газа можно определить из первого начала термодинамики:

$$\begin{aligned} 0 &= dU + \delta A \rightarrow \delta A = -dU = -\frac{i}{2} \nu R dT; \\ A &= \int_1^2 \delta A = -\frac{i}{2} \nu R \int_{T_1}^{T_2} dT = -\frac{i}{2} \nu R \Delta T, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$ – изменение температуры.

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Первая формулировка второго начала термодинамики была дана в 1850 году Рудольфом Юлиусом Эмануэлем Клаузиусом в виде: «Теплота сама по себе не может перейти от более холодного тела к более теп-

лomu». В 1851 году Томсоном (лордом Кельвином) была предложена еще одна формулировка второго начала: «В природе невозможен круговой процесс, единственным результатом которого была бы механическая работа, совершаемая за счет отвода теплоты от теплового резервуара».

Второе начало термодинамики отвечает на вопросы: можно ли обойтись без охладителя, можно ли внутреннюю энергию рабочего тела полностью превратить в механическую энергию? Согласно второму началу термодинамики – нельзя.

ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ. КПД ТЕПЛОВЫХ МАШИН. ЦИКЛ КАРНО

Тепловыми машинами в термодинамике называются периодически действующие устройства, которые осуществляют преобразование теплоты в работу. Любая тепловая машина имеет нагреватель – источник тепла, рабочее тело – любой газ, совершающий работу при расширении, и охладитель. Рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты Q_H , за счет которой рабочее тело совершает работу A . Оставшаяся неиспользованная часть теплоты Q_X передается охладителю.

Коэффициентом полезного действия тепловой машины называется величина, равная отношению работы, совершенной машиной за цикл, к количеству теплоты, полученной ею за этот цикл:

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = 1 - \frac{Q_X}{Q_H}. \quad (4.13)$$

Цикл Карно – равновесный цикл, состоящий из двух изотермических и двух адиабатических процессов, чередующихся друг с другом.

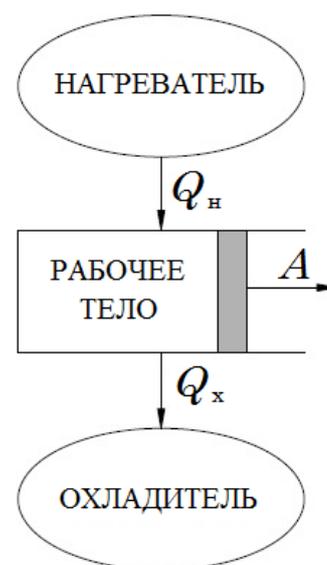


Рис. 4.2

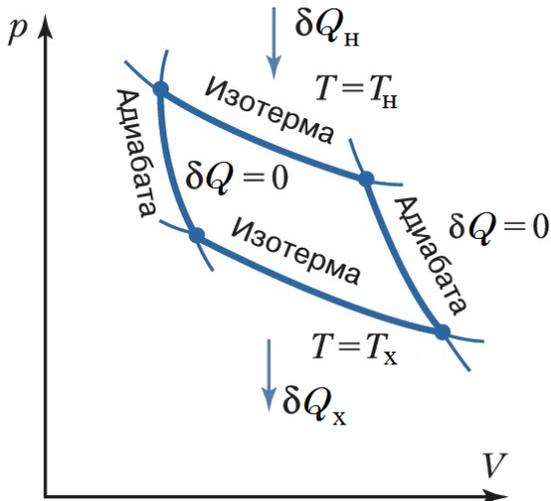


Рис. 4.3

КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно (идеальной тепловой машины), определяется выражением:

$$\eta_{\text{ид}} = \frac{T_{\text{H}} - T_{\text{X}}}{T_{\text{H}}} = 1 - \frac{T_{\text{X}}}{T_{\text{H}}}, \quad (4.14)$$

где T_{H} – температура нагревателя, при которой происходит изотермическое расширение; T_{X} – температура охладителя, при которой происходит изотермическое сжатие.

Теорема Карно: коэффициент полезного действия всех обратимых машин, работающих по циклу Карно в одинаковых условиях (т. е. при одних и тех же температурах нагревателя и охладителя), одинаков и определяется только температурами нагревателя и охладителя.

КПД тепловой машины, работающей не по циклу Карно, всегда меньше, чем КПД идеальной тепловой машины, работающей в том же интервале температур.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определение внутренней энергии термодинамической системы. От чего она зависит?
2. Сформулируйте определение работы газа в термодинамике. Когда газ совершает работу?
3. Когда работа газа положительна, а когда отрицательна?
4. Какие из следующих физических величин в термодинамике являются функциями процесса, а какие функциями состояния: а) работа; б) внутренняя энергия; в) теплота?
5. Теплоемкость. Виды теплоемкости.
6. Уравнение Р. Майера.

7. Коэффициент Пуассона.
8. Число степеней свободы. Из чего складывается общее число степеней свободы? Приведите примеры расчета степеней свободы для разных моделей молекул газа.
9. Сформулируйте первое начало термодинамики.
10. Какой процесс называется адиабатическим? Запишите уравнение адиабатического процесса.
11. Сформулируйте второе начало термодинамики.
12. Тепловые машины. Перечислите основные составляющие тепловой машины. Опишите принцип ее действия. От чего зависит КПД тепловых машин?
13. Перечислите процессы цикла Карно. Чему равен КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно?

Задачи для аудиторных занятий

I уровень

4.1. Выберите из приведенных ниже вариантов правильную формулировку второго начала термодинамики: а) невозможен вечный двигатель I рода; б) невозможен вечный двигатель II рода; в) нельзя создать вечный двигатель ни I, ни II рода.

4.2. Продолжите фразу, выбрав правильный ответ:

Цикл Карно состоит из...

- 1) двух изохор и двух адиабат;
- 2) двух изотерм и двух адиабат;
- 3) двух изотерм и двух изобар.

4.3. Полезная работа, совершаемая тепловой машиной, равна...

- 1) $A = p\Delta V$;
- 2) $A = Q_{\text{н}} - Q_{\text{х}}$;
- 3) $A = FS$.

4.4. К одноатомному идеальному газу в результате изобарного процесса подведено количество теплоты Q . Какая часть теплоты $\Delta U/Q$ расходуется на увеличение внутренней энергии газа?

4.5. Средняя кинетическая энергия молекул газа при температуре T зависит от их структуры, что связано с возможностью различных видов движения атомов в молекуле. Средняя кинетическая энергия молекул кислорода равна...

- 1) $\frac{5}{2}kT$; 2) $\frac{1}{2}kT$; 3) $\frac{7}{2}kT$; 4) $\frac{3}{2}kT$.

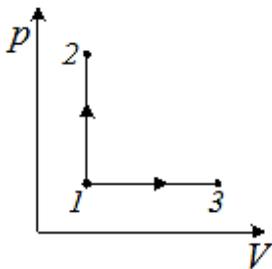


Рис. 4.4

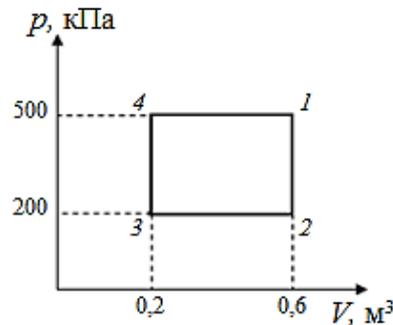


Рис. 4.5

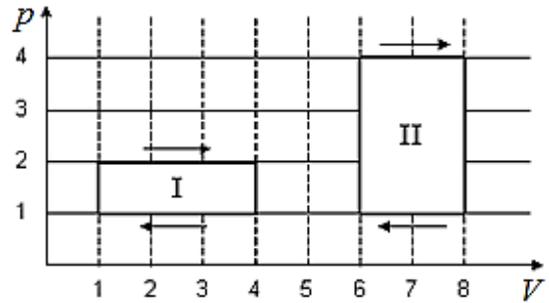


Рис. 4.6

4.6. Молярные теплоемкости гелия в процессах $1-2$ и $1-3$, представленных на рис. 4.4, равны C_1 и C_2 соответственно. Тогда $\frac{C_1}{C_2}$ составляет...

- 1) $\frac{5}{3}$; 2) $\frac{3}{5}$; 3) $\frac{7}{5}$; 4) $\frac{5}{7}$.

4.7. Диаграмма циклического процесса идеального одноатомного газа представлена на рис. 4.5. Найдите отношение работы при нагревании газа к работе при охлаждении.

4.8. На p - V -диаграмме (рис. 4.6) изображены два циклических процесса. Найдите отношение работ A_I/A_{II} , совершенных в этих циклах.

4.9. Коэффициент Пуассона для некоторого газа равен 1,4. Вычислите число степеней свободы для этого газа.

4.10. Вычислите удельную теплоемкость при постоянном объеме для кислорода.

4.11. Газ совершает цикл Карно. Температура холодильника 290 К. Во сколько раз увеличится КПД цикла, если температуру нагревателя повысить от 400 до 600 К?

4.12. Температуры холодильника и нагревателя идеальной тепловой машины соответственно равны 400 и 300 К. Газ забирает за один цикл от нагревателя 60 кДж тепла. Найдите КПД тепловой машины и количество тепла, отданное холодильнику.

II уровень

4.13. Газ, занимавший объем 2 л при давлении 0,1 МПа, расширился изотермически до 4 л. После этого, охлаждая газ изохорно, уменьшили давление в 2 раза. Далее газ изобарно расширился до 8 л. Найдите работу, совершенную газом. Начертите график зависимости давления от объема. Ответ округлите до десятков.

4.14. Воздух массой 1 кг, находящийся при температуре 30 °С и давлении 1,5 МПа, расширяется адиабатически так, что давление при этом падает до 1 атм. Найдите конечную температуру и работу, совершенную газом при расширении.

4.15. Водород при нормальных условиях имел объем $V_1 = 100 \text{ м}^3$. Найдите изменение ΔU внутренней энергии газа при его адиабатическом расширении до объема $V_2 = 150 \text{ м}^3$.

4.16. Определите молярную теплоемкость C_V смеси (50 % по массе водорода и гелия), заключенной в объеме 1 л, при температуре 27 °С и давлении 106,4 кПа.

4.17. Вычислите коэффициент Пуассона для смеси, состоящей из 3 молей аргона и 5 молей кислорода.

