

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА

ВВОДНЫЙ КУРС

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2018

УДК 53(075.8)
Ф 503

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор *Л.А. Боряняк*
канд. техн. наук, доцент *В.В. Христофоров*

Работа подготовлена на кафедре общей физики

Ф 503 **Физика. Вводный курс. Основы молекулярной физики и термодинамики:** учебное пособие / Н.Ю. Петров, Е.И. Кренева, Н.В. Тарасенко, М.Р. Мирсияпов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 132 с.

ISBN 978-5-7782-3686-8

Учебное пособие содержит краткие теоретические сведения по основным разделам молекулярной физики и термодинамики, необходимые для последующего освоения общей физики в рамках курса «Физика» в техническом вузе, вопросы для самоконтроля, методические указания к решению задач, примеры их решения и разноуровневые задачи для самостоятельного решения. Также в пособии приведены задания для подготовки к итоговому тестированию, завершающему изучение вводного курса.

Предназначено для студентов младших курсов технических вузов, в учебной программе которых предусмотрен вводный курс по физике. Также может быть полезным для абитуриентов и преподавателей физики средних и высших учебных заведений.

УДК 53(075.8)

Петров Никита Юрьевич, Кренева Елена Ивановна
Тарасенко Наталья Валентиновна, Мирсияпов Марис Рафаэлевич

ФИЗИКА
ВВОДНЫЙ КУРС
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ
Учебное пособие

Редактор *М.О. Мокшанова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 26.10.2018. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 7,67. Печ. л. 8,25. Изд. № 402/17. Заказ № 1452. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ISBN 978-5-7782-3686-8

© Петров Н.Ю., Кренева Е.И.,
Тарасенко Н.В., Мирсияпов М.Р., 2018
© Новосибирский государственный
технический университет, 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вниманию читателя представлена вторая часть из серии работ, предназначенных для студентов младших курсов, в программу которых включен *вводный курс по физике*.

Предыдущая часть [1] была посвящена классической механике. В частности, в ней были рассмотрены такие разделы механики, как кинематика и динамика материальной точки и поступательного движения твердого тела, кинематика вращательного движения твердого тела, законы сохранения механической энергии и импульса. В пособии были рассмотрены такие важные темы, как физические величины и единицы измерения, размерность физической величины.

Также в [1] приведены основы математического аппарата, знание которого необходимо при изучении курса «Физика».

Представленное пособие посвящено основам *молекулярной физики и термодинамики*. В частности, рассмотрены следующие разделы.

1. Основные принципы молекулярно-кинетической теории. Масса и скорость молекул. Количество вещества.
2. Уравнение состояния идеального газа. Опытные газовые законы.
3. Основное уравнение МКТ идеальных газов.
4. Первый закон термодинамики. Изопроцессы в идеальном газе с постоянным числом частиц.
5. Циклы. Принципы действия тепловых машин. КПД.
6. Уравнение теплового баланса. Изменение агрегатных состояний вещества. Влажность воздуха. Капиллярные явления.

Учебное пособие позволит студентам за сравнительно небольшой срок повторить теоретический материал и получить основные сведения о методах решения задач.

Содержание и уровень сложности заданий соответствуют программе курса физики для средней (полной) школы.

Стоит отметить, что, несмотря на самостоятельность данного учебного пособия, к его изучению желательно переходить после рассмотрения работы [1].

Работу с книгой рекомендуется начать с изучения теоретического материала к соответствующему разделу. Без владения физической терминологией, без понимания фундаментальных физических законов приступать к решению задач бессмысленно. Чтобы понимать суть задачи, нужно уметь говорить на языке физики.

После изучения теоретического материала следует проверить, насколько хорошо вы его усвоили. Пособие содержит вопросы для самоконтроля, которые приведены после теоретической справки. Эти вопросы могут помочь выявить пробелы в изученном материале и впоследствии устранить их.

Следует отметить, что в учебном пособии приведена только **краткая** теоретическая справка, которая предназначена для **повторения** фундаментальных понятий и законов некоторых разделов молекулярной физики и термодинамики. Для более глубокого изучения нужно воспользоваться классическим учебником по общей физике для технических вузов.

Как только вы будете уверены, что в достаточной мере владеете теорией, прочитайте методические указания к решению задач. В них выделены наиболее существенные моменты и сформулированы общие подходы к решению большинства физических задач по молекулярной физике и термодинамике.

Ознакомьтесь с примерами решения задач, которые приведены в каждом разделе. В примерах подробно расписаны алгоритмы решения типовых задач. После изучения примера попробуйте **самостоятельно** воспроизвести решение рассматриваемой задачи. Проанализируйте, какие моменты или этапы решения вызвали у вас затруднения.

На следующем этапе перейдите к решению задач, приведенных в конце каждой главы в параграфе «*Задачи для самостоятельного решения*». При возникновении трудностей в решении задач вернитесь к предыдущим этапам (*теория* → *методические указания* → *примеры*).

Тестовые задания для подготовки к итоговому тестированию, которое проходит в конце вводного курса, приведены в конце пособия в прил. А. При выполнении заданий постарайтесь не пользоваться вспомогательными материалами. Проанализируйте, какие задачи вызвали у вас наибольшие затруднения. Повторите необходимый теоретический материал, просмотрите примеры решения подобных задач.

В качестве вспомогательной литературы можно использовать пособие [2].

ВВЕДЕНИЕ

В1. ИСХОДНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

В курсе механики при изучении движения материальных точек или твердых тел под действием различных сил мы не рассматривали внутреннюю структуру этих тел. Из классической механики нам известно только то, что тела обладают массой и имеют определенные геометрические размеры.

Очевидно, что размер и масса тел не исчерпывают всех их свойств. В ряде случаев внутренней структурой тел пренебречь невозможно. В частности, это касается изучения различных сред (например, при изучении атмосферы Земли ее нельзя рассматривать как статичный объект). Свойства тел зависят от их внутреннего строения, от того, из каких частиц они состоят, от сил взаимодействия между структурными элементами тел и т. д. Поэтому вопрос о строении вещества является очень важным.

Как показывает опыт, всякое вещество состоит из большого числа¹ отдельных микроскопических частиц — *атомов* и *молекул*, взаимодействующих между собой и находящихся в непрерывном движении. Характер этого движения и взаимодействия определяет физические свойства тел.

В основе молекулярной физики лежит философский закон *перехода количества в качество* (переход количественных изменений в качественные). Суть данного закона заключается в том, что система, состоящая из большого числа частиц, приобретает новые свойства, не присущие ее элементам по отдельности. Ярким примером является человек как совокупность большого числа атомов, каждый из которых по отдельности не обладает сознанием, но вместе они образуют систему, способную мыслить и осознавать, что она состоит из атомов.

¹ Например, в 1 см³ газа при комнатной температуре и атмосферном давлении содержится около 10¹⁹ молекул.

Тела, состоящие из большого количества частиц, принято называть **макросистемами**.

Раздел физики, изучающий зависимость агрегатных состояний и свойства тел от характера движения и взаимодействия частиц, образующих тело, называется **молекулярная физика**.

Еще древнегреческие философы Левкипп и его ученик Демокрит около 2500 лет назад выдвинули гипотезу об атомистическом строении вещества. Они описали мир как систему атомов (неделимых частиц вещества, обладающих истинным бытием, не разрушающихся и не возникающих) в пустоте.

Древнегреческие философы рассматривали лишь качественную картину природных явлений, не исследуя количественных соотношений. Дальнейшее развитие атомизм получил в работах М.В. Ломоносова. В 40-х годах XVIII в. он сформулировал исходные положения *молекулярно-кинетической теории (МКТ)*. Ломоносов считал, что все тела состоят из *корпускул*, содержащих некоторое количество структурных элементов. Фактически *корпускулы* – это атомы и молекулы. Однако в работах Ломоносова и других известных ученых того времени не было строгого доказательства существования атомов.

Количественное обоснование атомизма (*атомистической теории*) было дано в начале XIX в. Д. Дальтоном, Ж.Л. Гей-Люссаком и А. Авогадро.

Во второй половине XIX в. благодаря работам выдающихся физиков, таких как Д. Джойль, Р. Клаузиус, Л. Больцман, Д.К. Максвелл, МКТ получила всестороннее развитие и применение во многих областях физики и химии. Экспериментальной проверкой правильности положений МКТ являлось объяснение на ее основе броуновского движения, процессов диффузии, теплопроводности и т. д.

Роль МКТ в развитии современной физики заключается в том, что она позволила единым образом подойти к изучению физических явлений, связанных с характером движения атомов и молекул в телах.

Поскольку молекулярная физика изучает движение и взаимодействие атомов и молекул, необходимо определиться с этими понятиями.

Атом – частица вещества *микроскопических*² размеров и массы, наименьшая часть *химического элемента*, являющаяся носителем его свойств [3]. Протоны, нейтроны и электроны, входящие в состав атома

² Микро – от греческого слова «маленький». Микрочастицами называют элементарные частицы (электроны, нейтроны, протоны и т. д.) и сложные частицы (молекулы, атомы, ионы и т. д.), образованные из элементарных частиц.

химического элемента, по отдельности не обладают физическими и химическими свойствами атома как целого.

Химический элемент – это вид атомов, характеризующийся определенными зарядами ядер и строением электронных оболочек. На самом деле химических элементов, в отличие от химических соединений, не очень много, все они сведены в *периодическую систему химических элементов* (таблицу Менделеева), один из вариантов которой приведен в прил. Б.

Молекула – наименьшая стабильная частица *вещества*, обладающая его основными химическими свойствами. Например, молекула воды H_2O . Отметим, что при рассмотрении составных частей этой молекулы по отдельности мы уже не имеем дело с веществом «вода».

Под **веществом** в физике понимают вид материи, состоящей из элементарных частиц, обладающих массой покоя, отличной от нуля (такие как *нейтроны, протоны и электроны*), образующих атомы и молекулы. Вещество может участвовать в различных химических реакциях и пребывать в одном из *агрегатных состояний* (в виде газа, жидкости, плазмы, в твердом состоянии или одном из переходных³). Отметим, что химические свойства веществ, в отличие от физических, не зависят от агрегатного состояния (например, лед и вода с химической точки зрения одно и то же вещество).

Приведенное выше определение молекулы позволяет ввести понятие *одноатомная молекула*, например для инертных газов и паров ртути. Согласно определению ИЮПАК⁴ [4], молекула не является химическим элементом и состоит из двух и более атомов. В физике происходит некоторое совмещение понятий «молекула» и «атом». Тем более что с квантовой точки зрения [5] молекула представляет собой систему не из атомов, а из электронов и атомных ядер, взаимодействующих между собой. Обычно подразумевается, что молекулы не несут *неспаренных*⁵ электронов. Для определенности будем считать, что молекула – это частица вещества, состоящая из двух и более атомов.

³ Строго говоря, существуют и другие агрегатные состояния (например, нейтронное состояние, газ Ферми–Дирака).

⁴ International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC (ИЮПАК) – Международный союз теоретической и прикладной химии.

⁵ Если на орбитали находится один электрон, то он называется неспаренным, а если два – то это спаренные электроны, которые образуют электронную пару (связанное состояние двух взаимодействующих электронов).

Все величины, характеризующие макроскопические тела, делят в молекулярной физике на две группы: *макро-* и *микроскопические*.

Макроскопическими величинами (*макроскопическими параметрами системы*) называют такие характеристики рассматриваемой системы частиц, которые относятся ко всей системе в целом, а не к отдельным частицам (молекулам и атомам). К таким величинам относятся температура, плотность, объем и т. п.

Величины, характеризующие поведение и свойства каждой отдельной молекулы вещества, такие как координаты молекулы, ее скорость и масса, называют *микроскопическими величинами* (микроскопическими параметрами).

Поскольку молекулы непрерывно движутся, сталкиваясь с другими молекулами, то в силу большого числа молекул, из которых состоят макросистемы, их движение носит хаотичный характер. Значения микропараметров любой макроскопической системы непрерывно меняются, в то время как усредненные значения макропараметров системы в состоянии *термодинамического равновесия* остаются неизменными. Макроскопические параметры связаны со средними значениями микропараметров. *Задача* молекулярной физики – отыскать эту связь.

Для решения указанной выше задачи необходимо для начала ввести физические величины, которые связывают микро- и макрохарактеристики макроскопических систем. Такими величинами являются количество вещества, температура, молярная масса и т. д.

Прежде чем перейти к основным понятиям молекулярной физики, приведем некоторую историческую справку.

В 1805 г. французский ученый Ж.Л. Гей-Люссак эмпирически (экспериментально) установил **закон объемных отношений**: при одинаковых условиях⁶ объемы вступающих в реакцию газов относятся друг к другу и к объемам образующихся газообразных продуктов реакции как небольшие целые числа [5]. Из этого закона следует, что в равных объемах любых газов при одинаковых условиях содержится одинаковое число частиц. Закон Гей-Люссака не мог быть объяснен на основе предположения о том, что простые вещества состоят из атомов. Ярким примером служит следующая задача: если смешать одинаковое количество атомов водорода и хлора, которые находятся в газообразном состоянии и занимают равные объемы, то при их взаимодействии

⁶ При неизменной температуре и давлении.

должен получиться один объем хлорида водорода, а не два, как показывал опыт. Данное противоречие было разрешено итальянским физиком А. Авогадро в 1811 г.

Согласно **закону Авогадро**, в равных объемах любых *газов*, взятых при одной и той же температуре и одинаковом давлении, содержится одно и то же *число молекул* [6]. Авогадро указал, что противоречие между законом объемных отношений Гей-Люссака и предположением о том, что простые вещества состоят из атомов, легко устраняется, если ввести представление о молекуле и атоме как о *различных формах материи*. *Закон Гей-Люссака есть закон о числе молекул, а не атомов, находящихся в объеме газа*. Например, при соединении водорода с хлором из одной молекулы водорода и одной молекулы хлора образуются две молекулы хлористого водорода.

При изучении химических реакций в качестве меры количества вещества удобнее использовать не массу⁷ вещества, а количество взаимодействующих молекул, так как молекулы взаимодействуют независимо от их массы в количествах, кратных целым числам. Удобство использования подобной меры вещества связано с законом Авогадро. Поскольку в равных объемах любых газов, взятых при одинаковых условиях, содержится одно и то же число молекул, зная исходные концентрации веществ, мы всегда можем определить количество молекул полученной смеси газов. То есть количество вещества удобно измерять такими количествами, которые содержали бы одинаковое число молекул независимо от вещества (от массы молекул вещества).

Так как использовать в расчетах непосредственно количество молекул неудобно в силу того, что их число в реальных опытах слишком велико, вместо измерения количества молекул «в штуках» их измеряют в молях. **Моль** — это количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть *специфицированы* (они могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфици-

⁷ Изначально масса как научный термин была введена Ньютоном в качестве меры количества вещества. Однако толкование массы как меры количества материи нефизическое. Под **массой** будем понимать физическую величину, определяющую инерционные и гравитационные свойства тела в ситуациях, когда его скорость *много меньше скорости света* [7].

рованными группами частиц). Единица измерения количества вещества «моль» широко используется не только в химии, но и в физике, при изучении физических процессов, связанных с внутренней структурой вещества.

Число молекул в моле – **число (постоянная) Авогадро**

$$N_A = 6,022\,141\,29(\pm 27)10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

В принципе число Авогадро можно было бы выбрать любым. Приведенное выше значение постоянной Авогадро выбрано так, чтобы молярные массы разных веществ можно было легко найти на основе таблицы Менделеева. Поскольку моли любых веществ содержат одинаковое количество молекул, **то отношение молярных масс двух веществ равно отношению масс их молекул, которое не зависит от единиц измерений.**

Молярная масса – это масса *одного моля* вещества. То есть молярная масса равна произведению массы молекулы вещества $m_{\text{мол}}$, выраженной в килограммах, на постоянную Авогадро:

$$M = N_A m_{\text{мол}}, [M] = \text{кг/моль}.$$

Молярная масса M , выраженная в граммах, численно равна молекулярной массе M_r (относительной молекулярной массе)⁸. Например, масса молекулы водорода $M_r = 2$ а.е.м.⁹, тогда его молярная масса $M = 2$ г/моль. Молярная масса имеет разное значение для каждого вещества, *но всегда содержит одинаковое число молекул*. Если наименьшей структурной единицей вещества, обладающей его

⁸ **Молекулярная масса** – это отношение массы молекулы этого вещества к 1/12 массы атома углерода ^{12}C . То есть это масса молекулы, выраженная в *атомных единицах массы*. Также используется термин **относительная атомная масса** A_r – отношение массы данного атома к 1/12 массы изотопа углерода с массовым числом 12 (^{12}C).

⁹ **Атомная единица массы** (а.е.м.) (или углеродная единица) – внесистемная единица массы, применяемая для масс молекул, атомов, атомных ядер и элементарных частиц, которая определяется как 1/12 массы свободного покоящегося атома углерода, находящегося в основном состоянии, а.е.м. = $1,660\,539\,040 \cdot 10^{-27}$ кг.

основными химическими свойствами, является атом, т. е. атомы не объединяются в молекулы, то молярная масса равна

$$M = N_A m_a,$$

где m_a – масса атома, выраженная в килограммах.

Отметим, что в 2011 году на XXIV Генеральной конференции по мерам и весам была принята резолюция [8], в которой, в частности, предложено переопределить четыре основные единицы СИ, включая моль. Новое определение моля будет базироваться на фиксированном численном значении постоянной Авогадро.

Из закона Авогадро следует, что при одинаковых условиях *1 моль газа занимает одинаковый объем*. Экспериментально установлено, что масса 1 л кислорода при **нормальных условиях (н. у.)**¹⁰ равна 1,429 г. Объем, занимаемый одним молем при этих условиях, равен 22,4 л. При н. у. 1 моль любого газа занимает объем, равный 22,4 л. Этот объем называется **молярным объемом газа** и обозначается V_m .

Под объемом V газа обычно понимают тот объем, в котором движутся частицы, образующие этот газ. Это может быть объем, ограниченный стенками сосуда, где находится газ, либо мысленно выделенный объем пространства, занимаемого заданным количеством молекул газа, находящегося при заданных условиях. Последнее означает, что если вместо выделенной области пространства взять реальный сосуд такого же объема, то при тех же условиях в этом сосуде будет находиться такое же количество частиц газа, что и в мысленно выделенной области.