4.18. Азот массой 14 г адиабатически расширяют так, что давление уменьшается в 5 раз, и затем изотермически сжимают до первоначального давления. Начальная температура азота 420 К. Изобразите процесс на диаграмме (p, V) . Найдите: а) температуру газа T_2 в конце процесса; б) количество теплоты Q' , отданное газом; в) приращение внутренней энергии газа ΔU ; г) совершенную газом работу A .

4.19. В горизонтально расположенном цилиндре под поршнем, который скользит без трения, находится водород массой $m = 0,02 \text{ кг}$ при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$. Водород сначала расширился адиабатически,

увеличив свой объем в пять раз, а затем был сжат изотермически, причем объем газа уменьшился в пять раз. Найдите температуру T_2 в конце адиабатного расширения и полную работу, совершенную газом. Изобразите процесс графически.

4.20. Цикл, совершаемый двумя киломолями одноатомного идеального газа, состоит из изотермы, изобары и изохоры. Изотермический процесс происходит при максимальной температуре цикла, равной 400 К. Известно также, что в пределах цикла объем газа изменяется в 2 раза. Вычислите работу газа за цикл и КПД цикла. Сравните его полученное значение с КПД цикла Карно, проводимого в интервале температур от T_{\min} до T_{\max} данного цикла.

4.21. Идеальная тепловая машина Карно, цикл которой совершается в обратном направлении (холодильная машина), использует воду при $0\text{ }^\circ\text{C}$ в качестве холодильника и воду при $100\text{ }^\circ\text{C}$ в качестве нагревателя. Сколько воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар 500 г воды в кипятильнике?

4.22. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ кмоль, совершает цикл, график которого изображен на рис. 4.7. Определите: 1) количество теплоты, полученное от нагревателя; 2) количество теплоты, переданное охладителю; 3) работу, совершаемую газом за цикл; 4) КПД цикла.

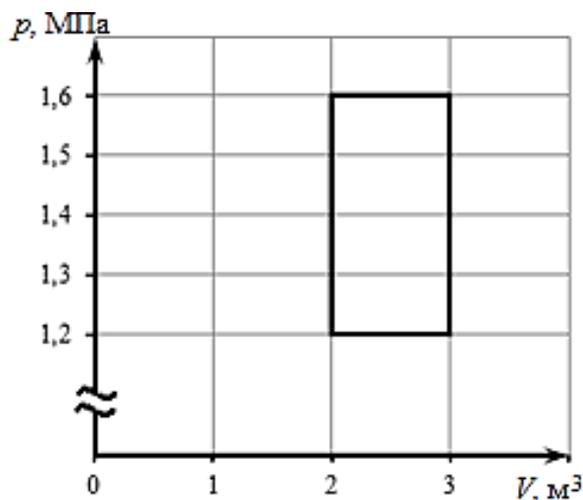


Рис. 4.7

III уровень

4.23. Идеальный двухатомный газ совершает цикл Карно, график которого изображен на рис. 4.8. Объемы газа в состояниях В и С соответственно $V_1 = 12$ л и $V_2 = 16$ л. Найдите КПД цикла η .

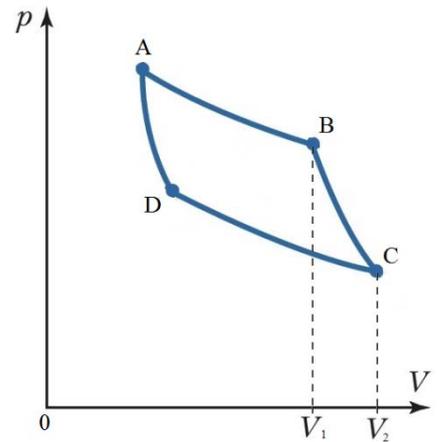


Рис. 4.8

4.24. В вертикально расположенном цилиндре с площадью основания 1 дм^2 под поршнем массой 10 кг , скользящим без трения, находится воздух. При нагревании воздуха поршень поднялся на 10 см . Найдите работу, совершенную воздухом, если атмосферное давление равно $0,1 \text{ МПа}$.

4.25. 50 ммоль идеального одноатомного газа совершает цикл, состоящий из изотермы, изобары и адиабаты, изображенный на рис. 4.9. Оп-

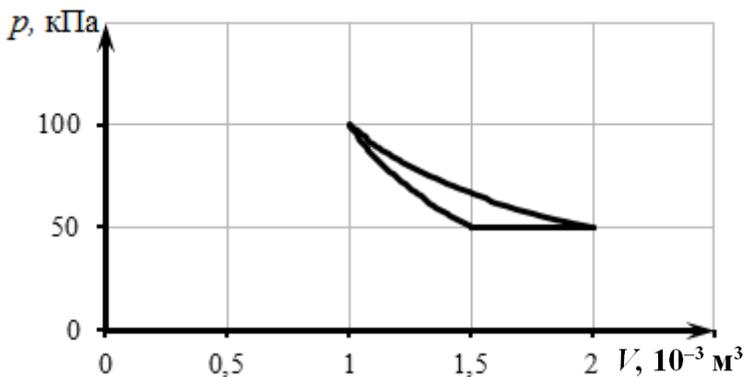


Рис. 4.9

ределите: 1) количество теплоты Q_H , полученной от нагревателя за цикл; 2) количество теплоты Q_X , отданное охладителю за цикл; 3) работу газа A за цикл; 4) КПД цикла; 5) максимальную T_{\max} и минимальную T_{\min} температуры цикла;

б) КПД цикла Карно, проводимого в интервале температур от T_{\min} до T_{\max} данного цикла.

4.26. Идеальный газ совершает цикл, состоящий из чередующихся изотерм и адиабат (рис. 4.10). Температуры, при которых происходят изотермические процессы, равны T_1 , T_2 и T_3 . Найдите КПД такого цикла, если при каждом расширении объем увеличился в одно и то же число раз.

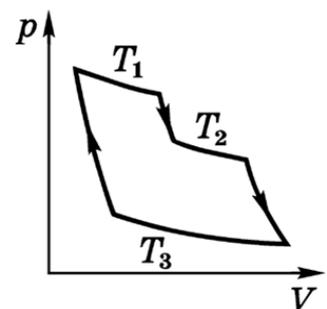


Рис. 4.10

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

4.27–4.56. Газ, находящийся при температуре $T_1 = 300$ К, проходит ряд термодинамических процессов. Данные об изменении давления и объема газа в этих процессах приведены в табл. 4.3. Изобразите график процесса в координатах (p, V) . Для величин, выбранных преподавателем из списка ниже, выведите формулы для расчета и вычислите значения этих величин:

- а) массу газа;
- б) количество вещества, участвующего в процессах;
- в) температуру газа в конце каждого процесса;
- г) изменение внутренней энергии газа в процессах;
- д) совершаемую газом работу;
- е) переданное газу количество теплоты в процессах.

Исходные данные вариантов задачи приведены в табл. 4.3, где $V_1, V_2, V_3, V_4, P_1, P_2, P_3$ – объем, давление газа в соответствующих состояниях.

В табл. 4.3 читать: расш. – расширение, сжат. – сжатие, нагр. – нагревание, охл. – охлаждение.

Таблица 4.3

Исходные данные для задач 4.27–4.56

	Газ	$V_1,$ м ³	$V_2,$ м ³	$V_3,$ м ³	$V_4,$ м ³	$P_1,$ кПа	$P_2,$ кПа	$P_3,$ кПа	Последовательность процессов
4.27	H ₂	0,1	0,2	–	–	200	200	500	изобар. расш., изохор. нагр.
4.28	H ₂	1	3	3	5	200	200	100	изобар. расш., изохор. охл., адиабат. расш.
4.29	O ₂	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	–	800	300	–	изохор. охл., изобар. расш.
4.30	N ₂	1	1	3	6	100	300	–	изохор. нагр., изобар. расш., изотерм. расш.

	Газ	V_1 , м ³	V_2 , м ³	V_3 , м ³	V_4 , м ³	P_1 , кПа	P_2 , кПа	P_3 , кПа	Последова- тельность процессов
4.31	He	0,5	1	2	–	400	–	–	изотерм. расш., изобар. расш.
4.32	He	1,25	3,5	3,5	5	120	120	200	изобар. расш., изохор. нагр., изотерм. расш.
4.33	CO ₂	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$11 \cdot 10^{-3}$	–	100	100	–	изобар. расш., адиабат. расш.
4.34	H ₂	4	1	6	–	250	250	–	изобар. сжат., адиабат. расш.
4.35	O ₂	3	1	1	–	200	200	50	изобар. сжат., изохор. охл.
4.36	CO ₂	4	4	2	–	200	500	–	изохор. охл., изотерм. сжат.
4.37	N ₂	2	4	4	–	60	60	10	изобар. расш., изохор. охл.
4.38	O ₂	2	2	4	–	100	200	–	изохор. нагр., адиабат. расш.
4.39	H ₂	1,5	4,5	3	–	200	–	–	изотерм. расш., изобар. сжат.
4.40	N ₂	1	2	4	–	100	100	–	изобар. расш., изотерм. расш.
4.41	N ₂	0,5	0,5	3	–	40	10	–	изохор. охл., изотерм. расш.
4.42	O ₂	2	0,5	3	–	200	200	–	изобар. сжат., изотерм. расш.
4.43	H ₂	1	1	5	–	100	300	–	изохор. нагр., изотерм. расш.
4.44	He	1	2	2	5	200	200	50	изобар. расш., изохор. охл., изотерм. расш.
4.45	O ₂	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	–	600	600	200	изобар. расш., изохор. охл.
4.46	H ₂	2	2	10	–	1000	500	–	изохор. охл., адиабат. расш.

	Газ	$V_1,$ м ³	$V_2,$ м ³	$V_3,$ м ³	$V_4,$ м ³	$P_1,$ кПа	$P_2,$ кПа	$P_3,$ кПа	Последова- тельность процессов
4.47	H ₂	1	2	2	4	100	100	150	изобар. расш., изохор. нагр., изотерм. расш.
4.48	O ₂	1	3	–	–	200	–	20	адиабат. расш., изохор. охл.
4.49	N ₂	0,5	1,5	1,5	4	2000	–	300	изотерм. расш., изохор. охл.
4.50	He	0,5	1	2	–	320	–	–	адиабат. расш., изобар. нагр.
4.51	O ₂	2	1	0,5	–	100	100	–	изобар. сжат., адиабат. сжат.
4.52	H ₂ O	2	2	6	10	100	300	–	изохор. нагр., изобар. расш., изотерм. расш.
4.53	CO	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	–	100	100	–	изобар. расш., адиабат. расш.
4.54	Ar	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	–	400	150	–	изохор. охл., изобар. расш.
4.55	N ₂	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	–	500	500	250	изобар. расш., изохор. охл.
4.56	CO ₂	3	3	1,5	–	200	400	–	изохор. охл., изотерм. сжат.

4.57–4.86. В сосуде находится смесь двух газов. В табл. 4.4 заданы параметры смеси: виды газов смеси (Газ 1, Газ 2) и их количества вещества (ν_1 и ν_2 соответственно). Для величин, выбранных преподавателем из списка ниже, выведите формулы для расчета и вычислите значения этих величин:

а) массу каждого из газов смеси;

б) считая, что смесь газов находится при нормальных условиях, найдите парциальные давления газов смеси;

- в) молярную массу смеси;
- г) удельную и молярную теплоемкости каждого из газов в изобарном процессе;
- д) удельную и молярную теплоемкости каждого из газов в изохорном процессе;
- е) коэффициент Пуассона для каждого из газов;
- ж) удельную и молярную теплоемкости смеси газов в изобарном процессе;
- з) удельную и молярную теплоемкости смеси газов в изохорном процессе;
- и) коэффициент Пуассона смесового газа.

Таблица 4.4

Параметры смеси газов для задач 4.57–4.86

№	Газ 1	Газ 2	ν_1 , МОЛЬ	ν_2 , МОЛЬ
4.57	Гелий (He)	Водород (H ₂)	1	2,5
4.58	Неон (Ne)	Азот (N ₂)	2	3,5
4.59	Аргон (Ar)	Водяной пар (H ₂ O)	1	1,5
4.60	Криптон (Kr)	Кислород (O ₂)	3	2,5
4.61	Ксенон (Xe)	Окись углерода (CO)	4	3,5
4.62	Гелий (He)	Этилен (C ₂ H ₄)	1	1,5
4.63	Неон (Ne)	Метан (CH ₄)	2	2,5
4.64	Аргон (Ar)	Хлор (Cl ₂)	1	3,5
4.65	Криптон (Kr)	Аммиак (NH ₃)	3	1,5
4.66	Ксенон (Xe)	Фтор (F ₂)	4	2,5
4.67	Водород (H ₂)	Водяной пар (H ₂ O)	1	3,5
4.68	Азот (N ₂)	Этилен (C ₂ H ₄)	2	1,5
4.69	Кислород (O ₂)	Метан (CH ₄)	1	2,5
4.70	Окись углерода (CO)	Аммиак (NH ₃)	3	3,5
4.71	Хлор (Cl ₂)	Водяной пар (H ₂ O)	4	1,5

№	Газ 1	Газ 2	ν_1 , МОЛЬ	ν_2 , МОЛЬ
4.72	Фтор (F_2)	Этилен (C_2H_4)	1	2,5
4.73	Водяной пар (H_2O)	Гелий (He)	2	3,5
4.74	Этилен (C_2H_4)	Неон (Ne)	1	1,5
4.75	Метан (CH_4)	Аргон (Ar)	3	2,5
4.76	Аммиак (NH_3)	Криптон (Kr)	4	3,5
4.77	Окись углерода (CO)	Ксенон (Xe)	1	1,5
4.78	Хлор (Cl_2)	Гелий (He)	2	2,5
4.79	Водород (H_2)	Водяной пар (H_2O)	1	3,5
4.80	Азот (N_2)	Этилен (C_2H_4)	3	1,5
4.81	Кислород (O_2)	Метан (CH_4)	4	2,5
4.82	Неон (Ne)	Аммиак (NH_3)	1	3,5
4.83	Аргон (Ar)	Водяной пар (H_2O)	2	1,5
4.84	Криптон (Kr)	Этилен (C_2H_4)	1	2,5
4.85	Ксенон (Xe)	Фтор (F_2)	3	3,5
4.86	Водяной пар (H_2O)	Азот (N_2)	4	1,5

4.87–4.116. Цикл, совершаемый идеальным газом в количестве ν , представлен в табл. 4.5 в виде графика в координатах (p, V) . Перед началом решения пронумеруйте точки цикла, принадлежащие двум процессам одновременно, по часовой стрелке.

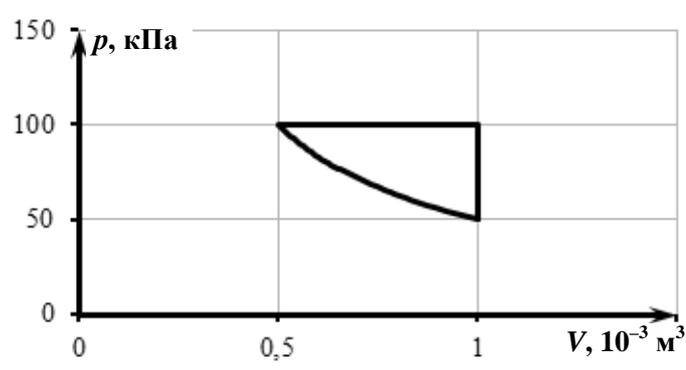
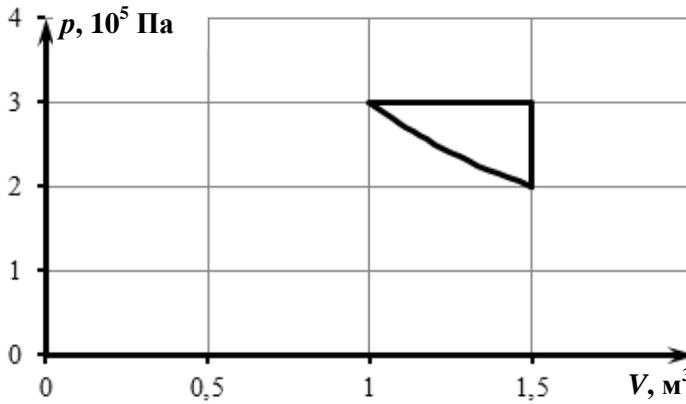
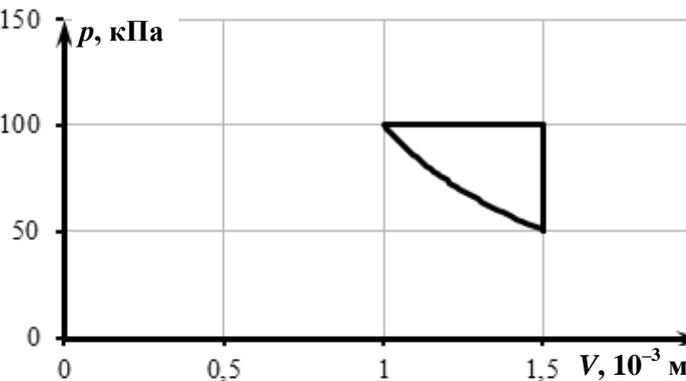
Определите:

- количество теплоты Q_H , полученной от нагревателя за цикл;
- количество теплоты Q_X , отданное охладителю за цикл;
- работу газа A за цикл;
- КПД цикла;
- максимальную T_{\max} и минимальную T_{\min} температуры цикла;
- КПД цикла Карно, проводимого в интервале температур от T_{\min} до T_{\max} данного цикла.

Варианты графиков циклов для задач 4.87–4.116

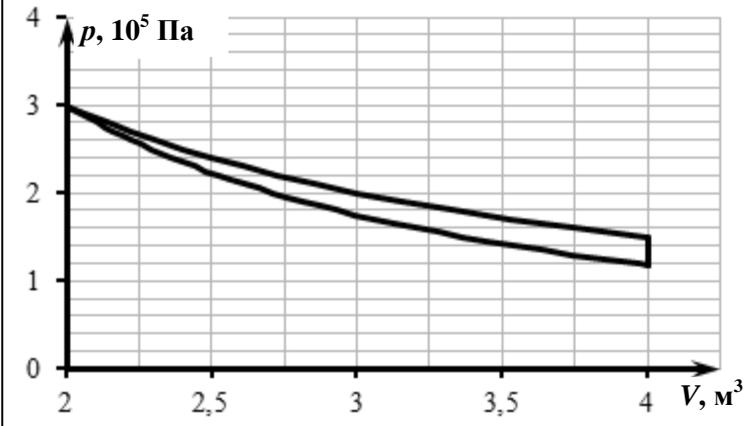
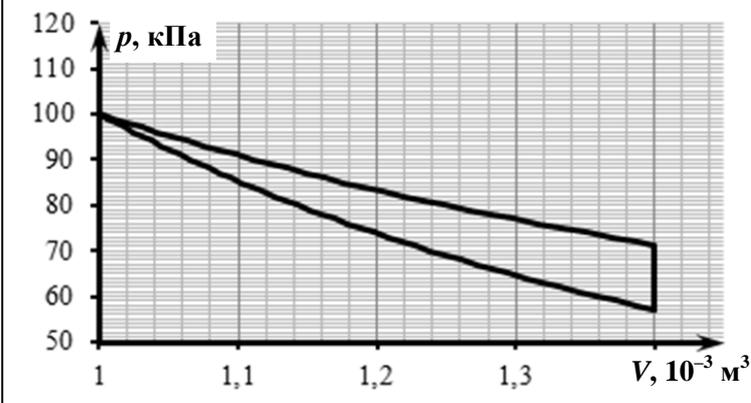
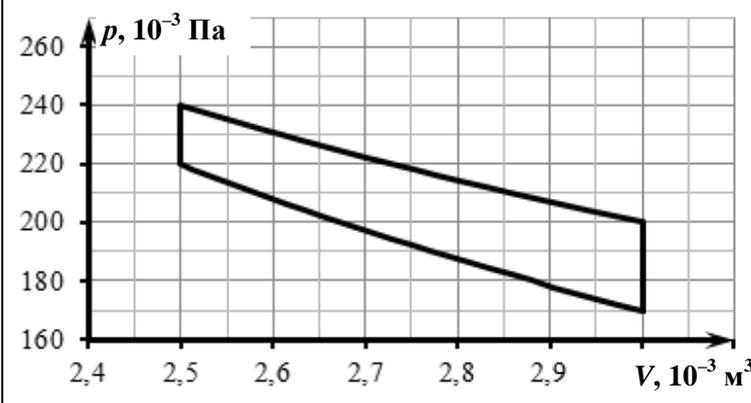
№	Газ	ν , моль	Цикл	
4.87	Многоатомный	1	две изохоры, две изобары	
4.88	Одноатомный	2	две изохоры, две изобары	
4.89	Двухатомный	3	две изохоры, две изобары	
4.90	Трехатомный	4	две изохоры, две изобары	