¹⁰ **Нормальные условия (н. у.)** – физические условия, с которыми обычно соотносят свойства веществ. Нормальные условия в физике определяются следующим образом: **атмосферное давление** 101 325 Па = 760 мм рт. ст., **температура воздуха** 273,15 К = 0 °С. В англоязычной литературе используется термин *STP (стандартные условия)*. **Стандартные условия (ст. у., англ. Standard temperature and pressure, STP)** – значения температуры и давления, при которых определяются значения различных количественных характеристик веществ, зависящие от давления и температуры, определены *IUPAC* следующим образом: **давление** 1 Бар = 10⁵ Па = 750,06 мм рт. ст.; **температура** 273,15 К = 0 °С. До 1982 г. значение стандартного давления было установлено равным 101 325 Па. В различных областях техники как стандартные, так и нормальные условия могут отличаться.

Следует учитывать тот факт, что объем V доступен для движения каждой из частиц газа только в том случае, если считать эти частицы материальными точками. На самом деле молекулы имеют конечные размеры и объем пространства, доступного для молекул газа, меньше объема V на величину, равную суммарному объему молекул газа. При атмосферном давлении среднее расстояние между молекулами в 10 раз превосходит их собственные размеры, а их общий объем в 2000 раз меньше объема, занимаемого газом. При этих условиях можно пренебречь объемом молекул и силами взаимодействия между ними, если силы взаимодействия быстро убывают с увеличением расстояния между молекулами.

Количество вещества – число молей данного вещества. Количество вещества принято обозначать строчной буквой ν (или n), его можно найти через отношения, приведенные ниже:

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M},$$

где m – масса вещества; N – число молекул. Единица измерения количества вещества в СИ – моль.

Помимо *интегральных физических величин* (масса вещества, количество вещества, температура), характеризующих свойства веществ или полей, усредненные по геометрическим параметрам (объему, площади, длине), зачастую удобно использовать *дифференциальные физические величины* (плотность, концентрация, давление), характеризующие свойства веществ или полей в какой-то их точке (физически малом объеме, элементе поверхности). Рассмотрим некоторые дифференциальные (локальные) параметры, характеризующие вещество.

Плотность тела (или просто **плотность**) – скалярная физическая величина, равная отношению массы тела к занимаемому этим телом объему:

$$\rho = m/V.$$

Фактически плотность численно равна массе единицы объема вещества. Данное определение справедливо для однородных тел. Если тело неоднородно относительно распределения массы, то говорят о **средней плотности**. Также можно ввести понятие **плотность тела**

в точке – это отношение массы *физически бесконечно малого объема*¹¹, содержащего эту точку, к этому объему:

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta m / \Delta V = dm / dV .$$

Плотность измеряется в кг/м³.

Концентрация частиц (плотность числа молекул) – физическая величина, равная отношению числа частиц N к объему V , в котором они находятся:

$$n = N / V .$$

Концентрация частиц измеряется в м⁻³. В общем случае концентрация является функцией координаты $n = n(\vec{r})$.

Концентрация частиц, плотность, количество вещества – это макроскопические параметры, которые характеризуют систему как целое и **неприменимы в описании одиночной молекулы!** Некоторые основные формулы, связывающие описанные выше величины, приведены в прил. Д.

При изучении систем, состоящих из большого количества молекул, необходимо знать не только массу молекул, их концентрацию, количество, но и их размеры. Для начала рассмотрим, что именно подразумевается под размером атома или молекулы. В классической физике, когда говорят о молекулах, их обычно считают упругими твердыми шариками. Такое представление возможно благодаря характеру взаимодействия между молекулами реального газа, в частности благодаря быстрому росту сил взаимного отталкивания молекул при уменьшении расстояния между ними. Из данной трактовки следует, что размер молекулы определяется диаметром этих шариков. Между молекулами (атомами) постоянно действуют силы взаимного притяжения и отталкивания, при сближении молекул до расстояния r_0 их взаимная потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая увеличивается. Это происходит за счет положительной работы, совершаемой результирующей силой взаимного притяжения молекул. При дальнейшем уменьшении расстояния между молекулами преобладают силы взаимного

¹¹ **Физически бесконечно малый объем** – минимальный объем вещества, в котором содержится достаточное для статистического описания состояния тела число атомов (молекул).

отталкивания, которые совершают отрицательную работу, соответственно потенциальная энергия молекул E_p начинает расти с уменьшением r . Зависимость $E_p(r)$ показана на рис. 1.

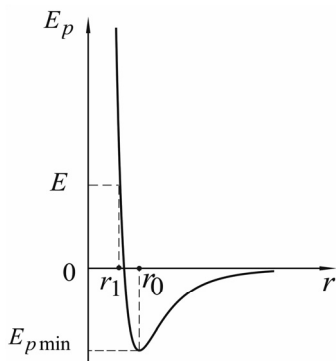


Рис. 1. Зависимость взаимной потенциальной энергии E_p двух молекул реального газа от расстояния r между ними

Если молекулы находятся достаточно далеко друг от друга, то их взаимную потенциальную энергию можно считать равной нулю. Тогда полная механическая энергия подобной системы E равна кинетической энергии молекул E_k . При максимальном сближении ($r = r_1$) кинетическая энергия равна нулю (за счет уменьшения кинетической энергии совершается работа против сил отталкивания), а взаимная потенциальная энергия $E_p(r_1) = E$. Строго говоря, r_1 зависит от температуры газа: r_1 тем меньше, чем выше температу-

ра газа. Однако в силу крутизны графика $E_p(r)$ (рис. 1) в области r_1 даже значительные изменения температуры газа приводят к сравнительно небольшим изменениям r_1 . Поэтому в первом приближении можно считать, что r_1 зависит только от химической природы молекул (атомов) газа. Тогда r_1 – это эффективный диаметр молекул.

Размеры молекул зависят от числа атомов в молекуле. Размеры атомов порядка 10^{-10} м. Простые молекулы имеют размеры того же порядка. Размеры атомов и молекул часто указывают в *ангстремах*.

Ангстрем – внесистемная единица длины: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$.

Мы рассмотрели объект изучения молекулярной физики, но ничего не сказали о методах исследования макросистем. Как уже отмечалось, число атомов (или молекул) в любом теле огромно. В 1 м^3 газа при комнатной температуре и атмосферном давлении содержится около

10^{25} молекул, а в жидкостях и твердых телах – около 10^{28} молекул. Описать движение такого количества частиц на основе динамического подхода нельзя. Даже современные высокопроизводительные вычислительные кластеры не в состоянии справиться с данной задачей. Поведение отдельной молекулы носит случайный характер и не может быть изучено методами классической механики. Даже если бы динамическое описание системы многих частиц было технически осуществимо, оно осталось бы непригодно с теоретической и бесполезно с практической точки зрения. Положение частиц непрерывно меняется, поэтому знание информации о положении частиц в данный момент времени не несет никакой практически полезной информации.

Возможны два метода исследования изучаемых систем: *статистический* и *термодинамический*.

Статистический метод основан на использовании теории вероятности и модельных представлений об атомно-молекулярной структуре вещества. Для изучения системы многих частиц информация должна иметь обобщенный характер и относиться не к отдельным частицам, а к совокупности большого числа частиц. В совокупном движении огромного числа атомов (или молекул), координаты и скорости которых в любой момент времени случайны, проявляются *статистические закономерности*. В частности, в газе молекулы определенным образом распределены по скоростям и по энергиям их теплового движения. Свойства макроскопической системы зависят от **средних** динамических характеристик этих ее частиц (скорости, энергии и т. д.). Раздел физики, в котором изучают физические свойства макроскопических систем с помощью статистического метода, называют **статистической физикой**.

Наряду со статистическим методом существует **термодинамический метод**. Термодинамический метод не опирается на модельные атомно-молекулярные представления о структуре вещества. В этом методе не рассматриваются внутренняя структура исследуемых тел и характер движения частиц, из которых они состоят. Фактически это *феноменологический метод*, основная задача которого – установление зависимостей между измеряемыми макроскопическими величинами, такими как давление, объем, температура и т. д., не рассматривая микроскопических параметров системы. Термодинамический метод основан на анализе условий и количественных соотношений при различных превращениях энергии, происходящих в исследуемой системе. Раздел

физики, в котором используется термодинамический метод для анализа свойств макросистем, называют **термодинамикой**. Термодинамика базируется на двух **экспериментально** установленных законах: первом и втором законах (началах) термодинамики, а также третьем законе (начале) термодинамики (принцип Нернста).

Достоинством термодинамического подхода является то, что с его помощью можно получить многие сведения о физических свойствах тел, не пользуясь какими-либо конкретными представлениями об их внутреннем строении и характере движения образующих их атомов и молекул. Термодинамический метод можно использовать не только в молекулярной физике, но и в других разделах физики (например, в электродинамике).

Статистический и термодинамический методы имеют свои преимущества и недостатки. Термодинамический метод в отличие от статистического метода, который ограничен заложенными в него модельными представлениями, обладает большой общностью. Статистический метод ограничен теми моделями, которые лежат в его основе, соответственно выводы статистической физики справедливы настолько, насколько оправданно использование той или иной модели атомно-молекулярной структуры вещества.

Важным недостатком термодинамического метода является то, что он не позволяет раскрыть внутренний атомно-молекулярный механизм протекания физических процессов. Статистический метод позволяет объяснить механизм физических процессов, дать строгое обоснование законов термодинамики и установить границы их применимости. Некоторые задачи, например вывод уравнения состояния макроскопической системы, не могут быть решены в рамках термодинамического подхода. Статистический метод позволяет оценить масштаб нарушений законов классической термодинамики, связанных с *флуктуациями* параметров системы (понятие флуктуаций будет рассмотрено далее по тексту). Статистический метод помогает понять суть явлений.

Статистический и термодинамический методы изучения систем многих частиц дополняют друг друга. Их комбинированное применение способствует наиболее эффективному решению той или иной научной проблемы.

Введем еще несколько терминов, необходимых для дальнейшего освоения курса.

Термодинамическая система – выделяемая (реально или мысленно) для изучения макроскопическая физическая система, состоящая из

большого числа частиц и не требующая для своего описания привлечения микроскопических характеристик отдельных частиц [9]. Все тела, не включенные в исследуемую систему, называются *внешней средой*.

Открытой системой называют термодинамическую систему, которая может обмениваться веществом и энергией с внешней средой. **Закрытой термодинамической системой** называют систему, которая не может обмениваться веществом с внешней средой.

Изолированной системой будем называть систему, которая не обменивается ни веществом, ни энергией с внешней средой. Часто изолированную систему называют *замкнутой системой*.

Адиабатически изолированная система – термодинамическая система, которая не обменивается с окружающей средой энергией путем теплообмена.

Термодинамическая система может находиться в различных состояниях. Величины, служащие для характеристик состояния системы, называются **термодинамическими параметрами** или **параметрами состояния** (например, давление p , температура T , объем V и т. д.). Связь между p , T , V , выраженная в математической форме, называется **уравнением состояния**. Параметры состояния бывают *экстенсивные* и *интенсивные*. **Экстенсивные параметры** – это параметры системы, которые пропорциональны количеству вещества в системе (например, объем системы). **Интенсивные параметры** – это параметры системы, которые не зависят от количества вещества в системе (например, давление и температура).

Состояние термодинамической системы, при котором остаются неизменными во времени макроскопические величины этой системы (например, температура, давление, объем, энтропия) и в системе отсутствуют потоки энергии, вещества и т. д., называется **равновесным состоянием**. Причем постоянство параметров не связано с протеканием какого-либо процесса во внешней среде, т. е. внешние условия должны быть постоянными. Любая изолированная система со временем переходит в равновесное состояние. Термодинамическое равновесие является динамическим равновесием, т. е. при термодинамическом равновесии параметры системы остаются неизменными, но частицы, из которых состоит система, находятся в непрерывном хаотическом движении. Температура всех частей системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, одинакова. При соприкосновении

двух тел передача энергии путем теплообмена *происходит от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой*.

Строго говоря, параметры состояния *не остаются строго постоянными*, а испытывают небольшие отклонения от средних значений, характеризующих равновесное состояние. Такие отклонения (колебания) называются **флуктуациями**. Флуктуации параметров реального, не сильно разреженного газа при нормальных условиях ничтожно малы. При этом отметим, что рассматриваемый объем должен быть достаточно велик. Например, небо выглядит голубым по причине того, что коротковолновое излучение рассеивается в атмосфере сильнее длинноволнового излучения, при этом рассеяние обусловлено флуктуациями количества молекул газов воздуха в объемах, соизмеримых с длинами волн падающего света.

Процесс перехода системы из неравновесного состояния в равновесное называется **процессом релаксации**, время перехода – **временем релаксации**.

Термодинамический (тепловой) процесс – любое изменение состояния системы, характеризующееся изменением параметров системы. Если процесс представляет собой непрерывный ряд бесконечно близких термодинамически равновесных состояний, которые проходит система, такой процесс называется **равновесным**. Реальные процессы протекают с конечной скоростью, поэтому не могут быть равновесными, но при определенных условиях, когда время перехода системы между двумя равновесными состояниями много больше времени релаксации, процесс можно условно считать равновесным. Такие процессы называются **квазиравновесными**. Равновесные процессы называют **квазистатическими**, поскольку они протекают медленно (в пределе бесконечно долго).

Классическая термодинамика, как правило, рассматривает равновесные процессы. Для изображения равновесных процессов используют **диаграммы состояний**, которые представляют собой графическую зависимость между макроскопическими параметрами системы $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$, $S(T)$. Каждая точка на такой диаграмме соответствует определенному равновесному состоянию системы. Очевидно, что на диаграммах состояния можно изображать только равновесные процессы. На рис. 2 изображена $p(V)$ диаграмма для изотермического процесса. Любая функция, зависящая от независимых параметров, определяющих равновесное состояние термодинамической системы, является **функцией состояния системы** (например, внутренняя энергия).

Значение термодинамической функции состояния зависит только от состояния термодинамической системы и не зависит от того, как система пришла в это состояние. Если функция зависит от того, как система пришла в это состояние, то такая функция называется **функцией процесса** (например, количество теплоты).

Можно выделить три наиболее характерных состояния, в которых может находиться вещество: *твёрдое, жидкое и газообразное*. Эти состояния называются *агрегатными состояниями*. В следующем разделе нами будут рассмотрены свойства газов. При этом для описания реального газа будет использоваться модель идеального газа.

Идеальный газ – это модель газа, в которой не учитывается взаимодействие частиц газа (атомов, молекул) друг с другом на расстоянии большем, чем эффективный диаметр частиц, т. е. средняя кинетическая энергия частиц много больше потенциальной энергии их взаимодействия [10]. Также, чтобы газ можно было считать идеальным, собственный объём его молекул должен быть пренебрежимо мал. Соударение молекул друг с другом и со стенками сосуда в модели идеального газа считается **упругим**, т. е. молекулы ведут себя при столкновении подобно упругим шарикам.

Молекулы идеального газа движутся хаотически и взаимодействуют между собой только при соударениях. **Тепловое движение** – это хаотическое (беспорядочное) движение атомов и молекул в макроскопических телах. Чем больше температура одноатомного газа, тем больше интенсивность теплового движения (тем больше средняя скорость движения частиц). О тепловом движении можно говорить только в тех случаях, когда рассматриваемая система является макроскопической, т. е. состоит из огромного числа атомов и молекул.

Многие газы (например, воздух, водород, гелий, кислород и др.) при *нормальных условиях* можно считать с хорошим приближением идеальными. Средние расстояния столь велики, что силами притяжения между частицами газа можно пренебречь. Фактически кинетическая энергия частиц много больше потенциальной энергии их взаимодействия. Также суммарный объём всех молекул (атомов) пренебрежимо мал по сравнению с объёмом, занимаемым газом при нормальных

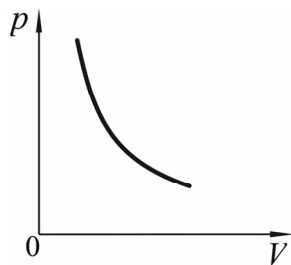


Рис. 2. $p(V)$ диаграмма изотермического процесса

условиях. Поэтому выводы, полученные для идеального газа, часто применимы и к реальным газам. Заметим, что увеличение степени разреженности газа не всегда ведет к приближению его свойств к свойствам идеального газа. Например, поведение ультраразреженных газов (когда длина свободного пробега молекул превышает линейные размеры сосуда) сильно отличается от модели идеального газа.

Далее рассмотрим особенности решения задач по молекулярной физике и термодинамике.

В2. ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Нужно осознавать, что решение задач необходимо для понимания физических законов и принципов, определения границ их применимости и формирования навыков их использования при решении конкретной проблемы. Только понимая суть физических моделей, можно успешно применять их при решении задач.

Перед решением задачи необходимо тщательно разобраться в теоретическом материале и внимательно разобрать простые примеры использования тех или иных законов или правил.

При решении задач студент должен постоянно задавать себе вопросы, отвечая на которые, он постепенно приблизится к достижению своей цели (получение ответа на вопрос задачи). При этом успешность решения задачи зависит от корректности задаваемых вопросов.

В учебном пособии [1] мы выделили *три основных вопроса*, отвечая на которые, можно решить любую задачу: 1) «что мы знаем»?; 2) «что мы хотим узнать»?; 3) «что нам для этого необходимо?».

При решении задач, в том числе по молекулярной физике и термодинамике, следует соблюдать ряд правил.

1. Для начала внимательно проанализировать условие задачи, **установить величины, которые требуется определить в задаче.**

2. Сделать краткую запись условия с помощью общепринятых буквенных обозначений (см. прил. В, табл. 4), предварительно выделив основные физические величины, описывающие процесс, начальные и граничные условия, все упрощающие предположения, которые помогут сформулировать физическую модель рассматриваемого процесса.

3. Численные значения физических величин, представленные в задаче, желательно перевести в СИ (см. прил. В, табл. 4), что позволит в процессе решения избежать численных ошибок. Однако в ряде случаев можно использовать и внесистемные единицы измерения, если это

более удобно. При этом нужно быть очень аккуратным при подстановке таких значений в уравнения; чтобы избежать ошибок, все величины должны быть приведены к единообразному виду.