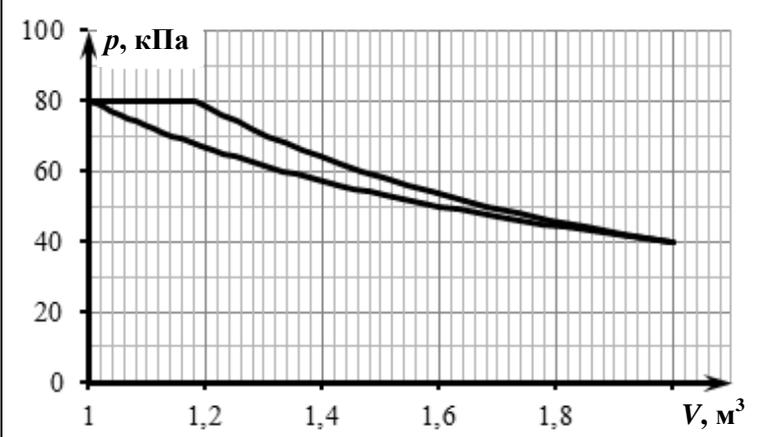
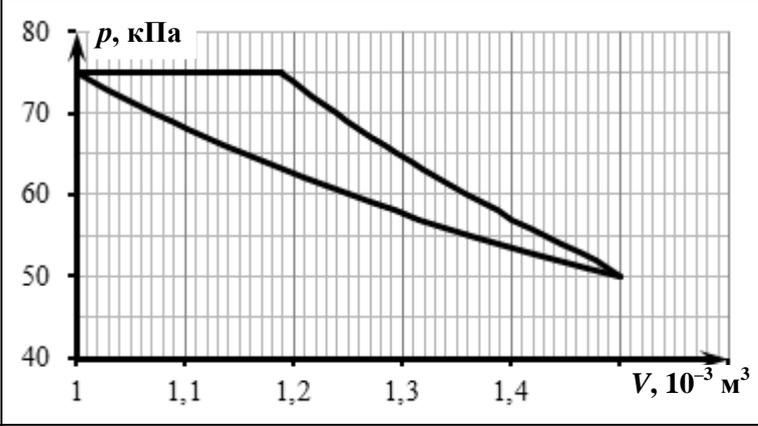
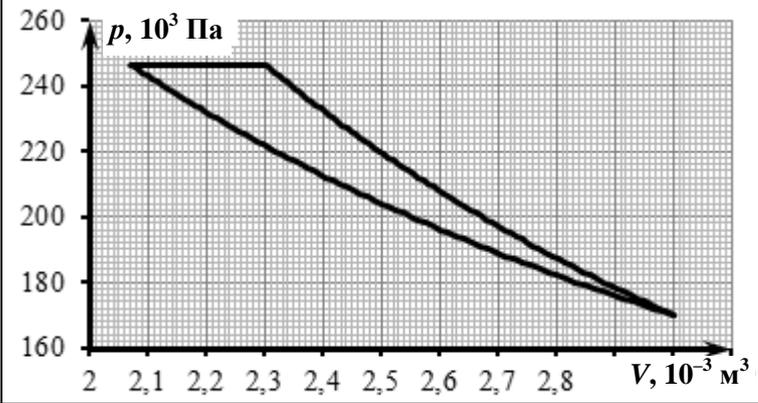
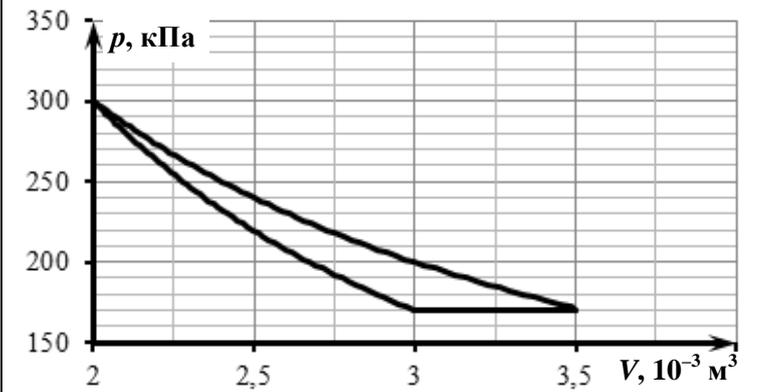
№	Газ	ν , моль	Цикл	
4.91	Многоатомный	1,5	изохора, изотерма, изобара	
4.92	Одноатомный	2,5	изохора, изотерма, изобара	
4.93	Двухатомный	3,5	изохора, изотерма, изобара	
4.94	Многоатомный	0,5	изобара, изохора, изотерма	

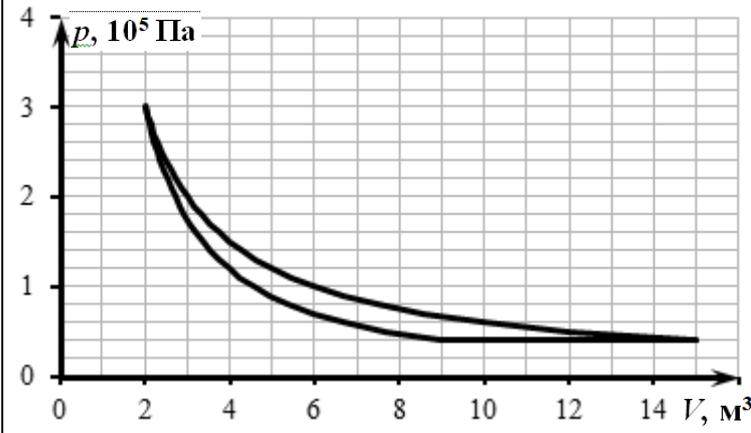
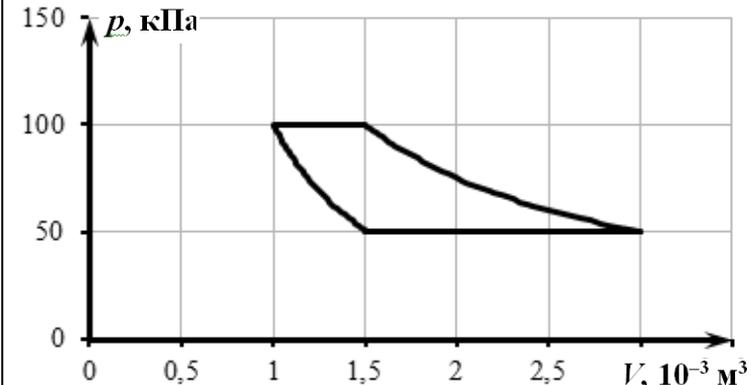
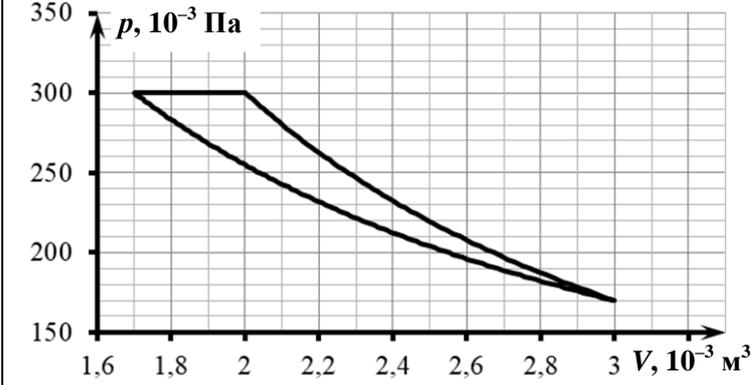
№	Газ	ν , моль	Цикл	
4.95	Одноатомный	1	изобара, изохора, изотерма	
4.96	Двухатомный	2	изобара, изохора, изотерма	
4.97	Многоатомный	3	изобара, изохора, адиабата	
4.98	Одноатомный	4	изобара, изохора, адиабата	

№	Газ	ν , моль	Цикл	
4.99	Двухатомный	1,5	изобара, изохора, адиабата	
4.100	Трехатомный	2,5	изобара, адиабата, изохора	
4.101	Многоатомный	3,5	изобара, адиабата, изохора	
4.102	Одноатомный	0,5	изохора, адиабата, изотерма	

№	Газ	ν , моль	Цикл	
4.103	Двухатомный	1	изохора, адиабата, изотерма	
4.104	Многоатомный	2	изохора, адиабата, изотерма	
4.105	Одноатомный	3	изобара, изохора, адиабата	
4.106	Двухатомный	4	изотерма, изохора, адиабата	

№	Газ	ν , моль	Цикл
4.107	Трехатомный	1,5	<p>изотерма, изохора, адиабата</p> 
4.108	Одноатомный	2,5	<p>изотерма, изохора, адиабата</p> 
4.109	Двухатомный	3,5	<p>изотерма, изохора, адиабата, изохора</p> 

№	Газ	ν , моль	Цикл
4.110	Многоатомный	0,5	<p>изобара, адиабата, изотерма</p> 
4.111	Одноатомный	1	<p>изобара, адиабата, изотерма</p> 
4.112	Двухатомный	2	<p>изобара, адиабата, изотерма</p> 
4.113	Двухатомный	3	<p>изотерма, изобара, адиабата</p> 

№	Газ	ν , моль	Цикл
4.114	Многоатомный	4	<p>изотерма, изобара, адиабата</p> 
4.115	Одноатомный	1,5	<p>изобара, изотерма, изобара, адиабата</p> 
4.116	Двухатомный	2,5	<p>изобара, адиабата, изотерма</p> 

V. ЭНТРОПИЯ

Энтропия S – это физическая величина, являющаяся функцией состояния термодинамической системы, изменение которой ΔS при переходе системы из некоторого состояния 1 в состояние 2 равно сумме приведенных количеств тепла, сообщенных системе при любом обратимом переходе из состояния 1 в 2 (5.1):

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}, \quad (5.1)$$

где $\frac{\delta Q}{T}$ – приведенное количество теплоты, оно не зависит от способа перехода системы из состояния 1 в состояние 2.

$$[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Используя первое начало термодинамики и закон Менделеева – Клапейрона, можно показать, что для идеального газа

$$\delta Q = \nu C_V dT + \nu RT \frac{dV}{V}. \quad (5.2)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \nu C_V \int_1^2 \frac{dT}{T} + \nu R \int_1^2 \frac{dV}{V} = \\ &= \nu C_V \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + \nu R \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right). \end{aligned} \quad (5.3)$$

Аналогично при нагревании или охлаждении жидкого или твердого тела

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{cm dT}{T} = cm \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right). \quad (5.4)$$

Изменение агрегатного состояния идет при постоянной температуре, поэтому

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q}{T} = \frac{\lambda m}{T}, \quad (5.5)$$

где λ – удельная теплота процесса (плавления, затвердевания, испарения или конденсации).

Энтропия – величина аддитивная, т. е. она равна сумме энтропий всех тел, входящих в систему (5.6):

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n, \quad (5.6)$$

где n – количество тел, входящих в систему.

Энтропия системы определяется с точностью до произвольной постоянной. Физический смысл имеет лишь разность энтропий двух состояний системы.

Физический смысл энтропии

Энтропия – мера беспорядочности теплового движения молекул, из которых состоит термодинамическая система.

Энтропия связана с микроскопическим строением системы и статистическим характером теплового движения частиц системы.

Статистический смысл энтропии

Энтропия – мера вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния системы (5.7):

$$S = k \ln W, \quad (5.7)$$

где k – постоянная Больцмана,

W – термодинамическая вероятность макросостояния – число микросостояний, осуществляющих данное макросостояние системы.

С точки зрения статистики, равновесное состояние термодинамической системы является наиболее вероятным.

Контрольные вопросы

1. Что такое приведенное количество теплоты?
2. В чем заключается физический смысл энтропии?
3. В чем заключается статистический смысл энтропии?
4. Что означает фраза «обесценивание энергии системы»?
5. Что такое микро- и макросостояния системы и как они связаны между собой?
6. Как объяснить с точки зрения статистики тот факт, что термодинамическая система, предоставленная себе, стремится к состоянию термодинамического равновесия?
7. Почему энтропия системы обычно определяется с точностью до некоторой константы?
8. Как рассчитать изменение энтропии идеального газа, если заданы начальное и конечное состояния системы, но неизвестен процесс, в ходе которого осуществлялся переход?

Задачи для аудиторных занятий

I уровень

5.1. Процессы, изображенные на рис. 5.1 и 5.2 в координатах $T-S$, являются...

- а) изотермическим расширением;
- б) адиабатным охлаждением;
- в) изохорным нагреванием;
- г) адиабатным сжатием;
- д) изобарным расширением.

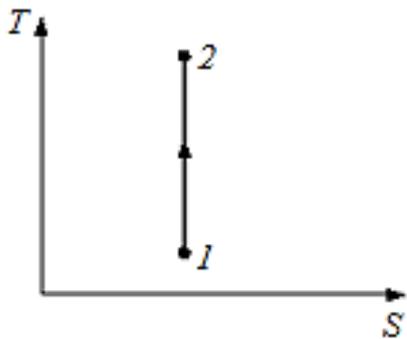


Рис. 5.1

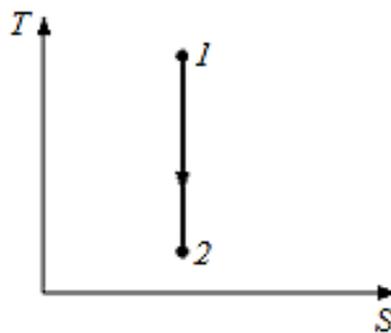


Рис. 5.2

5.2. На рис. 5.3 представлен цикл Карно в координатах T - S .

а) Адиабатное сжатие происходит на участке...

б) Изотермическое расширение происходит на участке...

в) Теплота подводится к системе на участке...

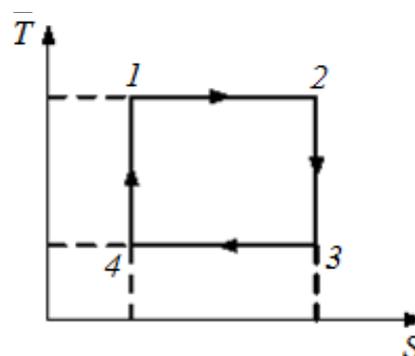


Рис. 5.3

5.3. Дополните утверждения:

а) Энтропия изолированной термодинамической системы в ходе необратимого процесса...

б) Энтропия изолированной термодинамической системы в ходе обратимого процесса...

в) В процессе изотермического сообщения теплоты постоянной массе идеального газа его энтропия...

г) В процессе изохорического охлаждения постоянной массы идеального газа его энтропия...

д) Энтропия неизолрированной системы в процессе плавления вещества в ней...

е) При изотермическом сжатии идеального газа его энтропия...

ж) При адиабатическом расширении идеального газа его энтропия...

II уровень

5.4. Теплоемкость металлов при низких температурах линейно зависит от температуры: $C = \alpha T$. Установите зависимость энтропии от температуры в таком случае, считая, что энтропия металла при абсолютном нуле температуры равна 0.

5.5. Чтобы расплавить некоторую массу меди, требуется в 1,5 раза больше теплоты, чем для плавления такой же массы цинка. Температура плавления меди примерно в 2 раза выше температуры плавления цинка. Если в процессе плавления энтропия цинка увеличилась на ΔS , то чему будет равно изменение энтропии меди в таком процессе?

5.6. Вычислите приращение энтропии при изобарном нагревании 1 кмоль трехатомного газа от 0°C до 200°C .

5.7. 2 кг льда, взятого при температуре -10°C , превратили в пар температурой 100°C . Вычислите приращение энтропии в этом процессе.

5.8. 3 л воды, взятой при температуре 300 К, смешали с 7 л воды температурой 350 К. Определите температуру смеси и приращение энтропии. Теплообменом с окружающими телами пренебречь.

5.9. Найдите приращение энтропии 2 моль идеального газа с показателем адиабаты 1,3, если в результате некоторого процесса объем газа увеличился в 2 раза, а давление уменьшилось в 3 раза.

5.10. В сосудах 1 и 2 находится по 1,2 моля газообразного гелия. Отношение объемов сосудов $V_2/V_1 = 2$, а отношение абсолютных температур гелия в них $T_1/T_2 = 1,5$. Считая газ идеальным, найдите разность энтропии гелия в этих сосудах ($S_2 - S_1$).

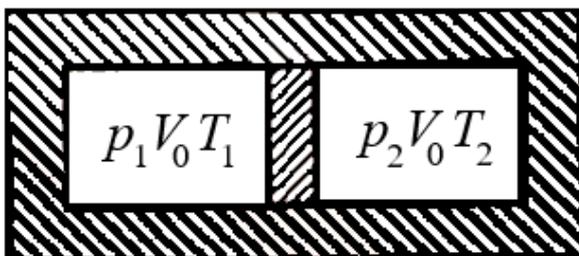


Рис. 5.4

5.11. Адиабатно изолированный сосуд разделен на две равные части жесткой и нетеплопроводной перегородкой (рис. 5.4). В каждой половине сосуда находится по одному молю одинакового идеального трех-

атомного газа: в левой половине – при температуре 600 К, в правой – при температуре 300 К. Перегородку убирают. Определите изменение энтропии газа после того, как установится равновесное состояние.

III уровень

5.12. В сосуде вместимостью 10 л находится углекислый газ в количестве 1 моль под давлением 4,325 атм. Затем его нагревают до тех пор, пока давление не вырастет в 2 раза. Найдите изменение энтропии газа, считая, что его поведение в этом процессе хорошо описывается моделью Ван-дер-Ваальса.

5.13. Один моль ван-дер-ваальсового газа, имевший объем V_1 и температуру T_1 , переведен в состояние с объемом V_2 и температурой T_2 . Найдите приращение энтропии газа, считая его молярную теплоемкость C_V известной.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

5.14. В результате изохорного нагревания водорода массой 1 г давление p газа увеличилось в два раза. Определите изменение энтропии газа.

5.15. Найдите изменение энтропии при изобарном расширении азота массой 4 г от объема 5 л до объема 9 л.

5.16. Кислород массой 2 кг увеличил свой объем в 5 раз один раз изотермически, другой – адиабатно. Найдите изменение энтропии в каждом из указанных процессов.

5.17. Вычислите изменение энтропии двух молей идеального двухатомного газа, если его температура изохорно повышается от 200 К до 300 К. Убывает энтропия газа или возрастает?

5.18. Один моль двухатомного идеального газа переводят из состояния с температурой 300 К и давлением 2 атм в состояние с температурой 600 К и давлением 1 атм. Найдите изменение энтропии газа при таком переходе.

5.19. Вычислите изменение энтропии при изотермическом сжатии трех молей идеального газа от 20 до 15 л. Убывает энтропия газа или возрастает? Газ двухатомный.

5.20. Вычислите изменение энтропии при изотермическом изменении давления шести молей идеального одноатомного газа от 9 до 6 МПа при комнатной температуре. Уменьшается или увеличивается при этом энтропия газа?

5.21. Вычислите изменение энтропии при изотермическом изменении давления трех молей идеального двухатомного газа от 5 до 7 МПа при комнатной температуре.

5.22. Вычислите изменение энтропии при изобарическом нагревании пяти молей идеального одноатомного газа от 200 до 300 К. Увеличивается или уменьшается при этом энтропия газа?

5.23. Вычислите изменение энтропии двух молей идеального двухатомного газа, если его давление изохорно увеличивается от 2 до 3 МПа. Увеличивается или уменьшается энтропия газа в этом случае?

5.24. Вычислите изменение энтропии восьми молей идеального одноатомного газа, если его температура изохорически убывает от 325 до 285 К. Убывает или возрастает энтропия газа?

5.25. Вычислите изменение энтропии трех молей идеального одноатомного газа, если ему изобарически сообщается 5 кДж тепла. Первоначальная температура газа равна 300 К. Увеличивается или уменьшается энтропия в этом случае?

5.26. Вычислите изменение энтропии семи молей идеального одноатомного газа, если его давление изохорически уменьшается от 7 до 5 МПа. Увеличивается или уменьшается энтропия газа?

5.27. Вычислите приращение энтропии 1 кг кислорода, взятого при нормальных условиях, после того как его сжали до объема 500 л и давления 3 атмосферы. Кислород считать идеальным газом.

5.28. Вычислите приращение энтропии 400 г гелия, взятого при нормальных условиях, если сначала его температуру изохорно увеличили

в 2 раза, а затем изобарно уменьшили до первоначального значения. Гелий считать идеальным газом.