4. При необходимости сделать рисунок, поясняющий условие задачи.

5. Для физических явлений, описанных в задаче, записать физические законы в форме математических уравнений, которые их описывают.

6. Решить полученную систему уравнений относительно искомых физических величин.

7. Сначала следует получить решение в общем виде и только потом, предварительно проверив полученное решение на соответствие размерности, в полученное выражение подставить численные значения.

8. Проводя вычисления, нужно помнить, что числовые значения физических величин всегда являются приближенными и *точность числового ответа не должна превышать точности величин, заданных в условии задачи.*

9. Полученное решение следует проанализировать на выполнение фундаментальных законов (в том числе рассмотреть предельные случаи) и на соответствие здравому смыслу.

10. Выписать ответ.

От модели, положенной в основу решения, напрямую зависит конечный результат. Поэтому очень важно правильно трактовать условия задачи. Вы должны хорошо представлять физические процессы, описываемые в задаче. Следует учесть, что иногда условия задачи сформулированы некорректно, поэтому решать ее бессмысленно. Приведем несколько примеров, отражающих суть данных высказываний.

Пример 1. Во время опыта абсолютная температура воздуха в сосуде понизилась в 2 раза и он перешел из состояния 1 в состояние 2 (рис. 3). Кран у сосуда был закрыт неплотно (сечение отверстия велико по сравнению с длиной свободного пробега молекул), и сквозь него мог свободно проходить воздух. Рассчитать отношение N_2/N_1 количества молекул газа в сосуде в конце и начале опыта. Воздух считать идеальным газом.

Как видно из рисунка, давление газа в процессе опыта уменьшилось в три раза. Казалось бы, решение задачи не представляет никаких трудностей, но давайте внимательно посмотрим на рис. 3. Давление газа порядка 10^3 Па, а атмосферное давление при нормальных условиях

порядка 10^5 Па. Очевидно, что давление газа в сосуде не могло уменьшиться в ходе описанного в задаче процесса. Поэтому решать задачу с подобной формулировкой условия бессмысленно.

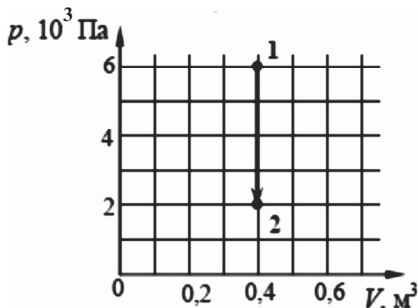


Рис. 3. $p(V)$ диаграмма

При решении задач следует также обращать внимание на то, остается ли газ в рассматриваемом процессе идеальным, не происходит ли изменения агрегатного состояния вещества.

Приведем еще несколько примеров задач, в которых возможно использование разных физических моделей, описывающих процесс.

Пример 2. Сколько качаний насоса потребуется для того, чтобы давление газа в баллоне объемом V_0 уменьшить в N раз? Объем камеры насоса $0,1V_0$. Изменением температуры при откачивании газа пренебречь.

В данной задаче не уточняется тип насоса, а значит, не указан способ откачивания воздуха. Строго говоря, воздух можно откачивать двумя способами:

- 1) к баллону подключен поршневой насос, т. е. можно считать, что при каждом откачивании происходит увеличение объема баллона на $0,1V_0$ за счет подключения к нему насоса;
- 2) забор воздуха производится таким образом, что эффективный объем баллона не меняется.

В первом случае давление газа в баллоне за один цикл откачивания насоса уменьшается, но при этом давление в емкости насоса и баллоне в конце цикла одинаковое. Во втором случае давление в емкости насоса в конце одного цикла забора воздуха равно начальному давлению в баллоне, а давление в баллоне в конце уменьшается.

Очевидно, что в зависимости от того, какую модель рассматриваемого процесса мы предпочтем, будет зависеть решение задачи.

В качестве примера рассмотрим первый способ откачивания.

Решение задач для удобства мы будем оформлять в соответствии с прил. Г. Запишем краткое условие и приведем рисунок к задаче. Исходное давление газа в баллоне обозначим p_0 , конечное давление в баллоне p_n . Количество качаний насоса обозначим строчной буквой n .

Дано:

$$V_{\text{бал}} = V_0$$

$$V_{\text{нас}} = 0,1 V_0$$

$$p_n = p_0 / N$$

$$T = \text{const}$$

$$n = ?$$

Решение

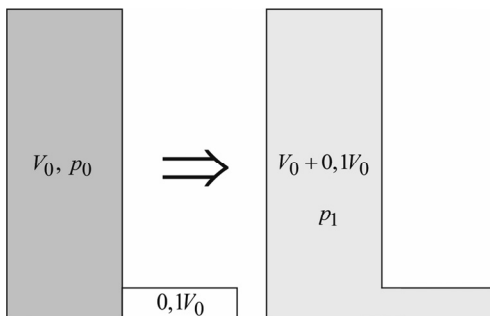


Рис. 4

Поскольку $T = \text{const}$, то увеличение объема газа происходит изотермически. Следовательно, рассматриваемый процесс описывается законом Бойля–Мариотта:

$$pV = \text{const}. \quad (\text{П2.1})$$

Начальное давление газа в баллоне p_0 , а объем V_0 . После того как поршень насоса начинают выдвигать из его камеры, в камеру проникает газ из баллона. Значит, объем, занимаемый газом, увеличивается, достигая значения $1,1V_0$ (рис. 4). Как следует из (П2.1), давление газа в баллоне изотермически *уменьшается* до значения p_1 .

Используя (П2.1), для *первого* качания насоса можно записать $p_0 V_0 = p_1 (V_0 + V_1)$, где $V_1 = 0,1V_0$ – объем камеры насоса. Далее клапан насоса закрывается, и насос больше не связан с баллоном. Поршень в камере насоса вдвигается в камеру, вытесняя газ в окружающую среду. Газ, оставшийся в баллоне, занимает объем V_0 .

Запишем уравнение Бойля–Мариотта для *второго* качания насоса: $p_1 V_0 = p_2 (V_0 + V_1)$. Сравнивая уравнения для первого и второго качания, нетрудно записать уравнение для n -го качания:

$$p_{n-1} V_0 = p_n (V_0 + V_1).$$

Выразим давление в баллоне после каждого качания (напомним, что оно равно давлению в камере насоса):

$$p_1 = p_0 \frac{V_0}{V_0 + V_1},$$

$$p_2 = p_1 \frac{V_0}{V_0 + V_1} = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + V_1} \right)^2, \dots, p_n = p_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + V_1} \right)^n. \quad (\text{П2.2})$$

Перепишем ряд (П2.2) в более компактном виде, для чего введем следующее обозначение:

$$q = \left(\frac{V_0}{V_0 + V_1} \right).$$

Тогда получим

$$p_1 = p_0 q^1, \quad p_2 = p_0 q^2, \quad \dots, \quad p_n = p_0 q^n. \quad (\text{П2.3})$$

Ряд (П2.3) представляет собой геометрическую прогрессию. Из условия нам известно, что $p_0 / p_n = N$, тогда, подставив из (П2.3) значение p_n , получим

$$\frac{p_0}{p_n} = \frac{\cancel{p_0}}{\cancel{p_0} q^n} = \frac{1}{q^n} = N. \quad (\text{П2.4})$$

Нам необходимо найти число качаний насоса n . Чтобы выразить n , необходимо прологарифмировать выражение (П2.4). В результате имеем

$$\ln q^{-n} = \ln N \Rightarrow -n \ln q = \ln N \Rightarrow n = -\frac{\ln N}{\ln q}.$$

Учитывая, что $q = \left(\frac{V_0}{V_0 + V_1} \right)$, конечное выражение можно записать

в следующем виде:

$$n = - \frac{\ln N}{\ln \left(\frac{V_0}{V_0 + V_1} \right)}.$$

Ответ: число качаний насоса $n = - \frac{\ln N}{\ln(V_0/V_0 + V_1)}$.

Таким образом, мы нашли число качаний насоса для случая подключения к баллону поршневого насоса. Предлагаем читателю самостоятельно найти число качаний насоса, используя второй способ забора газа (рис. 5). Отметим, что во втором случае давление в камере насоса при прочих равных условиях должно быть больше, чем в первом (рассмотренном выше) примере. Следовательно, эффективность подобного способа должна быть выше, поскольку за одно качание отнимается большее число частиц газа.

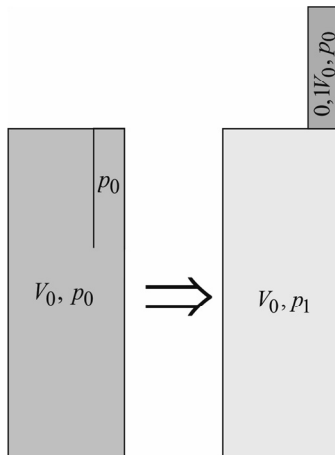


Рис. 5. Модель насоса

Пример 3. Оболочка воздушного шара, имеющая объем $V = 800 \text{ м}^3$, полностью заполнена водородом при температуре $T_1 = 273 \text{ К}$. Насколько изменится *подъемная сила шара* при повышении температуры до $T_2 = 293 \text{ К}$? Считать объем V оболочки неизменным и внешнее давление p_a нормальным. В нижней части оболочки имеется отверстие, через которое водород может выходить в окружающее пространство.

При решении данной задачи нужно очень внимательно проанализировать условия. Попробуйте решить задачу самостоятельно, а затем сравните ваше решение с решением, приведенным ниже.

Дано:

$$V = 800 \text{ м}^3$$

$$T_1 = 273 \text{ К}$$

$$T_2 = 293 \text{ К}$$

$$p_a = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$M_{\text{вод}} = 2,02 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M_{\text{возд}} = 28,98 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\Delta F = ?$$

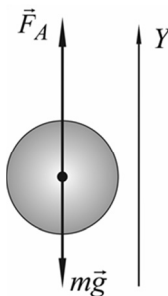
Решение

Рис. 6

Для начала разберемся с термином «подъемная сила шара». **Подъемная сила шара** – это векторная сумма сил Архимеда и тяжести, действующих на шар:

$$\vec{F} = \vec{F}_A + m\vec{g}.$$

Тогда в проекции на вертикальную ось, направленную против силы тяжести (рис. 6), уравнение принимает вид

$$F = F_A - mg.$$

Нам необходимо найти изменение подъемной силы шара $\Delta F = F_2 - F_1$ при изменении температуры. Отметим, что в условии задачи есть некоторая неоднозначность. *В условии не указано, какая именно температура изменяется: окружающей среды или водорода при неизменной температуре окружающей среды.* Поэтому решим задачу сначала в предположении о неизменной температуре окружающей среды, а затем приведем решение в предположении о том, что в задаче говорится о температуре окружающей среды.

Сила Архимеда

$$F_A = \rho_{\text{вн.ср}} V_{\text{п.ч.ш}} g,$$

где $\rho_{\text{вн.ср}}$ – плотность окружающей среды; $V_{\text{п.ч.ш}}$ – объем погруженной части шара (в нашем случае равен V); g – ускорение свободного падения.

Поскольку объем шара не изменяется ($V = \text{const}$) и *параметры внешней среды постоянны* ($T_a = \text{const}$, $p_a = \text{const}$), то очевидно, что сила Архимеда $F_A = \text{const}$. При этом при увеличении температуры водорода внутри шара водород в процессе расширения будет «выходить» за пределы шара до момента выравнивания давления водорода внутри оболочки с атмосферным давлением p_a . Соответственно масса шара *уменьшится* на величину Δm , равную массе «вышедшего» водорода. При этом изменение подъемной силы шара равно

$$\Delta F = F_A - m_2 g - F_A + m_1 g = (m_1 - m_2)g = -\Delta m g. \quad (\text{П3.1})$$

Процесс расширения водорода описывается уравнением Менделеева–Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

где M – молярная масса описываемого газа; R – универсальная газовая постоянная, равная $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.

Запишем систему уравнений, описывающую изменение состояния водорода:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_a V = \frac{m_1}{M_{\text{вод}}} RT_1, \\ p_a V = \frac{m_2}{M_{\text{вод}}} RT_2 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} m_1 = \frac{p_a VM_{\text{вод}}}{RT_1}, \\ m_2 = \frac{p_a VM_{\text{вод}}}{RT_2}. \end{array} \right. \quad (\text{П3.2})$$

Из (П3.2), с учетом того, что $\Delta m = m_2 - m_1$, получим

$$\Delta m = \frac{p_a VM_{\text{вод}}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \Rightarrow \Delta F = -\Delta m g = \frac{gp_a VM_{\text{вод}}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

После подстановки численных значений получим

$$\Delta F = 48,3 \text{ Н}. \quad (\text{П3.3})$$

Теперь найдем изменение выталкивающей силы, считая, что повышается температура окружающей среды. Подход к решению задачи

остается прежним, но теперь, в отличие от предыдущего случая, изменяется сила Архимеда, поскольку меняется плотность среды

$$\Delta F = F_{A2} - F_{A1} + (m_1 - m_2)g . \quad (\text{П3.4})$$

Поскольку по условию объем шара и атмосферное давление не меняются, давление водорода в шаре должно быть равно атмосферному давлению, значит, $p_a V = \text{const}$. Тогда уравнение Менделеева–Клапейрона имеет вид

$$p_a V = \frac{m_1}{M_{\text{вод}}} RT_1 = \frac{m_2}{M_{\text{вод}}} RT_2 .$$

Следовательно,

$$\begin{cases} m_1 = \frac{p_a V M_{\text{вод}}}{R} \frac{1}{T_1} , \\ m_2 = \frac{p_a V M_{\text{вод}}}{R} \frac{1}{T_2} . \end{cases} \quad (\text{П3.5})$$

Выразим силу Архимеда:

$$F_A = \rho_{\text{вн.ср}} V g = m_{\text{г}} g ,$$

где $m_{\text{г}}$ – масса газа окружающей среды, «вытесненного» шаром (в нашем случае будем считать, что окружающая среда состоит из воздуха с молярной массой $M_{\text{возд}}$).

Найдем изменение силы Архимеда

$$\Delta F_A = (m_{\text{г}2} - m_{\text{г}1}) g . \quad (\text{П3.6})$$

Согласно уравнению Менделеева–Клапейрона, по аналогии с (П3.5) получим

$$\begin{cases} m_{\text{г}1} = \frac{p_a V M_{\text{возд}}}{R} \frac{1}{T_1} , \\ m_{\text{г}2} = \frac{p_a V M_{\text{возд}}}{R} \frac{1}{T_2} . \end{cases} \quad (\text{П3.7})$$

Подставим (ПЗ.7) и (ПЗ.5) в (ПЗ.4), тогда с учетом (ПЗ.6) получим

$$\Delta F = \frac{p_a V}{R} g(M_{\text{вод}} - M_{\text{возд}}) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (\text{ПЗ.8})$$

Подставив в (ПЗ.8) числа, получим

$$\Delta F = -645 \text{ Н}. \quad (\text{ПЗ.9})$$

Ответ: 1) $\Delta F = 48,3 \text{ Н}$; 2) $\Delta F = -645 \text{ Н}$.

Если мы сравним (ПЗ.9) с (ПЗ.3), то увидим существенное различие не только по абсолютной величине, но и по знаку. Следовательно, в зависимости от выбранной нами модели мы получим различные результаты. Анализ условия очень важен, поскольку на его основе мы составляем физическую модель процесса. *Рекомендуем читателю не торопиться с решением задач и не делать поспешных выводов.*

Успех в решении задач зависит от вашего опыта. Чем больше вы решите задач, тем лучше ваши навыки. Полезно решать близкие по содержанию задачи, в которых наблюдается постепенное усложнение описываемой ситуации и/или добавляется поиск новых физических величин. Также следует использовать разные методы решения поставленной задачи.

При решении задач необходимо устанавливать общую закономерность рассматриваемых явлений путем анализа и синтеза исходных данных.

Чтобы связать данное явление с одним или несколькими физическими законами, нужно применить анализ: разбить сложное явление на ряд простых явлений. Для объединения следствий, полученных из отдельных законов, в общий вывод используется синтез.

1. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В данном разделе кратко рассмотрены основные понятия и законы молекулярно-кинетической теории газов, даны методические рекомендации по решению задач, приведены примеры решения задач и представлены задачи для самостоятельного решения. Статистические распределения Максвелла и Больцмана выходят за рамки курса и здесь не рассматриваются. Более подробные теоретические сведения вы можете найти в учебниках [11–13].

1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) объясняет физические свойства *макроскопических* тел на основе представлений о том, что все тела состоят из *микроскопических* частиц (атомов, молекул). МКТ не рассматривает движения каждой отдельной частицы, а оперирует только *средними* величинами, которые характеризуют движение *огромного* числа молекул. Эти средние величины связаны с параметрами состояния макроскопического тела.

В основе МКТ лежат три предположения.

1. Все тела состоят из частиц: атомов, молекул и ионов.
2. Частицы находятся в состоянии непрерывного хаотичного (*теплого*) движения.
3. Частицы взаимодействуют между собой путем абсолютно упругих столкновений.

Важнейшей моделью МКТ является модель *идеального газа*, о которой мы уже говорили во введении.

Рассмотрим основные принципы МКТ на примере решения нескольких задач.

Задача 1. Найти плотность смеси кислорода массой $m_1 = 64$ г и азота массой $m_2 = 56$ г при температуре $t = 27^\circ\text{C}$ и давлении $p = 10^5$ Па. Молярная масса кислорода $M_{\text{O}_2} = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, азота – $M_{\text{N}_2} = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль [14].

Для того чтобы решить эту задачу, необходимо разобраться с понятиями «давление» и «температура».