5.29. Вычислите изменение энтропии пяти молей идеального одноатомного газа, если у него изохорно отнимается 3 кДж тепла. Начальная температура газа равна 350 К. Увеличивается или уменьшается энтропия газа?

5.30. 1 кмоль двухатомного идеального газа находится при некоторой температуре, охлаждается изохорически, вследствие чего его давление уменьшается в два раза. Затем газ изобарически расширяется так, что в конечном состоянии его температура равна первоначальной. Найдите приращение энтропии.

5.31. Водород массой 100 г был изобарно нагрет так, что его объем увеличился в 3 раза, затем водород был изохорно охлажден так, что давление его уменьшилось в 3 раза. Найдите изменение ΔS энтропии в ходе указанных процессов.

5.32. Вычислите изменение энтропии двух молей идеального двухатомного газа, если ему изохорно сообщаются 5 Дж тепла. Начальная температура газа равна 250 К.

5.33. Вычислите изменение энтропии четырех молей идеального одноатомного газа, если он изотермически отдает количество тепла 7 кДж. Температура газа равна 350 К. Увеличивается или уменьшается энтропия газа?

5.34. Вычислите изменение энтропии трех молей идеального двухатомного газа, если ему изотермически сообщается количество тепла 4 кДж. Температура газа равна 300 К.

5.35. Вычислите изменение энтропии пяти молей идеального двухатомного газа, если от него изобарически забирают 3 кДж тепла. Начальная температура газа равна 330 К.

5.36. Вычислите изменение энтропии трех молей идеального двухатомного газа, если газ изобарно сжимают от 2 до 1 л при комнатных температурах. Увеличивается или уменьшается при этом энтропия газа?

5.37. Найдите изменение энтропии при переходе 8 г кислорода от объема в 10 л при температуре 80 °С к объему в 40 л при температуре 300 °С.

5.38. 6,6 г водорода расширяется изобарически до увеличения объема в два раза. Найдите изменение энтропии при этом расширении.

5.39. Найдите изменение энтропии 5 г водорода, изотермически расширившегося от объема 10 л до объема 25 л.

5.40. Найдите приращение энтропии при расширении 2 г водорода от объема 1,5 л до объема 4,5 л, если процесс расширения происходит при постоянном давлении.

5.41. Азот, взятый при нормальных условиях в количестве 2 моль, сначала изотермически сжали в 2 раза, а затем адиабатно расширили до первоначального объема. Найдите приращение энтропии азота в этих процессах, считая его идеальным газом.

5.42. 10 г кислорода нагревают от 50 °С до 150 °С. Найдите изменение энтропии, если нагревание происходит: а) изохорически; б) изобарически.

5.43. При нагревании 1 кмоль двухатомного газа его абсолютная температура увеличивается в 1,5 раза. Найдите изменение энтропии, если нагревание происходит: а) изохорически; б) изобарически.

5.44. Смешали воду массой 5 кг при температуре 280 К с водой массой 8 кг при температуре 350 К. Найдите: а) температуру смеси; б) изменение энтропии ΔS , происходящее при смешивании.

5.45. Кусок льда массой 200 г, взятый при температуре -10 °С, был нагрет до температуры 0 °С и расплавлен, после чего образовавшаяся вода была нагрета до температуры 10 °С. Определите изменение энтропии ΔS в ходе указанных процессов.

5.46. Кусок льда массой 200 г, взятый при температуре -10 °С, превратили в воду температурой 90 °С. Определите изменение энтропии ΔS в ходе произошедших процессов.

5.47. Лед массой 2 кг при температуре 0 °С был превращен в воду той же температуры с помощью пара, имеющего температуру 100 °С. Опреде-

лите массу израсходованного пара. Каково изменение энтропии системы «лед – пар»?

5.48. Найдите приращение энтропии при превращении 200 г льда, находившегося при температуре $-10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, в воду. Теплоемкость льда считать не зависящей от температуры. Температуру плавления принять равной 273 К.

5.49. В воду массой 5 кг при температуре 323 К кинули льдинку массой 300 г при температуре 273 К. Найдите изменение энтропии в процессе установления теплового равновесия.

5.50. Водяной пар массой $m = 200$ г, взятый при температуре $t_1 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, превратили в воду температурой $t_2 = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите изменение энтропии в ходе произошедших процессов.

5.51. Олово массой 100 г, взятое при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, полностью расплавили. Найдите приращение энтропии в ходе произошедших процессов. Температура плавления олова $232\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.52. Олово массой 1 кг, взятое при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагревали до тех пор, пока половина куска не расплавилась. Найдите приращение энтропии в ходе произошедших процессов. Температура плавления олова $232\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.53. Свинцовый шарик массой 50 г, нагретый до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, бросили в 1 литр воды температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и дождались установления теплового равновесия. Определите изменение энтропии системы «свинец – вода» в ходе произошедших процессов.

5.54. Водяной пар массой 1 кг, взятый при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, превратили в лед температурой $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите изменение энтропии в ходе произошедших процессов.

5.55. От горячей воды, взятой в количестве 5 л, температурой $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, отводили теплоту до тех пор, пока половина ее не превратилась в лед. Определите изменение энтропии в ходе произошедших процессов.

5.56. Льдинку массой 50 г и температурой $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ бросили в воду массой 2 кг и температурой $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего дождались установления тепло-

вого равновесия. Определите изменение энтропии системы «лед – вода» в ходе произошедших процессов.

5.57. Смешали в равных количествах по 1 кг воду температурой $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и лед температурой $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите изменение энтропии системы после установления теплового равновесия.

5.58. Кипящий жидкий свинец массой 100 кг охладили до комнатной температуры ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Найдите приращение энтропии свинца в ходе произошедших процессов. Учтите, что свинец кипит при $1749\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.59. Известно, что энтропия воды объемом 10 л, взятой при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, уменьшилась на 6 кДж/К . Найдите конечную температуру воды.

5.60. Во сколько раз отличаются приращения энтропии воды при ее нагревании от температуры плавления до температуры кипения и при ее превращении в пар?

5.61. Во сколько раз отличаются приращения энтропии воды при ее охлаждении от температуры кипения до температуры плавления и при ее кристаллизации?

5.62. В первом процессе некоторое количество воды, взятой при температуре плавления, превратили в лед. Во втором процессе такое же количество воды, взятой при температуре кипения, превратили в пар. Во сколько раз отличаются модули приращения энтропий в этих двух процессах?

5.63. Энтропия льда массой 20 кг, взятого при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, уменьшилась на 12 кДж/К . Найдите конечную температуру льда. Теплоемкость льда считайте постоянной.

5.64. В первом процессе некоторое количество воды, взятой при температуре плавления, превратили в лед. При этом ее энтропия уменьшилась на 10 кДж/К . Во втором процессе в 2 раза большее количество воды, взятой при температуре кипения, превратили в пар. На сколько увеличилась энтропия воды во втором процессе?

5.65. При кристаллизации жидкого свинца, взятого при температуре плавления, его энтропия уменьшилась на 15 кДж/К . Определите массу

этого свинца. Температура плавления свинца $327\text{ }^{\circ}\text{C}$, его удельная теплота плавления $24,3\text{ кДж/кг}$.

5.66. Жидкое олово массой 500 г , взятое при температуре плавления ($232\text{ }^{\circ}\text{C}$), довели до комнатной температуры ($22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Найдите приращение энтропии в ходе произошедших процессов.

5.67. Энтропия льда, взятого при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, уменьшилась на 24 кДж/К после его охлаждения до температуры $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найдите массу льда. Удельную теплоемкость льда считайте постоянной и равной $2100\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

5.68. В каком из двух процессов приращение энтропии больше и на сколько: в первом процессе 1 кг льда, взятого при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагрели на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$; во втором процессе 1 кг воды, взятой при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагрели на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$?

5.69. В каком из двух процессов модуль приращения энтропии больше и на сколько: в первом процессе расплавили 1 кг льда, взятого при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; во втором процессе 1 кг воды, взятой при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, нагрели на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$?

5.70. Для плавления льда, взятого при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ему передали 100 кДж теплоты. Такое же количество теплоты передали воде, находящейся при температуре кипения, чтобы ее испарить. В каком из этих случаев приращение энтропии было больше и на сколько?

5.71. Энтропия воды, взятой при температуре $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, увеличилась на 24 кДж/К после ее нагревания до температуры $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найдите массу воды. Ее удельную теплоемкость считайте постоянной и равной $4200\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$.

5.72. Стальной шарик массой 100 г и температурой $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ бросили в 1 литр воды температурой $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и дождались установления теплового равновесия. Определите изменение энтропии системы «сталь – вода» в ходе произошедших процессов.

5.73. Свинцовый и оловянный шарики массами по 100 г взяли при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нагрели каждый до своей температуры плавления. В каком из двух процессов приращение энтропии шарика больше и на сколько?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Раздел курса общей физики «Молекулярная физика и термодинамика» представлен в практикуме пятью темами: МКТ, статистические распределения, явления переноса, начала термодинамики и энтропия. Практического изучения этих тем достаточно для того, чтобы составить общее впечатление о содержании раздела и овладеть типовыми приемами решения задач. Заинтересованному в более развернутом освоении предмета студенту необходимо обратиться к классическим учебникам и сборникам задач. Несколько достойных представителей этой группы перечислены в списке литературы, но ограничиваться ими совершенно не обязательно.

Следующий раздел курса общей физики, входящий в программу обучения студентов технических вузов, – «Электростатика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие для физ. специальностей вузов / Д. В. Сивухин. – Т. II : Термодинамика и молекулярная физика. – Москва : Наука, 1975. – 552 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для втузов : в 5 кн. / И. В. Савельев. – Москва : АСТ : Астрель, 2001. – Кн. 3 : Молекулярная физика и термодинамика. – 2001. – 208 с. – ISBN 5-271-01305-7.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инженер.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – Москва : Высшая школа, 2003. – 542 с. – ISBN 5-06-003634-0.
4. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Высшая школа, 1999. – 718 с. – ISBN 5-06-003556-5.
5. Оорир, Дж. Физика. Полный курс: примеры, задачи, решения : учеб. / Дж. Оорир ; пер. с англ. под ред. Ю. Г. Рудого, А. В. Беркова. – Москва : КДУ, 2011. – 752 с. – ISBN 978-5-98227-366-6.
6. Трофимова, Т. И. Сборник задач по курсу физики : учеб. пособие для студентов втузов / Т. И. Трофимова. – 2-е изд., стер. – Москва : Высш. шк., 1996. – 303 с. – ISBN 5-06-003395-3.
7. Савельев, И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике : учеб. пособие для втузов / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1988. – 288 с. – ISBN 5-02-013851-7.
8. Иродов, И. Е. Сборник задач по общей физике : учеб. пособие для втузов / И. Е. Иродов, О. И. Замша ; под ред. И. В. Савельева. – Москва : Наука, 1972. – 256 с.
9. Волькенштейн, В. С. Сборник задач по общему курсу физики : учеб. пособие для втузов / В. С. Волькенштейн. – 11-е изд. – Москва : Наука, 1985. – 381 с.
10. Чертов, А. Г. Задачник по физике : учеб. пособие для студентов втузов / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – 6-е изд., испр. – Москва : Интеграл-Пресс, 1997. – 544 с. – ISBN 5-89602-001-5.

ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Номер варианта	Осн. ур-е МКТ и газовые законы	Изопроцессы	Распределение Максвелла	Распределение Больцмана	Явления переноса	Первое начало ТД	Теплоемкость. Коэффициент Пуассона	Второе начало ТД. Циклы	Приращение энтропии идеального газа	Приращение энтропии жидкостей и твердых тел
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1.46	1.76	2.21	2.66	3.24	4.27	4.57	4.87	5.14	5.44
2	1.47	1.77	2.22	2.67	3.25	4.28	4.58	4.88	5.15	5.45
3	1.48	1.78	2.23	2.68	3.26	4.29	4.59	4.89	5.16	5.46
4	1.49	1.79	2.24	2.69	3.27	4.30	4.60	4.90	5.17	5.47
5	1.50	1.80	2.25	2.70	3.28	4.31	4.61	4.91	5.18	5.48
6	1.51	1.81	2.26	2.71	3.29	4.32	4.62	4.92	5.19	5.49
7	1.52	1.82	2.27	2.72	3.30	4.33	4.63	4.93	5.20	5.50
8	1.53	1.83	2.28	2.73	3.31	4.34	4.64	4.94	5.21	5.51
9	1.54	1.84	2.29	2.74	3.32	4.35	4.65	4.95	5.22	5.52
10	1.55	1.85	2.30	2.75	3.33	4.36	4.66	4.96	5.23	5.53
11	1.56	1.86	2.31	2.76	3.34	4.37	4.67	4.97	5.24	5.54
12	1.57	1.87	2.32	2.77	3.35	4.38	4.68	4.98	5.25	5.55
13	1.58	1.88	2.33	2.78	3.36	4.39	4.69	4.99	5.26	5.56
14	1.59	1.89	2.34	2.79	3.37	4.40	4.70	4.100	5.27	5.57
15	1.60	1.90	2.35	2.80	3.38	4.41	4.71	4.101	5.28	5.58
16	1.61	1.76	2.36	2.81	3.39	4.42	4.72	4.102	5.29	5.59
17	1.62	1.77	2.37	2.82	3.40	4.43	4.73	4.103	5.30	5.60
18	1.63	1.78	2.38	2.83	3.41	4.44	4.74	4.104	5.31	5.61
19	1.64	1.79	2.39	2.84	3.42	4.45	4.75	4.105	5.32	5.62
20	1.65	1.80	2.40	2.85	3.43	4.46	4.76	4.106	5.33	5.63
21	1.66	1.81	2.41	2.86	3.44	4.47	4.77	4.107	5.34	5.64
22	1.67	1.82	2.42	2.87	3.45	4.48	4.78	4.108	5.35	5.65
23	1.68	1.83	2.43	2.88	3.46	4.49	4.79	4.109	5.36	5.66
24	1.69	1.84	2.44	2.89	3.47	4.50	4.80	4.110	5.37	5.67
25	1.70	1.85	2.45	2.90	3.48	4.51	4.81	4.111	5.38	5.68
26	1.71	1.86	2.46	2.91	3.49	4.52	4.82	4.112	5.39	5.69
27	1.72	1.87	2.47	2.92	3.50	4.53	4.83	4.113	5.40	5.70
28	1.73	1.88	2.48	2.93	3.51	4.54	4.84	4.114	5.41	5.71
29	1.74	1.89	2.49	2.94	3.52	4.55	4.85	4.115	5.42	5.72
30	1.75	1.90	2.50	2.95	3.53	4.56	4.86	4.116	5.43	5.73

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Скорость света в вакууме	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Газовая постоянная	$R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{К})}$
Число Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}},$ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{М}}{\text{Ф}}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$
Постоянная Планка	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$ $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а. е. м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Электрон-вольт	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$
Нормальные условия	$p = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101\,325 \text{ Па},$ $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
Молярная масса воздуха	$0,029 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Приставки для образования кратных и дольных единиц

Кратные			Дольные		
Приставка	Обозначение	Множитель	Приставка	Обозначение	Множитель
дека	да	10^1	деци	д	10^{-1}
гекто	г	10^2	санتي	с	10^{-2}
кило	к	10^3	милли	м	10^{-3}
мега	М	10^6	микро	мк	10^{-6}
гига	Г	10^9	нано	н	10^{-9}
тера	Т	10^{12}	пико	п	10^{-12}
пета	П	10^{15}	фемто	ф	10^{-15}
экса	Э	10^{18}	атто	а	10^{-18}

Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева

Периоды	Ряды	Группы элементов											
		a I б	a II б	a III б	a IV б	a V б	a VI б	a VII б	a б	б VIII б	б	б	
1	1	H ¹ 1,0079 Водород							(H)	He ² 4,00260 Гелий			
2	2	Li ³ 6,941 Литий	Be ⁴ 9,01218 Бериллий	B ⁵ 10,81 Бор	C ⁶ 12,011 Углерод	N ⁷ 14,0067 Азот	O ⁸ 15,9994 Кислород	F ⁹ 18,99840 Фтор	Ne ¹⁰ 20,179 Неон				
3	3	Na ¹¹ 22,98977 Натрий	Mg ¹² 24,305 Магний	Al ¹³ 26,98154 Алюминий	Si ¹⁴ 28,086 Кремний	P ¹⁵ 30,97376 Фосфор	S ¹⁶ 32,06 Сера	Cl ¹⁷ 35,453 Хлор	Ar ¹⁸ 39,984 Аргон				
4	4	K ¹⁹ 39,098 Калий	Ca ²⁰ 40,08 Кальций	Sc ²¹ 44,9559 Скандий	Ti ²² 47,90 Титан	V ²³ 50,9414 Ванадий	Cr ²⁴ 51,996 Хром	Mn ²⁵ 54,9380 Марганец	Fe ²⁶ 55,847 Железо	Co ²⁷ 58,9332 Кобальт	Ni ²⁸ 58,70 Никель		
	5	Cu ²⁹ 63,546 Медь	Zn ³⁰ 65,38 Цинк	Ga ³¹ 69,72 Галлий	Ge ³² 72,59 Германий	As ³³ 74,9216 Мышьяк	Se ³⁴ 78,96 Селен	Br ³⁵ 79,904 Бром	Kr ³⁶ 83,80 Криптон				
5	6	Rb ³⁷ 85,4678 Рубидий	Sr ³⁸ 87,62 Стронций	Y ³⁹ 88,9059 Иттрий	Zr ⁴⁰ 91,22 Цирконий	Nb ⁴¹ 92,9064 Ниобий	Mo ⁴² 95,94 Молибден	Tc ⁴³ [97] Технеций	Ru ⁴⁴ 101,07 Рутений	Rh ⁴⁵ 102,9055 Родий	Pd ⁴⁶ 106,4 Палладий		
	7	Ag ⁴⁷ 107,868 Серебро	Cd ⁴⁸ 112,40 Кадмий	In ⁴⁹ 114,82 Индий	Sn ⁵⁰ 118,69 Олово	Sb ⁵¹ 121,75 Сурьма	Te ⁵² 127,60 Теллур	I ⁵³ 126,9045 Иод	Xe ⁵⁴ 131,30 Ксенон				
6	8	Cs ⁵⁵ 132,9054 Цезий	Ba ⁵⁶ 137,34 Барий	La* ⁵⁷ 138,9055 Лантан	Hf ⁷² 178,49 Гафний	Ta ⁷³ 180,9479 Тантал	W ⁷⁴ 183,85 Вольфрам	Re ⁷⁵ 186,207 Рений	Os ⁷⁶ 190,2 Осмий	Ir ⁷⁷ 192,22 Иридий	Pt ⁷⁸ 195,09 Платина		
	9	Au ⁷⁹ 196,9665 Золото	Hg ⁸⁰ 200,59 Ртуть	Tl ⁸¹ 204,37 Таллий	Pb ⁸² 207,2 Свинец	Bi ⁸³ 208,9804 Висмут	Po ⁸⁴ [209] Полоний	At ⁸⁵ [210] Астат	Rn ⁸⁶ [222] Радон				
7	10	Fr ⁸⁷ [223] Франций	Ra ⁸⁸ [226] Радий	Ac** ⁸⁹ [227] Актиний	Rf ¹⁰⁴ [261] Резерфордий	Db ¹⁰⁵ [262] Дубний	Sg ¹⁰⁶ [263] Сиборгий	Bh ¹⁰⁷ [264] Борий	Hs ¹⁰⁸ [265] Хассий	Mt ¹⁰⁹ [266] Мейтнерий	Ds ¹¹⁰ [271] Дармштадтий		

* Лантаноиды

58 Ce 4f ¹ 5d ¹ 6s ² 140,12 Церий	59 Pr 4f ³ 6s ² 140,9077 Празеодим	60 Nd 4f ⁴ 6s ² 144,24 Неодим	61 Pm 4f ⁵ 6s ² [145] Прометий	62 Sm 4f ⁶ 6s ² 150,4 Самарий	63 Eu 4f ⁷ 6s ² 151,96 Европий	64 Gd 4f ⁷ 5d ¹ 6s ² 157,25 Гадолиний	65 Tb 4f ⁹ 6s ² 158,9254 Тербий	66 Dy 4f ¹⁰ 6s ² 162,50 Диспрозий	67 Ho 4f ¹¹ 6s ² 164,9304 Гольмий	68 Er 4f ¹² 6s ² 167,26 Эрбий	69 Tm 4f ¹³ 6s ² 168,9342 Туллий	70 Yb 4f ¹⁴ 6s ² 173,04 Иттербий	71 Lu 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ² 174,97 Лютеций
--	--	---	--	---	--	--	---	---	---	---	--	--	---