Рассмотрим подробнее, что представляет собой давление p . В XVIII в. Д. Бернулли предположил, что **давление газа** – это результат столкновения молекул газа со стенками сосуда. То есть давление это макроскопическое проявление теплового движения молекул газа. Газ действует с некоторой силой на любую поверхность, ограничивающую его объем. В этом случае давление газа на поверхность определяется формулой

$$p = \frac{dF_{\perp}}{dS},$$

где $dF_{\perp}$ – модуль нормальной силы, действующей на малый участок поверхности тела площадью dS . Можно сказать, что давление газа численно равно нормальной составляющей силы, действующей на единичную поверхность. Единица измерения давления паскаль (Па), $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Также существуют внесистемные единицы измерения давления, такие как физическая атмосфера (атм), техническая атмосфера (ат), бар, миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.) ($1 \text{ ат} = 98\,066 \text{ Па}$, $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$, $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$, $1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па}$) и т. д. В России в быту (например, при измерении давления в шинах автомобиля) самой распространенной является техническая атмосфера, также распространен бар.

Если газ не находится во внешнем силовом поле, то давление газа во всех направлениях и во всем объеме в независимости от формы сосуда одинаково в силу хаотичности теплового движения молекул. Это утверждение можно сформулировать в виде **закона Паскаля**: если к некоторой части поверхности, ограничивающей газ или жидкость, приложено давление p , то оно одинаково передается любой части этой поверхности.

Как показал Д.К. Максвелл, в случае идеального газа соударения молекул между собой не влияют на давление газа, оказываемое на

стенки сосуда. Также давление газа не зависит от характера соударений молекул со стенками (упругие они или нет). Следовательно, давление идеального газа не зависит от материала стенок сосуда. Теория Максвелла позволяет найти давление газа, но при этом она довольно сложна. В качестве примера рассмотрим задачу.

Задача 2. В кубическом сосуде объемом $V = 10^{-3} \text{ м}^3$ находится $m = 0,01 \text{ г}$ гелия при температуре $T = 300 \text{ К}$. Сколько раз N какая-либо выделенная молекула ударится о стенку сосуда за время $t = 60 \text{ с}$?

Дано:

$$V = 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$m = 0,01 \text{ г}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$t = 60 \text{ с}$$

$$N = ?$$

Решение

Для начала следует понять, успеют ли молекулы за рассматриваемый промежуток времени облететь весь сосуд, т. е. можно ли считать движение молекул хаотическим. Для этого следует оценить *длину свободного пробега молекул* λ , т. е. среднее расстояние, которое пролетает молекула между двумя последовательными соударениями.

Зная длину свободного пробега и среднюю квадратичную скорость в проекции на выделенную ось, можно оценить среднее смещение молекул вдоль этой оси за рассматриваемый промежуток времени. Мы не будем проводить подробный расчет, ограничившись тем фактом, что в данной задаче движение молекул можно считать хаотическим. *Следовательно, все молекулы ударяются о какую-либо стенку одинаково часто.* Для определенности будем искать число соударений молекул, например, о верхнюю стенку. Тогда искомое число соударений N можно найти, разделив полное число ударов о верхнюю стенку на количество N_{He} молекул гелия.

Необходимо понять, как найти число ударов. Как мы говорили ранее, от числа ударов зависит давление газа. Мы знаем, что давление газа пропорционально среднему числу соударений молекул о стенку в единицу времени. При этом из определения давления следует, что $p = \langle F_{\perp} \rangle / S$. Из второго закона Ньютона следует, что модуль средней силы давления молекул на стенку сосуда $\langle F_{\perp} \rangle = N_0 \langle \Delta P \rangle / t$, где N_0 — полное число соударений молекул с верхней стенкой; ΔP — модуль

изменения импульса молекулы при соударении. Поскольку соударение *абсолютно упругое*, то $\Delta P = 2m_0 v_{\perp \text{cp}}$, где m_0 – масса одной молекулы, $v_{\perp \text{cp}}$ – проекция средней квадратичной скорости молекул газа на выделенную ось, направленную к верхней стенке под углом 90° . **Средняя квадратичная скорость** v_{KB} поступательного движения молекул газа – это квадратный корень из среднего арифметического значения квадратов скоростей поступательного движения всех молекул газа:

$$v_{\text{KB}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2},$$

здесь n – это число молекул газа.

Окончательно имеем

$$p = \frac{2N_0 m_0 v_{\perp \text{cp}}}{St}. \quad (1.1)$$

Забегая вперед, выразим давление из уравнения Менделеева–Клапейрона:

$$p = \frac{m}{M_{\text{He}}} \frac{RT}{V}. \quad (1.2)$$

Учитывая, что искомое $N = N_0 / N_{\text{He}}$, приравняв (1.1) и (1.2), получим

$$N = \frac{RTSt}{2V v_{\perp \text{cp}} M_{\text{He}}}. \quad (1.3)$$

Мы учли, что масса газа m равна произведению массы молекулы m_0 на их количество N_{He} .

Для оценки $v_{\perp \text{cp}}$ воспользуемся следующей формулой (ее вывод основан на распределении Максвелла по скоростям и выходит за рамки курса):

$$v_{\perp \text{cp}} \approx \sqrt{\frac{1}{3} \langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{RT}{M_{\text{He}}}}. \quad (1.4)$$

Тогда (1.3) с учетом (1.4) и того, что $V = a^3$, где a – сторона кубического сосуда, принимает вид

$$N = \frac{RTSt}{2VM_{\text{He}}\sqrt{RT/M_{\text{He}}}} = \frac{t}{2a}\sqrt{\frac{RT}{M_{\text{He}}}} \approx 2 \cdot 10^5.$$

Ответ: $N \approx 2 \cdot 10^5$.

Приведенная выше формула для давления является в большей степени оценочной, а ее вывод не строгим. Как мы уже говорили, теория Максвелла довольно сложна, но есть более простой способ получить выражение для давления газа на стенки с точностью до числового коэффициента пропорциональности. Этот способ основан на использовании *теории размерности*. Будем ради простоты предполагать, что все молекулы газа движутся с одинаковыми по модулю скоростями v . Предположим, что давление зависит от массы молекулы газа, скорости ее движения и от концентрации молекул. Тогда

$$p = C m_0^\alpha v^\beta n_0^\gamma,$$

где α , β , γ – показатели степени, которые находятся из сравнения размерности правой и левой частей равенства; C – числовой коэффициент пропорциональности; m_0 – масса молекулы; n_0 – концентрация молекул газа. Размерность давления $\dim p = L^{-1}MT^{-2}$, размерность массы молекулы – M , размерность скорости – LT^{-1} , концентрации – L^{-3} . Тогда $L^{-1}MT^{-2} = M^\alpha L^\beta T^{-\beta} L^{-3\gamma}$, т. е. $\alpha = 1$, $\beta - 3\gamma = -1$, $\beta = 2$. Следовательно, $\gamma = 1$. Тогда давление идеального газа равно

$$p = C n_0 m_0 v^2 = C \frac{N}{V} m_0 v^2 = 2C \frac{E_k}{V},$$

где V – объем сосуда с газом; N – общее число молекул газа в сосуде; E_k – кинетическая энергия *поступательного* движения *всех* N молекул. $C = 1/3$. Тогда давление газа имеет вид

$$p = \frac{2}{3} \frac{E_k}{V}.$$

Следовательно,

$$pV = \frac{2}{3} E_k. \quad (1.5)$$

Из (1.5) следует, что произведение численных значений давления идеального газа и его объема равно двум третям кинетической энергии поступательного движения всех его молекул. Выражение (1.5) называют **основным уравнением кинетической теории газов**.

На самом деле скорости теплового движения молекул различны как по направлению, так и по модулю. Поэтому E_k из (1.5) равна

$$E_k = \frac{m_0}{2} \sum_{i=1}^N v_i^2, \quad (1.6)$$

где v_i – скорость i -й молекулы.

Если ввести среднюю квадратичную скорость $v_{\text{кв}}$ поступательного движения молекул газа, о которой мы уже говорили в задаче 2, то (1.6) можно переписать в форме

$$E_k = \frac{1}{2} N m_0 v_{\text{кв}}^2.$$

Уравнение (1.5) можно записать следующим образом:

$$pV = \frac{1}{3} N m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} m v_{\text{кв}}^2.$$

Окончательно имеем

$$p = \frac{1}{3} n_0 m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} \rho v_{\text{кв}}^2, \quad (1.7)$$

где ρ – плотность газа. Уравнение (1.7) является другой формой записи **основного уравнения МКТ**. Это уравнение связывает макроскопические параметры термодинамической системы с микроскопическими, его можно переписать в виде

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle E_k \rangle,$$

где $\langle E_k \rangle$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа.

Теперь перейдем к рассмотрению понятия «температура». Это понятие более сложное, чем понятие «давление» и менее наглядное. Температура является параметром состояния макросистемы и не имеет смысла для отдельной частицы системы. Строго говоря, *температура имеет смысл только для равновесных состояний системы.*

Температура не аддитивна, поэтому температуры складывать нельзя. То есть при контакте двух тел после наступления равновесия их температура не равна сумме температур каждого из тел в отдельности. В отличие от длины температуру нельзя измерить, непосредственно сравнивая измеренное значение с эталоном. Вопрос о том, сколько измеряемая температура содержит «эталонных» значений, не имеет смысла.

Исторически сложилось, что люди сначала научились измерять температуру, а затем поняли, что это такое. Изначально под температурой понимали степень нагретости тела. Степень нагретости можно определить следующим образом: более нагретым является то тело, нагретость которого уменьшается при длительном контакте с другим телом, принимаемым в этом случае за менее нагретое. Подобное определение основывается на ощущении человека «холодного» или «горячего» и не может быть использовано в научной практике, поскольку зависит от *субъективных ощущений индивидуума.* Но мы можем придать этому определению более объективный смысл, если свяжем степень нагретости не с ощущениями человека, а с измеряемыми физическими параметрами макросистемы, зависящими от этой нагретости. Известно, что при нагревании тела расширяются, давление газа в закрытом сосуде постоянного объема растет, меняется *сопротивление проводников* и *излучательная способность* накаливаемого тела. Изменение этих параметров можно связать с изменением температуры, а значит, можно создать эмпирический термометр, в основе которого лежит измерение описанных выше термодинамических параметров. При этом шкалу измерения температуры можно выбрать произвольно, поэтому температурных шкал может быть бесконечное множество. Например, в ртутных термометрах производится измерение длины столба ртути. Необходимо поставить в соответствие измеренную длину выраженную, например в миллиметрах, с температурой. При условии линейной зависимости длины столба ртути линейное расширение столба на единицу длины соответствует увеличению температуры на единицу. Остается открытым вопрос: как выбрать единицу температуры? Для этого необходимо измерить удлинение столба ртути в двух реперных

точках¹², например при кипении воды и при замерзании воды (таянии льда). Пусть точке кипения присваивается температура t_2 , а точке замерзания – температура t_1 . Тогда градусом температуры называется величина

$$1^\circ = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1},$$

где l_1 и l_2 – значения длины столба ртути в точке замерзания воды и в точке кипения соответственно. Вместо l_1 и l_2 могут стоять другие *термометрические величины*¹³, например давление газа. Отметим, что в различных температурных шкалах значения температуры одного и того же процесса могут резко отличаться. Более того, изменение температуры на один градус в одной шкале может соответствовать изменению температуры на несколько градусов в другой шкале. Иными словами, величина одного градуса в различных шкалах различна.

Температурой *термометрического тела* называется число, которое определяется по формуле

$$t = t_1 + \frac{l_t - l_1}{l_2 - l_1}(t_2 - t_1),$$

где l_t – термометрическая величина при измеряемой температуре.

Заметим, что каждый эмпирический термометр имеет ограниченную свойствами термометрического тела область применения, но эти области для различных термометров перекрываются.

Девятая генеральная конференция по мерам и весам в 1948 г. приняла для практического употребления *Международную стогоградусную температурную шкалу*. В этой шкале температура обозначается t и

¹² Реперные точки соответствуют фазовым переходам чистых веществ и отличаются тем, что при одинаковых условиях эти переходы происходят при одних и тех же температурах, не изменяющихся в процессе перехода. Отметим, что абсолютно чистых веществ не бывает, поэтому возникают сложности с определением единицы температуры.

¹³ Тело, выбираемое для измерения температуры, называется *термометрическим*, а величина, посредством которой измеряется температура, называется *термометрической*.

измеряется в градусах Цельсия $^{\circ}\text{C}$ (градус стоградусной шкалы). При этом принимается, что при нормальном давлении температуры плавления льда и кипения воды равны соответственно 0°C и 100°C . В 1954 г. Десятая генеральная конференция по мерам и весам установила абсолютную **термодинамическую температурную шкалу**, в которой температура обозначается T и измеряется в кельвинах (К). Один кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры *тройной точки воды*¹⁴. Значение было выбрано таким образом, чтобы 1 К был равен 1°C .

Связь между термодинамической температурой (*абсолютной температурой*) и температурой по стоградусной шкале имеет вид

$$T = t + 273,15^{\circ}\text{C}.$$

Температуру $T = 0$ называют **абсолютным нулем температуры**. При этой температуре система находилась бы в состоянии с наименьшей возможной энергией (в этом состоянии атомы и молекулы совершали бы *нулевые колебания*), а у частицы остается энергия *нулевых колебаний*, которую невозможно отнять охлаждением. Отметим, что согласно термодинамическим представлениям **абсолютный нуль недостижим**, но к нему можно приближаться сколь угодно близко.

Мы описали способы измерения температуры, но не указали ее термодинамический смысл.

С молекулярно-кинетической точки зрения температура *равновесной системы* характеризует *интенсивность теплового движения* атомов, молекул и других частиц, образующих систему. Как мы покажем далее, для равновесной системы частиц, описываемых законами классической статистической физики, средняя кинетическая энергия теплового движения частиц прямо пропорциональна абсолютной температуре системы. Таким образом, температура одноатомного газа с термодинамической точки зрения является мерой средней кинетической энергии атома и молекулы в состоянии равновесия. Если быть точнее, то температура характеризует приходящуюся на одну *степень свободы* (одна из независимых координат, однозначно определяющих положение частицы в пространстве) среднюю кинетическую энергию частиц

¹⁴ Это состояние, в котором при определенных значениях температуры и давления вода может одновременно и равновесно существовать в виде трех фаз – в твердом, жидком и газообразном состоянии.

макроскопической системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия. Важно отметить, что в *равновесном состоянии температура имеет одинаковое значение для всех макроскопических частей системы*. Если тела имеют *одинаковую температуру*, то между ними не происходит передачи кинетической энергии частиц (тепла). Если же существует разница температур, то тепло самопроизвольно переходит от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Можно было бы вместо температуры использовать среднюю кинетическую энергию, но тогда пришлось бы переопределять исторически сложившиеся температурные шкалы (к тому же сама по себе кинетическая энергия, известная нам из механики, не несет в себе информации о направлении переноса тепла). Если система находится в состоянии термодинамического равновесия, то производная энтропии S^{15} по внутренней энергии U для всех ее частей одинакова. Поэтому в статистической физике температура T вводится как величина, обратная производной энтропии S тела по его внутренней энергии U :

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}.$$

Введенная таким образом температура для тел, находящихся в термодинамическом равновесии друг с другом, является одинаковой.

Выразим связь температуры со средней кинетической энергией поступательного движения молекул газа. Для этого запишем *термическое уравнение состояния идеального газа*. **Уравнение состояния** – это уравнение, связывающее любой термодинамический параметр системы с параметрами, принятыми в качестве независимых переменных. Уравнение состояния, связывающее давление p , объем V и температуру T , называется **термическим уравнением состояния идеального газа** (иногда его называют просто уравнением состояния). Экспериментально было установлено, что для любого газа, близкого к идеальному, если его масса не меняется, $pV/T = C$, где $C = \text{const}$. Это уравнение называется **уравнением Клапейрона**.

Газовая постоянная C зависит от химического состава и массы газа. В такой форме уравнение состояния не совсем универсально. Введем следующую величину: $R = C/\nu$, где ν – количество вещества;

¹⁵ Подробнее про энтропию можно прочитать в [12].

R – **молярная газовая постоянная**. Тогда уравнение Клапейрона примет вид

$$pV_m = RT, \quad (1.8)$$

где V_m – молярный объем. Согласно *закону Авогадро*, при одинаковых давлениях и температурах молярные объемы различных газов также одинаковы. Из закона Авогадро и уравнения (1.8) следует, что R одинакова у всех газов. Поэтому ее называют **универсальной газовой постоянной**, $R = 8,31$ Дж/(моль · К). В наиболее общей форме для произвольной массы газа m уравнение (1.8) можно записать в виде

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT.$$

Это выражение называют **уравнением Менделеева–Клапейрона**. Введем постоянную Больцмана k^{16} , равную отношению универсальной газовой постоянной к постоянной Авогадро:

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Учитывая, что концентрация молекул газа $n_0 = N_A/V_m$, уравнение (1.8) примет вид

$$p = \frac{kN_A}{V_m} T = kn_0 T. \quad (1.9)$$

Выражение (1.9) представляет собой еще одну форму записи *уравнения состояния идеального газа*.

Из *основного уравнения молекулярно-кинетической теории* и уравнения (1.9) газа следует, что

$$\frac{2}{3} n_0 \langle E_k \rangle = n_0 kT \Rightarrow \langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Таким образом, средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа прямо пропорциональна темпера-

¹⁶ Постоянная Больцмана также обозначается k_B .

туре газа. В выражение для кинетической энергии молекулы идеального газа не входит масса молекулы. Следовательно, *молекулы с любой массой при данной температуре будут обладать одинаковой средней кинетической энергией*. Это означает, что при одной и той же температуре молекула большей массы будет иметь меньшую среднюю квадратичную скорость.

Для средней квадратичной скорости можно записать

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Поскольку все направления движения молекул идеального газа равновероятны, доля энергии, приходящейся на каждую из компонент кинетической энергии (E_{kx}, E_{ky}, E_{kz}), одинакова и равна $\frac{1}{2}kT$. Поэтому можно сказать, что на каждую независимую компоненту поступательного движения (каждую *поступательную степень свободы*) приходится доля кинетической энергии поступательного движения, равная $\frac{1}{2}kT$.

Теперь, когда мы рассмотрели основные положения МКТ, мы можем решить **задачу 1**.

Дано:

$$m_1 = 0,064 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,056 \text{ кг}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$p = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$M_{\text{O}_2} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M_{\text{N}_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\rho = ?$$

Решение

Нам необходимо найти плотность смеси газов. По определению

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Объем найдем из уравнения Менделеева–Клапейрона:

$$V = \frac{mRT}{pM}.$$

Следовательно,

$$\rho = \frac{pM}{RT}. \quad (1.10)$$

Уравнение (1.10) справедливо и для смеси газов, поскольку смесь идеальных газов тоже образует идеальный газ. Нам необходимо найти молярную массу смеси газов.

Согласно **закону Дальтона**, давление смеси газов, *химически не взаимодействующих между собой*, равно сумме их *парциальных давлений*¹⁷:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_N .$$

Отметим, что закон Дальтона выполняется для идеальных газов и соблюдается при малых давлениях, когда взаимодействие молекул друг с другом на расстоянии практически отсутствует. При обычных давлениях он соблюдается приближенно, а *при высоких давлениях наблюдается большое отклонение от этого закона*.

Рассмотрим газы, входящие в смесь по отдельности, описав каждый из них с помощью уравнения Менделеева–Клапейрона. Пусть p_1 и p_2 – парциальные давления кислорода и азота соответственно, V – объем смеси, T – ее температура. Тогда

$$p_1 V = \frac{m_1}{M_{\text{O}_2}} RT, \quad p_2 V = \frac{m_2}{M_{\text{N}_2}} RT .$$

Сложив эти уравнения, получим

$$(p_1 + p_2) V = \left(\frac{m_1}{M_{\text{O}_2}} + \frac{m_2}{M_{\text{N}_2}} \right) RT .$$

Из закона Дальтона следует, что $p = p_1 + p_2$. Тогда

$$p V = \left(\frac{m_1}{M_{\text{O}_2}} + \frac{m_2}{M_{\text{N}_2}} \right) RT .$$

¹⁷ **Парциальным** (от лат. *pars* – часть) **давлением** называется давление газа, входящего в состав газовой смеси, которое он производил бы, если один занимал весь объем смеси и находился при температуре смеси.

Из уравнения Менделеева–Клапейрона для **смеси** газов, учитывая, что масса смеси равна $m = m_1 + m_2$, следует, что

$$\frac{m_1 + m_2}{M} = \frac{m_1}{M_{\text{O}_2}} + \frac{m_2}{M_{\text{N}_2}}, \quad (1.11)$$

где M – молярная масса смеси газов, выразим ее из уравнения (1.11):

$$M = (m_1 + m_2) / \left(\frac{m_1}{M_{\text{O}_2}} + \frac{m_2}{M_{\text{N}_2}} \right). \quad (1.12)$$

Подставив (1.12) в (1.10), получим

$$\rho = \frac{p(m_1 + m_2)}{\left(m_1/M_{\text{O}_2} + m_2/M_{\text{N}_2} \right) RT}.$$

После подстановки численных значений имеем

$$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Ответ: $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Отметим, что если зафиксировать один из трех макроскопических параметров, связанных термическим уравнением состояния идеального газа, то, *считая массу газа неизменной*, можно получить три экспериментально установленных закона: *закон Бойля–Мариотта* ($T = \text{const}$, $pV = \text{const}$), *закон Гей-Люссака* ($p = \text{const}$, $V/T = \text{const}$), *закон Шарля (или второй закон Гей-Люссака)* ($V = \text{const}$, $p/T = \text{const}$).

Приведем еще несколько примеров решения задач по молекулярной физике.

Задача 3. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа при температуре $T = 300 \text{ К}$ составляет $u_{\text{кв}} = 515 \text{ м/с}$. Какое количество молекул этого газа содержится в $m = 10 \text{ г}$ этого газа [15]?

Решение

По определению число молекул равно

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A, \quad (1.13)$$

где ν – количество вещества. Нам не известна молярная масса газа M . Мы можем ее найти из связи средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа с температурой:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT = \frac{m_0 u_{\text{KB}}^2}{2}. \quad (1.14)$$

Умножая уравнение (1.14) на число Авогадро N_A и учитывая, что $M = m_0 N_A$, получим

$$M = \frac{3kN_A T}{u_{\text{KB}}^2}.$$

Подставим полученную молярную массу в (1.13):

$$N = \frac{m u_{\text{KB}}^2 N_A}{3kN_A T} = \frac{m u_{\text{KB}}^2}{3kT} = 2,1 \cdot 10^{23} \text{ молекул}.$$

Ответ: $N = 2,1 \cdot 10^{23}$ молекул.

Задача 4. Сколько атомов ртути содержится в воздухе объемом $1,0 \text{ м}^3$ в жилом помещении, зараженном ртутью, при температуре 293 К , если давление насыщенного пара ртути при этой температуре составляет 133 мПа ?

Дано:

$$\begin{aligned} V &= 1 \text{ м}^3 \\ T &= 293 \text{ К} \\ p &= 0,133 \text{ Па} \end{aligned}$$

$$N = ?$$

Решение

По определению $N = \nu N_A$. Количество вещества можно найти из уравнения Менделеева–Клапейрона $\nu = pV/RT$.

Тогда $N = 3,3 \times 10^{19}$ молекул. Чтобы оценить много это или мало, сравним с числом молекул воздуха при этих же условиях. Из уравнения Менделеева–Клапейрона в форме (1.9) следует, что концентрация молекул воздуха $n = p/kT = 2,47 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Число молекул воздуха в объеме $V = 1 \text{ м}^3$ равно $N = nV = 2,47 \times 10^{25}$ молекул, т. е. 1 атом ртути на 750 тысяч молекул воздуха.

Отметим, что предельно допустимая концентрация ртути в воздухе для жилых помещений составляет $0,0003 \text{ мг/м}^3$. Следовательно, в одном кубическом метре воздуха должно содержаться не более $9,4 \cdot 10^{17}$ молекул ртути. Таким образом, концентрация ртути превышена в 35 раз.

Ответ: $N = 3,3 \cdot 10^{19}$ молекул.

Задача 5. При аэродинамическом торможении в атмосфере планеты температура внутри автоматического спускаемого аппарата повысилась с 293 до 353 К. Какую часть воздуха необходимо выпустить, чтобы давление внутри аппарата не изменилось [16]?

Решение

Будем считать, что процесс состоит из двух этапов: 1) изохорного повышения давления; 2) удаления из системы части газа. На втором этапе система открытая. Доля воздуха, которую надо выпустить через выпускной клапан, есть $\Delta m / m_1$, где $\Delta m = m_2 - m_1$ (m_1 – масса воздуха до аварийного срабатывания клапана, m_2 – масса воздуха после сброса давления). Конечным состоянием является состояние, при котором давление газа равно начальному ($p_2 = p_1$). Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона для начального и конечного состояний системы:

$$p_1 V = m_1 R T_1 / M, \quad p_2 V = m_2 R T_2 / M.$$

Поскольку $p_2 = p_1$,

$$m_1 R T_1 / M = m_2 R T_2 / M \Rightarrow m_1 T_1 = m_2 T_2.$$

Тогда

$$\Delta m = m_1 (T_1 / T_2 - 1) \Rightarrow \Delta m / m_1 = (T_1 / T_2 - 1) = -0,17.$$

Знак «минус» указывает на то, что масса воздуха уменьшилась.

Ответ: $|\Delta m / m_1| = 0,17$.

Теперь рассмотрим общую схему решения задач по молекулярной физике.

1.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОЛЕКУЛЯРНОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

При решении задач на молекулярно-кинетическую теорию газов и газовые законы необходимо руководствоваться общими принципами и подходами, рассмотренными во введении к работе. Вы должны задавать себе вопросы и искать на них ответы, последовательно приближаясь к ответу на вопрос, поставленный в задаче. При анализе условия особое внимание следует уделить параметрам, заданным неявно. ***В задачах, приведенных в пособии, рассматриваются только идеальные газы.***

Рассмотрим некоторые особенности решения задач на МКТ и газовые законы.

Для решения задач на МКТ газов и газовые законы необходимо:

- 1) знать основное уравнение МКТ газов;
- 2) знать уравнение Менделеева–Клапейрона;
- 3) знать газовые законы для различных изопроцессов;
- 4) владеть основными понятиями этой теории.

Задачи на расчет параметров состояния газов можно условно разделить на две группы. В первую группу входят задачи, оперирующие усредненными характеристиками молекул. В подобных задачах требуется найти *среднюю скорость, размер молекул* (атомов), среднюю кинетическую энергию молекул. Также в задачах этой группы зачастую требуется определить параметры состояния идеального газа с использованием упомянутых выше усредненных характеристик отдельных молекул. *Основой решения задач этой группы является основное уравнение молекулярно-кинетической теории, законы Авогадро и Дальтона.*

Вторую группу составляют задачи на газовые законы, в которых характеристики отдельных молекул не рассматриваются. Задачи на газовые законы достаточно разнообразны. *Параметры, определяющие состояния газа, связаны уравнением Менделеева–Клапейрона*, поэтому если в задаче задано одно состояние газа и требуется определить какой-либо параметр этого состояния, то нужно воспользоваться уравнением Менделеева–Клапейрона. В случае, если в задаче рассматривается несколько различных состояний газа, необходимо установить: меняется ли масса газа при переходе из одного состояния в другое. Если масса газа остается неизменной и в данном процессе изменяется какой-либо из параметров состояния, то применяется соответствующий газовый закон (например, Гей-Люссака, Шарля, Бойля–Мариотта). Если

масса газа при переходе из одного состояния в другое изменяется, то необходимо использовать уравнение Менделеева–Клапейрона, которое записывается для каждого состояния. Затем система уравнений решается относительно искомой величины.

Если в задаче рассматривается смесь газов, то для нахождения результирующего давления, а как следствие и других параметров (плотности, концентрации, молярной массы), необходимо использовать закон Дальтона.

Многие задачи можно отнести и к первой, и ко второй группе.

Во всех задачах рекомендуется пользоваться термодинамической (абсолютной) шкалой температур.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

Ниже приведены вопросы для самоконтроля, отвечая на которые, можно проверить, достаточно ли хорошо вы усвоили теоретический материал по разделу «Молекулярная физика. Газовые законы».

1. Чем качественно отличаются термодинамический и статистический методы исследования макроскопических систем?
2. Почему динамическое описание системы многих частиц неосуществимо с технической и бесполезно с практической точки зрения?
3. Дайте определение термодинамически изолированной системы.
4. Что понимают под состоянием термодинамического равновесия системы?
5. Что такое процесс релаксации системы?
6. Что такое время релаксации системы?
7. Какие процессы называют равновесными и квазиравновесными?
8. Охарактеризуйте изопроцессы с точки зрения их равновесности.
9. Что такое термодинамические параметры? Какие термодинамические параметры вам известны?
10. Каков физический смысл числа Авогадро?
11. Что понимают под эффективным диаметром молекул?
12. Как понимать термин «столкновение молекул»?
13. В чем заключается молекулярно-кинетическое толкование давления газа?
14. Что такое объем газа?
15. Дайте определение термодинамической температуры.
16. Какие температурные шкалы вы знаете? Чем они отличаются?

17. В чем физическая суть основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов?

18. От каких величин зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа?

19. Как связана средняя квадратичная скорость молекул газа с его плотностью?

20. При каких условиях и допущениях газ можно рассматривать как идеальный?

21. Приведите пример реального газа, по своим свойствам близкого к идеальному.

22. Как называется уравнение, связывающее любой термодинамический параметр системы с параметрами, принятыми в качестве независимых переменных?

23. Как называется уравнение, связывающее давление p , объем V и температуру T ?

24. Запишите уравнение состояния идеального газа для произвольной массы газа.

25. В чем смысл закона Дальтона? При каких условиях он выполняется?

26. Что означает процесс выравнивания температуры в объеме газа с молекулярно-кинетической точки зрения?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в прил. В. Основные формулы вынесены в прил. Д, табл. 1.

Уровень 1

1.1. Температура идеального газа увеличилась в два раза, при этом средняя квадратичная скорость молекул газа увеличилась на $\Delta v_{\text{кв}} = 400$ м/с. *Насколько* изменилась плотность газа, если давление газа равно $p = 100$ кПа и поддерживается неизменным?

1.2. Концентрации молекул кислорода и гелия равны, также равны их средние квадратичные скорости. Найти отношение давлений этих газов $p_{\text{O}_2} / p_{\text{He}}$.

1.3. В сосуде объемом $V = 2$ л находится масса $m = 10$ г кислорода при давлении $p = 90$ кПа. Найти среднюю квадратичную скорость

молекул газа, концентрацию молекул и число молекул N , находящихся в сосуде.

1.4. Плотность газа в баллоне электрической лампочки $\rho = 900 \text{ г/м}^3$. При горении лампочки средняя квадратичная скорость молекул газа в ней возросла с 547 м/с до 660 м/с . *Насколько* изменилось при этом давление в лампочке?

1.5. Сколько молекул водорода обеспечат в закрытом сосуде объемом 20 см^3 давление 2 кПа при температуре 373 К ? Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы кислорода при таких же условиях.

1.6. Оценить линейный размер молекулы воды. Масса одного моля воды $m = 18 \text{ г}$, объем $V_m = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{моль}$.

1.7. В закрытом сосуде находится газ массой $m_1 = 2 \text{ кг}$ под давлением $p = 1,5 \text{ МПа}$. Сколько газа выпустили из сосуда, если давление стало $p = 0,5 \text{ МПа}$? Считать, что температура газа не изменилась.

1.8. Какому давлению необходимо подвергнуть идеальный газ, состоящий из молекул азота N_2 , при температуре $T = 330 \text{ К}$, чтобы его плотность оказалась равной $\rho = 20 \text{ кг/м}^3$?

1.9. Определить давление воздуха после его сжатия в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, если температура сжатого воздуха стала $t = 800^\circ\text{C}$, а объем уменьшился в 30 раз. Изначально воздух находился при нормальных условиях.

1.10. В закрытом сосуде емкостью $V = 20 \text{ л}$ находятся кислород массой $m_1 = 10 \text{ г}$ и гелий массой $m_2 = 2 \text{ г}$. Найти давление газовой смеси, если температура $T = 350 \text{ К}$.

Уровень 2

2.1. Сколько необходимо взять молекул идеального газа, чтобы их энергия поступательного движения при температуре 305 К была равна 1 Дж?

2.2. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа при температуре $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $v_{\text{кв}} = 500\text{ м/с}$. Какое количество молекул этого газа содержится в 20,0 г этого газа? Какое давление газ оказывает на стенки сосуда при данной температуре?

2.3. В баллоне А находится кислород массой 10 г, а в таком же баллоне Б – водород массой 0,5 г. Сравнить давления в баллонах, если у молекул кислорода и водорода одинаковы: 1) средние квадратичные скорости; 2) средние кинетические энергии.

2.4. Сосуд, содержащий одноатомный идеальный газ, движется со скоростью v_0 . Насколько увеличится средняя квадратичная скорость молекул газа при остановке сосуда? Теплоемкость, теплопроводность и масса стенок сосуда пренебрежимо малы.

2.5. В баллоне содержится сжатый газ при температуре $t = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $p = 3,5\text{ МПа}$. Каково будет давление газа, если из баллона выпустить 40 % первоначальной массы газа, при этом температура газа понизилась на $\Delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$?

2.6. Для погружения и всплытия подводной лодки в ней имеются два сообщающихся между собой резервуара. В погруженном состоянии один из резервуаров (балластная цистерна) объемом V_1 заполнен водой. Во втором резервуаре объемом V_2 находится сжатый воздух. Каково должно быть минимальное давление сжатого воздуха, чтобы при всплытии лодки с глубины H сжатый воздух полностью вытеснил воду из балластной цистерны? Атмосферное давление нормальное, расширение воздуха происходит изотермически.

2.7. Компрессор захватывает при каждом качании воздух объемом $V_0 = 1\text{ л}$ при нормальном атмосферном давлении и температуре $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ и нагнетает его в автомобильный баллон, объем которого $V_1 = 0,5\text{ м}^3$; температура воздуха в баллоне $t_1 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сколько кача-

ний должен сделать компрессор, чтобы площадь соприкосновения покрышки с полотном дороги уменьшилась на $\Delta S = 100 \text{ см}^2$, если до этого она равнялась $S = 450 \text{ см}^2$ и на колесо приходится нагрузка $F = 4,90 \text{ кН}$?

2.8. Надутый шарик находится внутри замкнутого сосуда (рис. 7), занимая четвертую часть его объема. При этом давление газа внутри шарика равно p_1 . Давление в сосуде равно p_2 . Систему медленно нагревают. При некоторой критической температуре, когда объем шарика увеличился вдвое по сравнению с первоначальным, а разность давлений газа внутри и снаружи шарика стала равной Δp , шарик лопнул. В дальнейшем температура газа

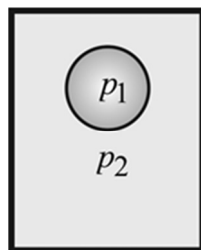


Рис. 7

в сосуде поддерживается равной критической. Определить установившееся давление газа в сосуде. Объемом оболочки шарика пренебречь.

2.9. В баллоне находится смесь газов в количествах $m_1, m_2, \dots, m_n$ с молярными массами $M_1, M_2, \dots, M_n$ при температуре T . Какова молярная масса смеси?

2.10. Вблизи поверхности Земли 78,08 % молекул воздуха приходится на долю азота (N_2), 20,95 % – на долю кислорода (O_2), 0,93 % – на долю аргона (Ar), 0,04 % – на долю других газов. Полагая давление воздуха равным $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$, найти: 1) парциальное давление азота, кислорода и аргона; 2) среднюю молекулярную M_r массу воздуха.

Уровень 3

3.1. Повышение температуры газа на ΔT привело к увеличению средней квадратичной скорости молекул газа на $\Delta v_{\text{кв}}$. Насколько нужно повысить температуру газа, чтобы средняя квадратичная скорость повысилась еще на $\Delta v_{\text{кв}}$? Молярная масса газа M .

3.2. В сосуде с идеальным газом поддерживается постоянная температура T_0 . Вне полости находится такой же газ, давление которого p

и температура T (рис. 8). Чему равно давление газа в полости, если в ее стенке имеется небольшое отверстие?