** Актиноиды

90 Th 6d ² 7s ² 232,0381 Торий	91 Pa 5f ² 6d ¹ 7s ² [231] Протактиний	92 U 5f ³ 6d ¹ 7s ² 238,029 Уран	93 Np 5f ⁴ 6d ¹ 7s ² [237] Нептуний	94 Pu 5f ⁶ 7s ² [244] Плутоний	95 Am 4f ⁷ 6s ² [243] Америций	96 Cm 5f ⁷ 7s ² [247] Кюрий	97 Bk 5f ⁹ 6d ¹ 7s ² [247] Берклий	98 Cf 5f ¹⁰ 7s ² [251] Калифорний	99 Es 5f ¹¹ 7s ² [254] Эйнштейний	100 Fm 5f ¹² 7s ² [257] Фермий	101 Md 5f ¹³ 7s ² [258] Менделевий	102 No 5f ¹⁴ 7s ² [259] Нобелий	103 Lr 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² [260] Лоуренсий
--	---	---	--	--	--	---	---	---	---	--	--	---	---

Плотности некоторых твердых тел

Твердое тело	ρ , кг/м ³	Твердое тело	ρ , кг/м ³
Осмий	22 600	Мрамор	2 700
Иридий	22 400	Стекло оконное	2 500
Платина	21 500	Фарфор	2 300
Золото	19 300	Бетон	2 300
Свинец	11 300	Кирпич	1 800
Серебро	10 500	Сахар-рафинад	1 600
Медь	8 900	Оргстекло	1 200
Латунь	8 500	Капрон	1 100
Сталь, железо	7 800	Полиэтилен	920
Олово	7 300	Парафин	900
Цинк	7 100	Лед	900
Чугун	7 000	Дуб (сухой)	700
Корунд	4 000	Сосна (сухая)	400
Алюминий	2 700	Пробка	240

Плотности некоторых жидкостей

Жидкость	ρ , кг/м ³	Жидкость	ρ , кг/м ³
Ртуть	13 600	Керосин	800
Серная кислота	1 800	Спирт	800
Мед	1 350	Нефть	800
Вода морская	1 030	Ацетон	790
Молоко цельное	1 030	Эфир	710
Вода чистая	1 000	Бензин	710
Масло подсолнечное	930	Жидкое олово (при $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)	6 800
Масло машинное	900	Жидкий воздух (при $t = -194\text{ }^{\circ}\text{C}$)	860

Плотности некоторых газов при нормальных условиях

Газ	ρ , кг/м ³	Газ	ρ , кг/м ³
Хлор	3,210	Природный газ	0,800
Оксид углерода (IV) (углекислый газ)	1,980	Оксид углерода (II) (угарный газ)	1,250
Кислород	1,430	Водяной пар (при $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$)	0,590
Воздух	1,290	Гелий	0,180
Азот	1,250	Водород	0,090

Удельная теплоемкость некоторых материалов

Вещество	Агрегатное состояние	c , Дж/(кг·К)	Вещество	Агрегатное состояние	c , Дж/(кг·К)
Золото	твердое	129	Кирпич	твердое	840
Свинец	твердое	130	Оконное стекло	твердое	840
Иридий	твердое	134	Мрамор	твердое	840
Вольфрам	твердое	134	Соль поваренная	твердое	880
Платина	твердое	134	Слюда	твердое	880
Ртуть	жидкое	139	Нефть	жидкое	880
Олово	твердое	218	Глина	твердое	900
Серебро	твердое	234	Алюминий	твердое	930
Цинк	твердое	380	Гипс	твердое	1 090
Латунь	твердое	380	Бетон	твердое	1 130
Медь	твердое	385	Каменный уголь	твердое	1 300
Константан	твердое	410	Машинное масло	жидкое	1 670
Железо	твердое	444	Бензин	жидкое	2 050
Сталь	твердое	460	Лед	твердое	2 100
Чугун	твердое	500	Ацетон	жидкое	2 160

Окончание табл.

Вещество	Агрегатное состояние	c, Дж/(кг·К)	Вещество	Агрегатное состояние	c, Дж/(кг·К)
Никель	твердое	500	Парафин	жидкое	2 200
Алмаз	твердое	502	Этанол (спирт)	жидкое	2 390
Кварц	твердое	750	Глицерин	жидкое	2 430
Гранит	твердое	770	Метиловый спирт	жидкое	2 470
Фарфор	твердое	800	Литий	твердое	3 582
Цемент	твердое	800	Вода морская (6 % соли)	жидкое	3 780
Базальт	твердое	820	Вода морская (3 % соли)	жидкое	3 930
Песок	твердое	835	Вода	жидкое	4 200
Графит	твердое	840	Нашатырный спирт	жидкое	4 730

ОТВЕТЫ

- 1.1. $3 \cdot 10^{-26}$ кг.
1.2. 93,75 моля.
1.3. 900 молей.
1.4. $3,3 \cdot 10^{12}$.
1.5. $3,01 \cdot 10^{24}$.
1.6. 0,4.
1.7. 0,25.
1.8. 16.
1.9. 0,5.
1.10. 2.
1.11. 3.
1.12. 98 кПа.
1.13. $1,3 \text{ кг/м}^3$.
1.14. $2 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.
1.15. 22 г.
1.16. 1,5.
1.17. $0,1 \text{ м}^3$.
1.18. 1,5.
1.19. $29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.
1.20. $1,2 \cdot 10^4 \text{ Па}$.
1.21. $4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.
1.22. а) $p_2 = \frac{8}{3} p_1$; б) $V_2 = \frac{8}{3} V_1$;
в) $T_1 = 1,25 T_2$.
1.23. 22 см.
1.24. $6 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.
1.25. 500 м/с.
1.26. $3,9 \cdot 10^{18}$.
1.27. 2,2 мг.
1.28. 1 молекула.
1.29. $2 \cdot 10^{27}$.
1.30. $0,51 \text{ кг/м}^3$.
1.31. $p = \frac{(p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3) T}{(V_1 + V_2 + V_3) T_0}$.
1.32. 346 К.
1.33. 50 %.
1.34. 26,5 Н.
1.35. $\approx 394 \text{ К}$.
1.36. 0,01 м.
1.37. $8,05 \cdot 10^{25}$.
1.38. Опустится на 19 см.
1.40. $\approx 0,25 \text{ кг/м}^3$.
1.41. 65,6 кПа.
1.42. $p_1 = \left(\frac{m_1}{2M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{2RT}{V}$; $p_2 = \frac{m_1 RT}{M_1 V}$.
1.43. 10 кПа.
1.44. $\approx 0,6$.
2.2. Увеличится в \sqrt{n} раз.
2.8. 632 м/с; 582 м/с; 516 м/с.
2.9. 340 К.
2.10. 83,4 К.
2.11. $7,52 \cdot 10^{-7}$.
2.12. $5,62 \cdot 10^{-3}$.
2.13. 328 К.
2.14. $5,51 \cdot 10^{-4}$.
2.15. $1,07 \cdot 10^{-3}$.
2.16. 381 К.
2.17. В 3 раза.
2.20. а) 57,2 %; б) 42,8 %.
2.54. 1,13.
2.55. 1,1 %.
2.56. 5,5 км.
2.57. 85 км.
2.58. 1,7.
2.59. 700 м/с^2 .

$$2.60. h = \frac{\eta RT}{Mg} \ln \frac{\eta}{\eta-1}.$$

$$2.61. m = \frac{P_0 S}{g} \left(1 - \exp \frac{Mgh}{RT}\right).$$

$$2.62. 1,5 \cdot 10^{-20} \text{ Н.}$$

$$2.63. 280 \text{ рад/с.}$$

$$2.64. \text{ а) } dN = 4\pi r^2 n_0 \exp\left(-\frac{\alpha r^2}{kT}\right) dr;$$

$$\text{ б) } r_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{kT}{\alpha}};$$

в) увеличится в $\eta^{3/2}$ раз.

$$2.65. M = \frac{2\rho RT \ln \eta}{(\rho - \rho_0)(r_2^2 - r_1^2)\omega^2}.$$

3.4. Увеличится в 2 раза.

3.5. Увеличится в 2,83 раза.

3.6. Уменьшится в 1,41 раза.

3.7. 372 К.

3.8. 0,539 Па.

3.9. $9,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$

3.10. 1,25.

3.11. $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}).$

3.12. 26,7 мВт/(м·К).

3.13. 7,42 мВт/(м·К).

3.14. 76,4 Дж.

3.15. 1800 Вт.

3.16. 0,92 кВт.

3.17. 15 кг.

3.18. 2,9 мПа·с.

3.19. 2,69 м/с.

3.20. 15,6 мг.

3.21. $p \leq 1,55 \text{ Па.}$

3.23. 240 Вт/м; 300 °С; 233 °С.

4.4. 0,6.

4.5. $\frac{5}{2} kT.$

4.6. $\frac{3}{5}.$

4.7. 2,5.

4.8. 0,5.

4.9. 5.

4.10. 0,65 кДж/(кг·К).

4.11. $\approx 1,88.$

4.12. 25 %, 45 кДж.

4.14. -3 °С; -23,64 кДж.

4.15. -10,24 МДж.

4.16. 16,62 Дж/(моль·К).

4.17. 1,47.

4.18. 264 К; 1,76 кДж;

-1,62 кДж; -0,14 кДж.

4.19. 8,8 кДж.

4.20. 1,28 МДж; 13 %; 50 %.

4.21. 2,47 кг.

4.22. 7,61 МДж; 7,21 МДж; 0,4 МДж;

5,3 %.

4.23. 10,9 %.

4.24. 19,8 Дж.

4.25. 69,3 Дж; 62,5 Дж; 6,8 Дж;

9,8 %; 240 К; 180,5 К; 37,3 %.

$$4.26. \eta = 1 - \frac{2T_3}{T_1 + T_2}.$$

5.4. $S = \alpha T.$

5.5. $0,75 \Delta S.$

5.6. 18,27 кДж/К.

5.7. 17,5 кДж/К.

5.8. 98,2 Дж/К.

5.9. -11 Дж/К.

5.10. 0,85 Дж/К.

5.11. 3 Дж/К.

5.12. 17,176 Дж/К.

$$5.13. \Delta S = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b}.$$