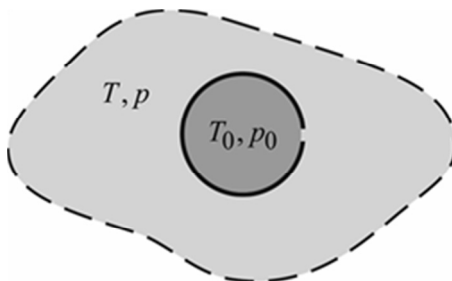


Рис. 8

3.3. Площадь окна $S = 2 \text{ м}^2$, расстояние между оконными рамами $L = 0,25 \text{ м}$. Температура воздуха между рамами меняется линейно в направлении, перпендикулярном плоскости рамы, от t_1 до t_2 , где $t_1 = 0^\circ\text{C}$ – температура наружного стекла, а $t_2 = 25^\circ\text{C}$ – внутреннего. Давление воздуха между оконными рамами равно нормальному атмосферному давлению. Оценить массу воздуха между рамами и суммарную кинетическую энергию молекул воздуха E .

3.4. Средняя кинетическая энергия материальной точки, совершающей пространственно ограниченное движение под действием гравитационных сил, равна половине ее потенциальной энергии, взятой с обратным знаком. Полагая, что средняя масса атомов Солнца равна примерно удвоенной массе протона, оценить температуру внутри Солнца.

3.5. Герметически закрытый бак высотой H заполнен водой так, что на его дне остались два *одинаковых* пузырька (рис. 9). Давление на дно бака равно p_0 . Каким станет давление на дно бака, если: а) всплывет один пузырек; б) два пузырька? Процесс считать изотермическим.

3.6. Электродинамический громкоговоритель имеет диффузор с площадью поперечного сечения $S = 300 \text{ см}^2$ и массой $m = 5 \text{ г}$. Резонансная частота диффузора $\nu_0 = 50 \text{ Гц}$. Какой окажется резонансная частота, если громкоговоритель врезать в стенку закрытого ящика

объемом $V = 40$ л (рис. 10)? Считать, что температура воздуха внутри ящика не изменяется при колебании диффузора.

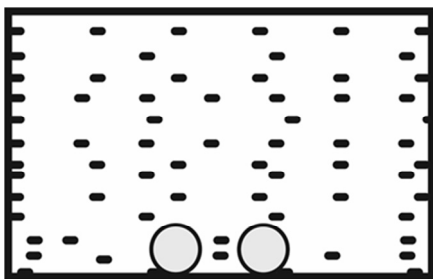


Рис. 9

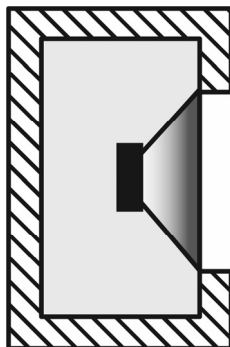


Рис. 10

3.7. Из сосуда объемом V производится с постоянной скоростью v откачка воздуха. Процесс считать *изотермическим*, а скорость откачки – не зависящей от давления внутри сосуда. Найти зависимость давления газа в сосуде от времени.

3.8. Две открытые с обоих концов в атмосферу трубы с площадями сечений S_1 и S_2 ($S_2 > S_1$) состыкованы между собой (рис. 11). В них вставлены соединенные стержнем поршни, которые при температуре T_0 находятся в равновесии на одинаковых расстояниях от стыка труб. Между поршнями находится идеальный газ. При какой температуре газа между поршнями левый поршень сместится вправо до стыка труб? А при какой температуре до стыка труб переместится правый поршень?

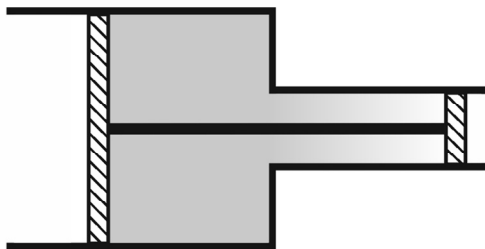


Рис. 11

3.9. Сосуд объемом $V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ разделен пополам полупроницаемой перегородкой. В одну половину сосуда введен водород массой $m_1 = 2 \text{ г}$ и азот массой $m_2 = 28 \text{ г}$, в другой половине – вакуум. Через перегородку может диффундировать только водород. Во время процесса поддерживается температура 373 К . Какие давления установятся в обеих частях сосуда?

3.10. В баллоне объемом $V_0 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ содержится смесь кислорода и азота общей массой $m = 12 \text{ г}$. При температуре 293 К давление смеси равно $p = 5,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Смесь газов пропускается через ловушку, содержащую раскаленные медные стружки, и затем перекачивается в другой баллон объемом $V_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$. Каково будет давление во втором баллоне при температуре 360 К , если весь кислород соединится с медью?

2. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ ИЗОПРОЦЕССЫ

2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Первое начало термодинамики утверждает, что изменение *внутренней энергии*¹⁸ термодинамической системы может быть осуществлено двумя путями при условии отсутствия диффузии: путем совершения механической работы и путем теплопередачи. Энергия, переданная системе путем теплопередачи, называется количеством теплоты Q .

Таким образом, количество теплоты может быть определено как разность изменения внутренней энергии системы и механической работы, совершенной над системой: $Q = \Delta U - A'$, где Q – количество теплоты, переданной системе; $\Delta U = U_2 - U_1$ – приращение внутренней энергии системы при ее переходе из первого состояния во второе; A' – работа, совершенная над системой.

Так как работа A' , совершенная над системой, равна работе A , совершенной системой, взятой с обратным знаком, если выполнено условие равенства работ, то *первое начало термодинамики* может быть сформулировано следующим образом: $Q = \Delta U + A$, теплота,

¹⁸ *Внутренняя энергия* – часть полной энергии термодинамической системы, которая связана со всевозможными движениями частиц системы относительно центра масс системы и их взаимодействиями между собой, включая энергию, обусловленную взаимодействием и движением частиц, составляющих сложные частицы. К внутренней энергии не относятся кинетическая энергия, связанная с движением центра масс системы, и потенциальная энергия системы во внешних полях. Внутренняя энергия – это не специфический вид энергии, а совокупность той части полной энергии системы, которую следует учитывать в конкретной задаче.

подводимая к системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение этой системой работы над внешними телами.

Если к термодинамической системе подводится элементарное количество теплоты, то оно расходуется на изменение внутренней энергии и совершение элементарной работы:

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

Отметим *принципиальное* отличие величины dU и величин δQ и δA . Величина dU представляет собой *полный дифференциал*, т. е. бесконечно малое приращение величины, и поэтому интеграл от нее равен разности внутренних энергий системы в двух состояниях, конечном и начальном:

$$U_2 - U_1 = \int_1^2 dU.$$

Интегралы от малых величин δQ и δA – это количество теплоты, переданной системе, и работа, совершенная системой при ее переходе из первого состояния во второе:

$$Q_{12} = \int_1^2 \delta Q; \quad A_{12} = \int_1^2 \delta A.$$

В отличие от внутренней энергии, являющейся функцией состояния, теплота и работа функциями состояния не являются, а зависят от того, каким образом система переведена из одного состояния в другое.

По своему физическому смыслу первое начало термодинамики представляет собой закон сохранения (изменения) энергии в термодинамике. Если, согласно закону изменения энергии в механике, работа неконсервативных сил равна приращению механической энергии системы (в частности, имеющая отрицательный знак механическая работа сил трения скольжения равна уменьшению механической энергии системы), то, согласно первому началу термодинамики, приращение внутренней энергии термодинамической системы равно сумме работы внешних сил, совершенной над системой, и энергии, переданной системе путем теплопередачи.

Теплоемкость – это количество теплоты, затрачиваемое для изменения температуры на градус Кельвина:

$$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT}.$$

В самом общем случае теплоемкость произвольного тела может зависеть от его параметров состояния (например, от его температуры или объема). Очевидно, что теплоемкость термодинамической системы изменяется при изменении количества вещества в ней. Для систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, их теплоемкость пропорциональна количеству вещества.

Удельная теплоемкость $c = C_{\text{тела}}/m$, где m – масса тела.

Молярная теплоемкость $C = C_{\text{тела}}/\nu$, где $\nu = m/M$ – количество вещества в нем. Эти теплоемкости связаны между собой через молярную массу M соотношением

$$c = \frac{C}{M}.$$

Теплоемкость так же, как и количество переданной телу теплоты, зависит от того, каким образом (а точнее, при осуществлении какого процесса) теплота передавалась этому телу.

Если в процессе изменения состояния идеального газа теплоемкость его не изменяется, то такой процесс называется **политропическим**. Частными случаями политропического процесса являются **изопроцессы**, протекающие при постоянных значениях температуры, давления или объема.

Для идеального газа **изменение внутренней энергии**

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T,$$

где $i = 3$ – степень свободы молекул, зависящая от строения молекулы. Так, для двухатомной молекулы с жесткими связями $i = 5$, для трехатомной молекулы с жесткими связями $i = 6$ и т. д.

Изотермическим процессом ($T = \text{const}$) называют квазистатический процесс, протекающий при постоянной температуре T . Из урав-

нения состояния идеального газа следует, что при постоянной температуре T и неизменном количестве вещества ν в сосуде произведение давления p газа на его объем V должно оставаться постоянным:

$$pV = \text{const}.$$

На $p(V)$ диаграмме изотермические процессы изображаются при различных значениях температуры T семейством гипербол $p \propto 1/V$, которые называются изотермами. Так как коэффициент пропорциональности в этом соотношении увеличивается с ростом температуры, изотермы, соответствующие более высоким значениям температуры, располагаются на графике выше изотерм, соответствующих меньшим значениям температуры (рис. 12). Уравнение изотермического процесса было получено из эксперимента английским физиком Р. Бойлем (1662 г.) и независимо – французским физиком Э. Мариоттом (1676 г.). Поэтому это уравнение называют **законом Бойля–Мариотта**.

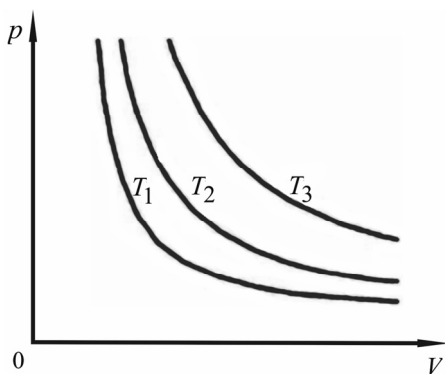


Рис. 12. Семейство изотерм на $p(V)$ диаграмме: $T_3 > T_2 > T_1$

Изохорный процесс ($V = \text{const}$) – это процесс квазистатического нагревания или охлаждения газа при постоянном объеме V и при условии, что количество вещества ν в сосуде остается неизменным.

Как следует из уравнения состояния идеального газа, при этих условиях давление газа p изменяется прямо пропорционально его абсолютной температуре: $p \propto T$ или $\frac{p}{T} = \text{const}$.

На диаграмме $p(T)$ изохорные процессы для заданного количества вещества ν при различных значениях объема V изображаются семейством прямых линий, которые называются изохорами. Большим значениям объема соответствуют изохоры с меньшим наклоном по отношению к оси температур (рис. 13).

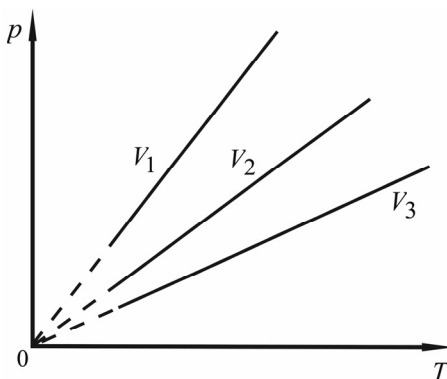


Рис. 13. Семейство изохор на $p(T)$ диаграмме: $V_3 > V_2 > V_1$

Экспериментально зависимость давления газа от температуры исследовал французский физик Ж. Шарль (1787 г.). Поэтому уравнение изохорного процесса называется **законом Шарля**.

Изобарным процессом ($p = \text{const}$) называют квазистатический процесс, протекающий при неизменном давлении p .

Уравнение изобарного процесса для некоторого неизменного количества вещества ν имеет вид

$$\frac{V}{T} = \text{const}.$$

На плоскости VT изобарные процессы при разных значениях давления p изображаются семейством прямых линий (рис. 14), называемых изобарами.

Зависимость объема газа от температуры при неизменном давлении была экспериментально исследована французским физиком Ж. Гей-Люссаком (1862 г.). Поэтому уравнение изобарного процесса называют **законом Гей-Люссака**.

Адиабатическим процессом ($S = \text{const}^{19}$, $Q = 0$) называют процесс, при котором нет теплообмена рассматриваемой системы и окружающей среды.

Первый закон термодинамики принимает вид $A = -\Delta U$, т. е. газ совершает работу за счет убыли его внутренней энергии.

На плоскости pV процесс адиабатического расширения (или сжатия) газа изображается кривой, называемой адиабатой. При адиабатическом расширении газ совершает положительную работу ($A > 0$); поэтому его внутренняя энергия уменьшается ($\Delta U < 0$).

В термодинамике выводится уравнение адиабатического процесса (рис. 15) для идеального газа, в координатах pV оно имеет вид

$$pV^\gamma = \text{const}.$$

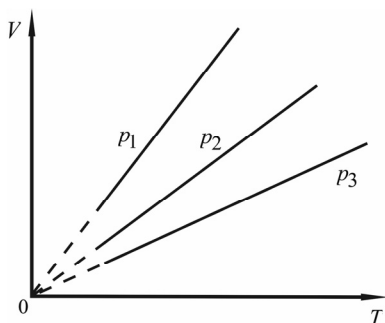


Рис. 14. Семейство изобар на $V(T)$ диаграмме: $p_3 > p_2 > p_1$

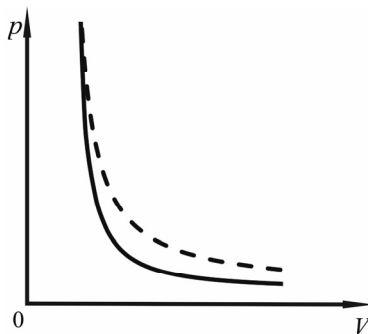


Рис. 15. Графики адиабатического (сплошная линия) и изотермического (пунктирная линия) процессов в плоскости pV

Это соотношение называют уравнением Пуассона. Здесь $\gamma = C_p / C_V$ – показатель адиабаты, C_p и C_V – теплоемкости газа в процессах с постоянным давлением и с постоянным объемом; $C_V = \frac{i}{2}R$ – молярная теплоемкость газа в процессах с постоянным

¹⁹ Адиабатический процесс является изоэнтропийным, т. е. протекает при неизменной энтропии $S = \text{const}$.

объемом; $C_p = \frac{i+2}{2} R$ – молярная теплоемкость газа в процессах с постоянным давлением, где число степеней свободы i зависит от физико-химической структуры молекулы газа (для идеальных одноатомных газов $i = 3$, двухатомных газов $i = 5$ и для многоатомных газов $i = 6$).

Разница между молярной теплоемкостью при постоянном давлении и молярной теплоемкостью при постоянном объеме равна универсальной газовой постоянной – **соотношению Майера**:

$$C_p - C_V = R.$$

Работу газ совершает только при изменении объема, т. е. $A = p\Delta V$.

Рассмотрим три случая, когда один из членов первого начала термодинамики равен 0:

$Q = 0$ – это *адиабатический процесс*, изменение состояния происходит без теплообмена с внешней средой, $A = -\Delta U$, $S = \text{const}$;

$\Delta U = 0$ – это *изотермический процесс*, так как внутренняя энергия не изменяется, $Q = A = p\Delta V$, $T = \text{const}$.

$A = 0$ – это *изохорический процесс*, так как газ не совершает работу, а значит, и не меняет объема, $Q = \Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$, $V = \text{const}$.

Наконец, *изобарический процесс*, в котором энергия расходуется на изменение внутренней энергии и на работу, $Q = \Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T + p\Delta V$, $p = \text{const}$.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. С идеальным газом проводят циклический процесс, который изображен на рис. 16. Указать на графике участки увеличения и уменьшения внутренней энергии.

Решение. Построим график процесса (рис. 17).

Проведем гиперболы, касательные к кривой. Так как гипербола в координатах p , V является графиком изотермы:

$$pV = \nu RT = \text{const}, \quad (2.1)$$

то $T_1 < T_2$. Следовательно, от состояния 1 до состояния 2 температура газа повышалась, а от состояния 2 до состояния 1 – понижалась.

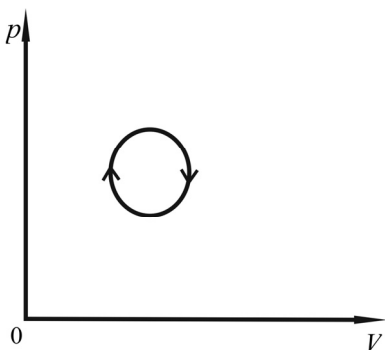


Рис. 16

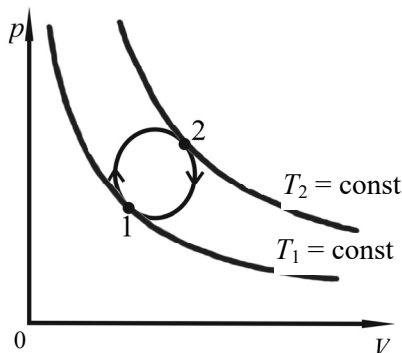


Рис. 17

Запишем формулу изменения внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (2.2)$$

Следовательно, от состояния 1 до состояния 2 внутренняя энергия повышалась, а от состояния 2 до состояния 1 – понижалась.

Задача 2. Теплота подводится к одноатомному идеальному газу в изобарном процессе. Определить, какая часть количества теплоты расходуется при этом на увеличение внутренней энергии газа, а какая часть идет на совершение системой работы.

Решение. В соответствии с первым началом термодинамики для изобарного процесса запишем

$$Q = \Delta U + A, \quad (2.3)$$

где работа, которую совершает идеальный газ в изобарном процессе, равна

$$A = p \Delta V. \quad (2.4)$$

А изменение внутренней энергии идеального газа в любом процессе, где изменяется температура, равно

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T, \quad (2.5)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа (так как газ у нас одноатомный, то $i = 3$); ν – число молей вещества; ΔT – изменение температуры, которое происходит в заданном процессе. Так как мы имеем дело с идеальным газом, то его поведение можно описывать при помощи уравнения Менделеева–Клапейрона:

$$pV = \nu RT. \quad (2.6)$$

Так как процесс происходит изобарный, то для двух состояний этого газа в процессе имеем

$$pV_1 = \nu RT_1, \quad (2.7)$$

$$pV_2 = \nu RT_2. \quad (2.8)$$

Из левой части выражения (2.7) вычтем левую часть (2.8), аналогично поступим с правыми частями, имеем

$$p\Delta V = \nu R\Delta T = A. \quad (2.9)$$

Первое начало термодинамики можно переписать как

$$\Delta Q = A + \Delta U = \nu R\Delta T + \frac{i}{2} \nu R\Delta T, \quad (2.10)$$

$$1 = x + \frac{3}{2}x \rightarrow 1 = \frac{5}{2}x \rightarrow x = 0,4.$$

Ответ: на работу идет 0,4 части количества теплоты, на увеличение внутренней энергии идет 0,6 части подведенного тепла.

Задача 3. В закрытом сосуде с жесткими стенками находится газ под давлением 200 кПа. Каким станет давление газа, если температуру повысить на 30 %?

Решение

Так как сосуд с жесткими стенками с газом закрытый, объем газа не меняется. Изохорный процесс описывается законом Шарля:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (2.11)$$

По условию задачи температура газа повысилась на 30 %, поэтому можно записать

$$T_2 = T_1 + 0,3T_1 = 1,3T_1. \quad (2.12)$$

Подставив соотношение (2.12) в закон Шарля (2.11), получим

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{1,3T_1}, \quad (2.13)$$

откуда

$$p_2 = 1,3p_1. \quad (2.14)$$

Переведем единицы в систему СИ: начальное давление газа $p_1 = 200 \text{ кПа}$.

Вычислим p_2 :

$$p_2 = 1,3 \cdot 2 \cdot 10^5 = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Ответ: давление газа станет равным 260 кПа.

Задача 4. Двухатомный газ первоначально имеет объем 50,0 л, и его давление равно $p_1 = 3,00 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Газ нагревают изохорно до тех пор, пока давление не удвоится. После этого газ изотермически расширяют до первоначального давления. А затем изобарно охлаждают до первоначального объема. Определить в каждом процессе: а) работу, производимую газом; б) изменение его внутренней энергии; в) количество теплоты, получаемой (отдаваемой) газом.

Решение

Построим график процесса (рис. 18).

Газ проходит через три состояния со следующими макропараметрами:

$$P_1, V_1, T_1 \rightarrow P_2, V_1, T_2 \rightarrow P_3, V_3, T_2 \rightarrow P_1, V_1, T_1.$$

1. Из уравнения Клапейрона–Менделеева с учетом начальных условий получим выражение для температуры T_1 :

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{\nu R}. \quad (2.15)$$

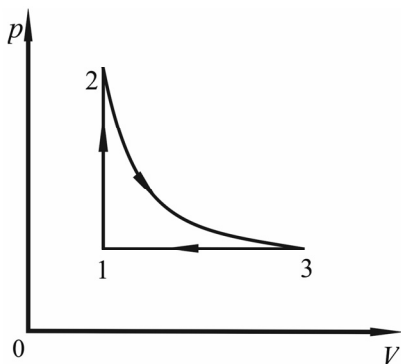


Рис. 18

2. Применив для перехода $1 \rightarrow 2$ закон Шарля и учтя условие задачи, выразим T_2 :

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = 2T_1. \quad (2.16)$$

Так как при изохорном нагревании работа $A_V = 0$, то все сообщенное газу количество теплоты идет на увеличение его внутренней энергии:

$$\Delta Q_V = \Delta U_V.$$

С учетом уравнения Клапейрона–Менделеева и (2.16) получим

$$\Delta U_V = \nu C_V \Delta T = \nu \frac{i}{2} p_1 V_1 = \frac{5}{2} 3 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 3,75 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

3. Переход $2 \rightarrow 3$ осуществляется при $T_2 = \text{const}$, следовательно, изменение внутренней энергии газа $\Delta U_T = 0$. Все переданное газу количество теплоты расходуется на совершение работы: $\Delta Q_T = A_T$.

Подставив в формулу полной работы при изменении объема газа выражение для давления из уравнения Клапейрона–Менделеева и проинтегрировав по объему от V_1 до V_3 , получим

$$A_T = \int_{V_1}^{V_3} \frac{\nu R T_2}{V} dV = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_1}. \quad (2.17)$$

Применив уравнение Клапейрона–Менделеева для состояний 1 и 3:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_3 V_3}{T_2} \quad (2.18)$$

и учтя, что $p_3 = p_1$, и (2.16), получим $V_3 = 2V_1$ и окончательное выражение для работы:

$$A_T = \nu R T_2 \ln \frac{T_2}{T_1} = p_1 V_1 \ln 2 = 3 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,693 = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

4. Для количества теплоты, отдаваемой газом при изобарном сжатии $3 \rightarrow 1$, и работы, совершенной над газом (с учетом выражений (2.16), (2.17), формулы молярной теплоемкости газа при постоянном давлении и уравнения Майера), получим

$$\Delta Q = \nu C_p (T_1 - T_2) = \Delta U_V + A_p = -\frac{i+2}{2} p_1 V_1 =$$

$$-3 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \frac{7}{2} = -5,25 \cdot 10^4 \text{ Дж,}$$

$$A_p = p_1 (V_1 - V_3) = -p_1 V_1 = -1,50 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Задача 5. В четырехтактном двигателе дизеля засосанный атмосферный воздух в объеме 10 л подвергается 12-кратному сжатию. Начальное давление – атмосферное, начальная температура 10 °С. Процесс сжатия адиабатный, газ идеальный. Определить конечное давление, конечную температуру и работу сжатия.

Решение

Из уравнения адиабаты $p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$ определим конечное давление p_2 :

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = 10^5 \cdot 12^{1,4} = 3,24 \cdot 10^6 \text{ Па.} \quad (2.19)$$

Из уравнения адиабаты $T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}$ определим T_2 :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = 283 \cdot 12^{0,4} = 764,6 \text{ К.} \quad (2.20)$$

Допуская, что воздух состоит в основном из кислорода (O_2) и азота (N_2), можно считать его двухатомным газом с теплоемкостью $C_V = (5/2)R$.

Подставив (2.20) в формулы работы газа при адиабатном процессе и определив массу воздуха в двигателе из уравнения Клапейрона–Менделеева, получим выражение для работы при адиабатном сжатии:

$$A = \frac{5}{2} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right],$$

$$A = \frac{5}{2} 10^5 \cdot 10^{-2} (1 - 12^{0,4}) = -4,25 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Ответ: $P_2 = 3,24 \cdot 10^6$ Па; $T_2 = 764,6$ К; $A = -4,25 \cdot 10^3$ Дж.

2.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА «ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ»

Задачи об изменении внутренней энергии тел можно разделить на две группы.

В задачах первой группы рассматривают такие явления, где в изолированной системе при взаимодействии тел изменяется лишь их внутренняя энергия без совершения работы над внешней средой.

1. Установить, у каких тел внутренняя энергия уменьшается, а у каких – возрастает.

2. Составить уравнение теплового баланса ($\Delta U_{\Sigma} = 0$), при записи которого в выражении $Q = cm\Delta t = cm(t_2 - t_1)$ ²⁰ для изменения внутренней

²⁰ Можно использовать как температуру в кельвинах, так и в цельсиях, поскольку абсолютная температурная шкала и шкала Цельсия отличаются друг от друга лишь начальной точкой, но не величиной единицы измерения.

энергии нужно вычитать из конечной температуры тела начальную и суммировать члены с учетом получающегося знака.

3. Полученное уравнение решить относительно искомой величины.

4. Решение проверить и оценить критически.

В задачах второй группы рассматриваются явления, связанные с превращением одного вида энергии в другой при взаимодействии двух тел. Результат такого взаимодействия: изменение внутренней энергии одного тела в результате совершенной им или над ним работы.

1. Убедиться, что в процессе взаимодействия тел теплота извне к ним не подводится, т. е. действительно ли $Q = 0$.

2. Установить, у какого из двух взаимодействующих тел изменяется внутренняя энергия и что является причиной этого изменения – работа, совершенная самим телом, или работа, совершенная над телом.

3. Записать уравнение $Q = \Delta U + A$ для тела, у которого изменяется внутренняя энергия, учитывая знак перед A и КПД рассматриваемого процесса.

4. Если работа совершается за счет уменьшения внутренней энергии одного из тел, то $A = -\Delta U$, а если внутренняя энергия тела увеличивается за счет работы, совершенной над телом, то $A = \Delta U$.

5. Найти выражения для ΔU и A .

6. Подставляя в исходное уравнение вместо ΔU и A их выражения, получить окончательное соотношение для определения искомой величины.

7. Полученное уравнение решить относительно искомой величины.

8. Решение проверить и оценить критически.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что понимают под внутренней энергией системы? От каких величин она зависит? Укажите пути изменения внутренней энергии.

2. Что понимают под числом степеней свободы молекулы? От чего зависит это число? Чему оно равно для одноатомного, двухатомного и многоатомного газа?

3. Запишите первое начало термодинамики для изохорического, изотермического, изобарического и адиабатического процессов.

4. В каких случаях изменение внутренней энергии системы равно количеству теплоты, подведенному к системе?

5. В каких случаях изменение внутренней энергии системы равно внешней работе, совершенной над системой?

6. Что называют теплоемкостью системы?
7. Что понимают под теплоемкостью вещества – удельной, молярной? Назовите единицы их измерения.
8. Какова связь между удельной и молярной теплоемкостью?
9. Почему $C_p > C_V$ для идеального газа?
10. Какой процесс называют адиабатическим? Приведите примеры таких процессов.
11. Чему равна теплоемкость системы при изотермическом и адиабатическом процессах?
12. Как зависит γ от числа степеней свободы i молекул газа?
13. Каков физический смысл R ?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в прил. В. Основные формулы вынесены в прил. Д, табл. 1.

Уровень 1

- 1.1. При изотермическом расширении идеальным газом совершена работа 15 кДж. Какое количество теплоты сообщено газу?
- 1.2. В закрытом баллоне находится газ. При охлаждении его внутренней энергии уменьшилась на 500 кДж. Какое количество теплоты отдал газ? Совершил ли он работу?
- 1.3. Вычислить увеличение внутренней энергии кислорода массой 0,50 кг при изохорном повышении его температуры на 15 °С.
- 1.4. В цилиндре под поршнем находится 1,25 кг воздуха. Для его нагревания на 4 °С при постоянном давлении было затрачено 5 кДж теплоты. Определите изменение внутренней энергии воздуха, молярная масса которого 0,029 кг/моль.
- 1.5. Газ находится в сосуде под давлением $2,5 \cdot 10^4$ Па. При сообщении ему количества теплоты $6,0 \cdot 10^4$ Дж он изобарно расширяется на 2 м^3 . Насколько изменилась внутренняя энергия? Как изменилась его температура?
- 1.6. Какова внутренняя энергия гелия, заполняющего аэростат объемом 50 м^3 при давлении 80 кПа?

1.7. На рис. 19 дан график изменения состояния идеального газа в координатах pV . Представить этот цикл в координатах pT и VT , обозначив соответствующие точки.

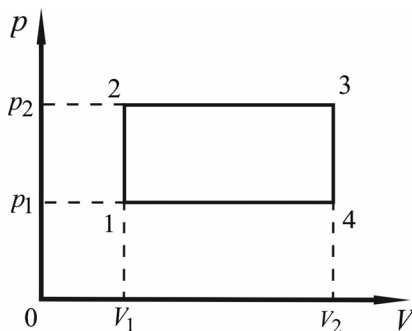


Рис. 19

1.8. Какова внутренняя энергия 10 моль одноатомного газа при температуре $27\text{ }^{\circ}\text{C}$?

1.9. Во фляжке вместимостью 0,5 л находится вода объемом 0,3 л. Турист пьет из нее воду, плотно прижав губы к горлышку так, что во фляжку не поступает наружный воздух. Сколько воды удастся выпить туристу, если он может понизить давление оставшегося во фляжке воздуха до 80 кПа?

1.10. Под каким давлением должна наполняться электролампа инертным газом при температуре $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы при температуре $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление не превышало 0,10 МПа?

Уровень 2

2.1. Газ, занимающий при $T = 400\text{ K}$ и $p = 1,0 \cdot 10^5\text{ Па}$ объем $2,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$, изотермически сжимают до объема V_2 и давления p_2 , затем изобарно охлаждают до $T_3 = 200\text{ K}$, после чего изотермически изменяют объем до значения $1,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$. Найти конечное давление газа.

2.2. Какой объем займет газ при $77\text{ }^{\circ}\text{C}$, если при $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ его объем был 6 л?

2.3. Найти внутреннюю энергию U двухатомного газа, находящегося в сосуде объемом $V = 2$ л под давлением $p = 150$ кПа.

2.4. В закрытом сосуде находится смесь азота ($m_1 = 56$ г) и кислорода ($m_2 = 64$ г). Определить изменение внутренней энергии этой смеси, если ее охладили на 200°C .

2.5. На нагревание массы $m = 40$ г кислорода от температуры $t_1 = 160^\circ\text{C}$ до $t_2 = 400^\circ\text{C}$ затрачено количество теплоты $Q = 623$ Дж. При каких условиях нагревался газ (при постоянном объеме или при постоянном давлении)?

2.6. В сосуде под поршнем находится масса газа $m = 1$ г азота. Какое количество теплоты Q надо затратить, чтобы нагреть азот на $\Delta T = 10$ К? На какую высоту Δh при этом поднимется поршень? Масса поршня $m_{\text{п}} = 1$ кг, площадь его поперечного сечения $S = 10$ см². Давление над поршнем $p = 100$ кПа.

2.7. Кислород при неизменном давлении 80 кПа нагревается. Его объем увеличивается от 1 до 3 м³. Определить изменение внутренней энергии, работу, а также теплоту, сообщенную газу. Построить график процесса в координатах pV .

2.8. Азот массой 5 кг был изобарно нагрет на 150 К. Найти количество теплоты, сообщенное газу, изменение внутренней энергии, совершенную газом работу. Построить график процесса в координатах pV .

2.9. Объем водорода при изотермическом расширении ($T = 300$ К) увеличился в 3 раза. Определить изменение внутренней энергии, работу, совершенную газом, и полученное им количество теплоты. Масса водорода равна 200 г. Построить график процесса в координатах pV .

2.10. Водород массой 40 г, имевший температуру 300 К, адиабатически расширяется, увеличив объем в 3 раза. Определить полную работу, совершенную газом, количество теплоты и изменение внутренней энергии газа. Построить график процесса в координатах pV .

Уровень 3

3.1. Какая часть количества теплоты, подводимой к идеальному газу при изобарическом процессе, расходуется на увеличение внутренней энергии газа и какая часть – на работу, совершаемую газом при расширении, если газ: а) одноатомный; б) двухатомный; в) многоатомный?

3.2. В закрытом сосуде находится масса $m = 14,00$ г азота при давлении $p_1 = 0,10$ МПа и температуре $t_1 = 270$ °С. После нагревания давление в сосуде повысилось в 5 раз. До какой температуры t_2 был нагрет газ? Найти объем сосуда V и количество теплоты Q , сообщенное газу.

3.3. Водород массой 40 г, имевший температуру 300 К, адиабатически расширяется, увеличив объем в 3 раза. Определить полную работу, совершенную газом, количество теплоты и изменение внутренней энергии газа. Построить график процесса в координатах pV .

3.4. Определить количество теплоты, поглощаемой водородом массой 200 г при нагревании его от 0 до 100 °С при постоянном давлении. Найти также изменение внутренней энергии газа и совершаемую им работу. Построить график процесса в координатах pV .

3.5. Во сколько раз увеличится объем водорода, содержащий количество вещества 0,40 моль, при изотермическом расширении, если при этом газ получил 800 Дж теплоты? $T = 300$ К. Найти также работу и изменение внутренней энергии газа. Построить график процесса в координатах pV .

3.6. Кислород массой 160 г нагревают при постоянном давлении от 320 до 340 К. Определить количество теплоты, поглощенное газом, изменение внутренней энергии и работу расширения газа. Построить график процесса в координатах pV .

3.7. Масса $m = 28$ г азота, находящегося при температуре $t_1 = 400$ °С и давлении $p_1 = 10 \cdot 10^{-2}$ МПа, сжимается до объема $V_2 = 13$ л. Найти температуру t_2 и давление p_2 азота после сжатия, если азот сжимается: а) изотермически; б) адиабатически. Найти работу газа в каждом из этих случаев.

3.8. Кислород, занимающий при давлении $p_1 = 1,0$ МПа объем $V_2 = 5$ л, расширяется в $n = 3$ раза. Определить конечное давление и работу, совершенную газом. Рассмотреть следующие процессы: 1) изобарический; 2) изотермический; 3) адиабатический.

3.9. При изотермическом расширении водорода массой 1 г при температуре 70°C объем газа увеличился в три раза. Определить работу расширения, изменение внутренней энергии и количество теплоты, полученной газом. Построить график процесса в координатах pV .

3.10. Пары ртути массой 200 г нагреваются при постоянном давлении. При этом температура возросла на 100 К. Определить увеличение внутренней энергии паров, работу расширения и количество теплоты, полученной ртутью. Молекулы паров ртути одноатомные. Построить график процесса в координатах pV .

3. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ЦИКЛЫ

3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Круговым процессом (или **циклом**) называется процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное состояние. На $p(V)$ диаграмме цикл изображается замкнутой кривой, где участок $1 \rightarrow 2$ соответствует расширению, а $2 \rightarrow 1$ – сжатию газа (рис. 20).

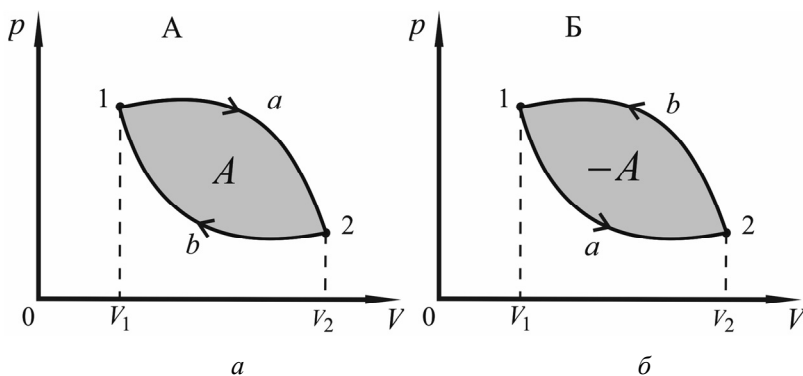


Рис. 20. Круговой процесс

Работа расширения A_1 (площадь фигуры $1a2V_2V_11$) – положительна: $A_1 > 0$.

Работа сжатия A_2 (площадь фигуры $2b1V_1V_22$) – отрицательна: $A_2 < 0$.

Работа за цикл A определяется площадью, охватываемой замкнутой кривой:

$$A = A_1 + A_2$$

Цикл называется **прямым**, если за цикл совершается положительная работа $A = \oint p dV > 0$ (цикл протекает по часовой стрелке – рис. 20, а).

Цикл называется **обратным**, если за цикл совершается отрицательная работа $A = \oint p dV < 0$ (цикл протекает против часовой стрелки – рис. 20, б).

Прямой цикл используется в *тепловых двигателях* (совершают работу за счет полученной извне теплоты). Обратный цикл используется в *холодильных машинах* (за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой).

В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние, следовательно, внутренняя энергия системы не изменяется. Поэтому $\Delta Q = \Delta U + A = A$, т. е. работа, совершаемая за цикл, равна количеству полученной извне теплоты. Если в ходе кругового процесса система не только получает количество теплоты Q_1 , но и теряет (отдает) количество теплоты Q_2 , то $Q = Q_1 - Q_2$.

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса – это величина, равная отношению работы, совершенной системой, к количеству теплоты, полученному в этом цикле системой:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Термодинамический процесс называется **обратимым**, если он может происходить как в *прямом*, так и в *обратном направлении*. Причем если такой процесс происходит сначала в прямом, а затем в обратном направлении и система возвращается в исходное состояние, то в окружающей среде и в этой системе не происходит никаких изменений. Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, является **необратимым**.

Реальные процессы необратимы, в них всегда происходит диссипация энергии (из-за трения, теплопроводности и т. д.).

Тепловой двигатель – это устройство, совершающее работу за счет полученной извне теплоты.

Термостатом называется термодинамическая система, которая может обмениваться теплотой с телами практически без изменения собственной температуры.

Рабочее тело – это тело (газ или пар), совершающее круговой процесс и обменивающееся энергией с другими телами.

Принцип работы теплового двигателя: от термостата с более высокой температурой T_1 , называемого **нагревателем**, за цикл *отнимается* количество теплоты Q_1 , а термостату с более низкой температурой T_2 , называемому **холодильником**, за цикл **передается** количество теплоты Q_2 . При этом рабочее тело расширяется и совершает работу $A = Q_1 - Q_2$ (рис. 21).

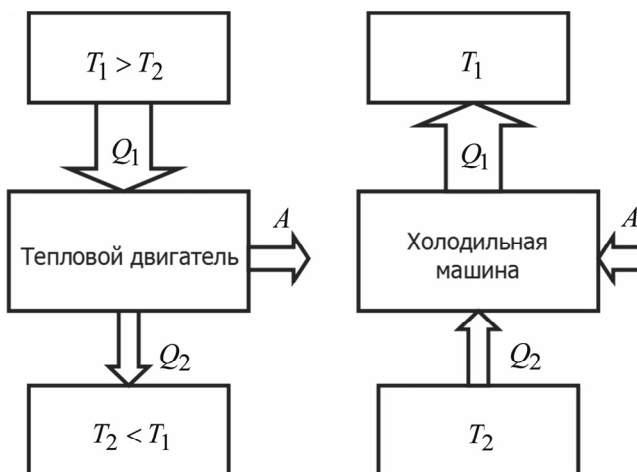


Рис. 21. Принцип работы теплового двигателя

Термический КПД двигателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Процесс, обратный происходящему в тепловом двигателе, *используется в холодильной машине*: от термостата с более низкой температурой T_2 за цикл отнимается количество теплоты Q_2 и отдается термостату с более высокой температурой T_1 . При этом $Q = Q_1 - Q_2 = A$ или $Q_1 = Q_2 + A$.

Количество теплоты Q_1 , отданное системой термостату T_1 , больше количества теплоты Q_2 , полученного от термостата T_2 , на величину работы A , совершенной над системой.

Эффективность холодильной машины характеризует **холодильный коэффициент** η' – отношение отнятого от термостата с более низкой температурой количества теплоты Q_2 к работе A , которая затрачивается на приведение холодильной машины в действие:

$$\eta' = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}.$$

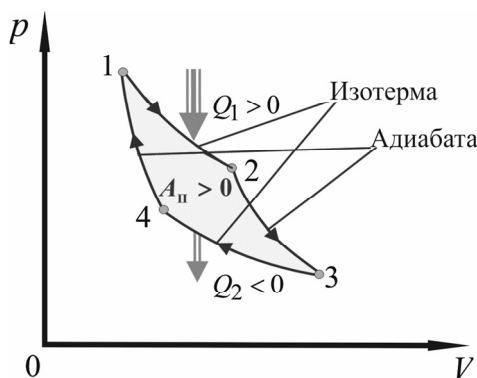


Рис. 22. Цикл Карно

Из всех периодически действующих *тепловых машин*, имеющих *одинаковые* температуры нагревателей T_1 и холодильников T_2 , *наибольшим КПД* обладают *обратимые машины*. При этом КПД обратимых машин равны друг другу и не зависят от природы рабочего тела, а определяются только температурами нагревателя и холодильника.

Цикл Карно состоит из двух изотерм ($1 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 4$), в которых теплота полностью превращается в работу, и двух адиабат ($2 \rightarrow 3, 4 \rightarrow 1$), в которых работа совершается за счет изменения внутренней энергии (рис. 22).

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Двигатель работает по циклу Карно и получает от нагревателя $Q_1 = 700$ Дж теплоты. Температура нагревателя $t_1 = 327^\circ\text{C}$, температура холодильника $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Найти совершаемую за цикл работу и количество теплоты, отдаваемое холодильнику.

Дано:

$$Q_1 = 700 \text{ Дж}$$

$$t_1 = 327^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 27^\circ\text{C}$$

$$A = ?$$

$$Q_2 = ?$$

Решение

Запишем формулу для КПД тепловой машины:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Так как двигатель работает по циклу Карно, то

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Совершаемая газом работа за цикл $A = Q_1 - Q_2$.

Тогда

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}; \quad A = Q_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где

$$T_1 = 273 + 327 = 600 \text{ К}; \quad T_2 = 273 + 27 = 300 \text{ К}.$$

$$A = 700 \frac{600 - 300}{600} = 350 \text{ Дж}.$$

Количество теплоты $Q_2 = Q_1 - A = 700 - 350 = 350$ Дж.

Ответ: $A = Q_2 = 350$ Дж.

Задача 2. Гелий совершает цикл, изображенный на рис. 23. Найти работу A , совершаемую газом за один цикл, количество теплоты, полученное от нагревателя Q_1 и переданное холодильнику Q_2 за цикл, а также КПД цикла, если $p_1 = 200$ кПа, $p_2 = 600$ кПа, $V_1 = 1$ л, $V_2 = 3$ л.

Дано:

$$p_1 = 200 \text{ кПа} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_2 = 600 \text{ кПа} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$V_1 = 1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$A - ?$

$Q_1 - ?$

$Q_2 - ?$

$\eta - ?$

Решение:

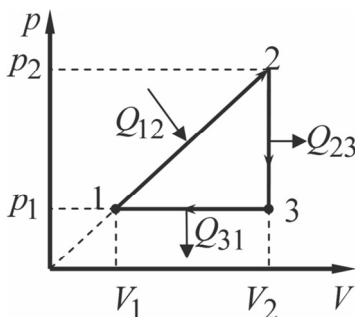


Рис. 23

Заданный цикл изображен в pV координатах, поэтому КПД цикла удобно определять по формуле

$$\eta = \frac{A}{Q_1},$$

где A – совершаемая за цикл работа газа; Q_1 – количество теплоты, получаемое газом за цикл. Совершаемая газом работа может быть определена из $p(V)$ диаграммы – она численно равна площади фигуры, ограниченной циклом:

$$A = \frac{(p_2 - p_1)(V_2 - V_1)}{2}, \quad A = \frac{(6 - 2) \cdot 10^5 \cdot (3 - 1) \cdot 10^{-3}}{2} = 400 \text{ Дж}.$$

Для определения Q_1 рассмотрим каждый участок цикла.

1. $1 \rightarrow 2$ – давление и объем увеличиваются, следовательно, температура тоже увеличивается, система получает тепло: $Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + A_{1-2}$.

Работу, совершаемую газом на этом участке, определим из графика как площадь фигуры под графиком:

$$A_{1-2} = \frac{(p_2 + p_1)(V_2 - V_1)}{2} > 0.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{1-2} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T_{1-2} = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1).$$

Из уравнения состояния

$$\nu R (T_2 - T_1) = p_2 V_2 - p_1 V_1, \quad \Delta U_{1-2} = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) > 0,$$

$$Q_{1-2} = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + \frac{(p_2 + p_1)(V_2 - V_1)}{2} > 0.$$

2. $2 \rightarrow 3$ – изохорический процесс, $V_2 = \text{const}$, давление уменьшается, температура, следовательно, тоже уменьшается, система отдает тепло:

$$Q_{2-3} < 0,$$

так как $A_{2-3} = 0$, то

$$Q_{2-3} = \Delta U_{2-3} + A_{2-3} = \Delta U_{2-3},$$

$$Q_{2-3} = \Delta U_{2-3} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T_{2-3} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2) = \frac{3}{2} V_2 (p_1 - p_2) < 0.$$

3. $3 \rightarrow 1$ – изобарическое сжатие, т. е. $p_1 = \text{const}$, объем уменьшается, следовательно, температура тоже уменьшается, система отдает тепло, $Q_{3-1} < 0$:

$$Q_{3-1} = \Delta U_{3-1} + A_{3-1}.$$

Работу A_{3-1} определим как площадь фигуры под графиком процесса:

$$A_{3-1} = p_1 (V_1 - V_2) < 0.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{3-1} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T_{3-1} = \frac{3}{2} \nu R (T_1 - T_3).$$

Из уравнения состояния

$$\nu R(T_1 - T_3) = p_1 V_1 - p_1 V_2 = p_1 (V_1 - V_2);$$

$$\Delta U_{3-1} = \frac{3}{2} p_1 (V_1 - V_2) < 0;$$

$$Q_{3-1} = \frac{3}{2} p_1 (V_1 - V_2) + p_1 (V_1 - V_2) = \frac{5}{2} p_1 (V_1 - V_2).$$

Указываем на рисунке стрелками полученные или отданные рабочим телом количества теплоты на каждом участке цикла.

Тогда количество теплоты, получаемое газом за цикл,

$$Q_1 = Q_{1-2} = \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + \frac{(p_2 + p_1)(V_2 - V_1)}{2},$$

$$Q_1 = \frac{3}{2} (6 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}) + \\ + \frac{(6 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^5)(3 \cdot 10^{-3} - 10^{-3})}{2} = 3200 \text{ Дж.}$$

Количество теплоты, отдаваемое газом за цикл,

$$Q_2 = |Q_{2-3}| + |Q_{3-1}| = \left| \frac{3}{2} V_2 (p_1 - p_2) \right| + \left| \frac{5}{2} p_1 (V_1 - V_2) \right|,$$

$$Q_2 = \left| \frac{3}{2} 3 \cdot 10^{-3} (2 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^5) \right| + \left| \frac{5}{2} 2 \cdot 10^5 (3 - 1) 10^{-3} \right| = 2800 \text{ Дж.}$$

$$\text{КПД цикла } \eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{400}{3200} 100 \% = 0,125 \cdot 100 \% = 12,5 \%$$

или

$$\eta = \frac{A}{Q_2 + A} = \frac{400}{2800 + 400} 100 \% = 0,125 \cdot 100 \% = 12,5 \%,$$

или

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = \left(1 - \frac{2800}{3200}\right) 100\% = 0,125 \cdot 100\% = 12,5\%.$$

Ответ: $A = 400$ Дж; $Q_1 = 3200$ Дж; $Q_2 = 2800$ Дж; $\eta = 12,5\%$.

Задача 3. Какую работу A совершают внешние силы в идеальной холодильной машине, работающей по обратному циклу Карно, чтобы отнять у холодильника, температура которого $t_x = -10^\circ\text{C}$, $Q_x = 100$ кДж теплоты? Температура окружающей среды $t_n = 10^\circ\text{C}$.

Дано:

$$t_x = -10^\circ\text{C}$$

$$Q_x = 100 \text{ кДж}$$

$$t_n = 10^\circ\text{C}$$

$$A = ?$$

Решение

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = Q_x / A,$$

где Q_x – количество теплоты, отдаваемое за цикл; A – совершаемая работа.

С другой стороны, для идеальной холодильной машины

$$\varepsilon = T_2 / (T_1 - T_2),$$

где T_1 – температура теплоотдатчика, T_2 – температура теплоприемника. В нашем случае $T_1 = 273 + 10 = 283$ К, $T_2 = 273 - 10 = 263$ К:

$$\frac{Q_x}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \Rightarrow A = \frac{Q_x (T_1 - T_2)}{T_2}.$$

Подставляем данные:

$$A = \frac{100(283 - 263)}{263} = 7,6 \text{ кДж}.$$

Ответ: $A = 7,6$ кДж.

3.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ КПД ЦИКЛОВ

1. Построить цикл в координатах pV , если он не изображен в условиях задачи.

2. Выбрать обозначения параметров состояния рабочего тела, задавая их в каком-либо одном состоянии (обычно в том, где они минимальны, обозначив, например, p_0 , V_0) и определить через них параметры всех других состояний (используя уравнение состояния идеального газа, уравнения процессов и условия задачи).

3. Определить количество теплоты на каждом участке цикла с соответствующим знаком, применяя известные термодинамические формулы изменения внутренней энергии, работы, первого начала термодинамики (работу на каждом участке и во всем цикле удобно определять по площади соответствующих фигур на графике).

4. Символически изобразить стрелками полученные или отданные рабочим телом количества теплоты на каждом участке цикла.

5. Вычислить сумму положительных количеств теплоты $Q_1 = \sum Q_{\text{полученных}}$ и модуль суммы отрицательных количеств теплоты $Q_2 = \left| \sum Q_{\text{отданных}} \right|$.

6. Определить КПД цикла по формуле $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$.

7. Для проверки ответа вычислить работу на каждом участке цикла (**с соответствующим знаком!**) и просуммировать все работы $A = \sum A_i$, определив таким образом работу за цикл; найти КПД цикла по формуле $\eta = \frac{A}{Q_1}$ и сравнить с ранее полученным результатом.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое круговой процесс, термодинамический цикл?
2. Что называется тепловым двигателем, холодильной машиной?
3. Как графически (в координатах $p(V)$) определить работу, затраченную на сжатие или расширение рабочего тела, и работу цикла теплового двигателя?
4. Напишите выражение первого начала термодинамики для цикла.

5. Как определяется коэффициент полезного действия теплового двигателя?
6. Как определяется коэффициент полезного действия цикла Карно?
7. Что такое холодильный коэффициент?
8. Что собой представляет цикл Карно?
9. В чем особенность теплового двигателя, работающего по циклу Карно?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в прил. В. Основные формулы вынесены в прил. Д, табл. 1.

Уровень 1

1.1. КПД теплового двигателя 25 %. Во сколько раз количество теплоты, полученное от нагревателя, больше совершенной им полезной работы?

1.2. Температура нагревателя идеального теплового двигателя $t_1 = 127^\circ\text{C}$, а температура холодильника $t_2 = 7^\circ\text{C}$. Ежесекундно двигатель получает от нагревателя $60,0 \cdot 10^3$ Дж теплоты. Чему равна мощность этого двигателя?

1.3. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно; 80 % тепла, получаемого от нагревателя в процессе работы, передается холодильнику. За один цикл от нагревателя машина получает 5 кДж теплоты. Найти КПД цикла и полезную работу, совершаемую за один цикл.

1.4. Совершая цикл Карно, газ отдал холодильнику $2/3$ теплоты, полученной от нагревателя. Определить температуру холодильника, если температура нагревателя 327°C .

1.5. Совершая цикл Карно, газ отдал холодильнику 2 кДж теплоты. Работа цикла 1 кДж. Определить температуру холодильника, если температура нагревателя 727°C .

1.6. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в три раза выше температуры T_2 холодильника. Нагреватель

передал газу количество теплоты $Q_1 = 42 \text{ кДж}$. Какую работу A совершил газ?

1.7. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в четыре раза выше температуры T_2 холодильника. Какую долю ω количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает холодильнику?

1.8. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, получив от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 4,2 \text{ кДж}$, совершил работу $A = 590 \text{ Дж}$. Найти термический КПД η этого цикла. Во сколько раз температура T_1 нагревателя больше температуры T_2 холодильника?

1.9. Температура нагревателя тепловой машины 500 К . Температура холодильника 300 К . Определить КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно и полную мощность машины, если нагреватель ежесекундно подает ей 1500 Дж теплоты.

1.10. В цикле Карно газ получил от нагревателя теплоту $Q_1 = 500 \text{ Дж}$ и совершил работу $A = 100 \text{ Дж}$. Температура нагревателя $T_1 = 400 \text{ К}$. Определить температуру T_2 холодильника.

Уровень 2

2.1. КПД тепловой машины 75% . Чему он будет равен, если температуру нагревателя увеличить в 2 раза, а температуру холодильника понизить в 1,5 раза?

2.2. В идеальном тепловом двигателе за счет каждого килоджоуля энергии, полученной от нагревателя, совершается работа $0,3 \text{ кДж}$. Определить температуру нагревателя, если температура холодильника 7°C .

2.3. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_2 холодильника равна 290 К . Во сколько раз увеличится КПД цикла, если температура нагревателя повысится от $T'_1 = 400 \text{ К}$ до $T''_1 = 600 \text{ К}$?

2.4. Наименьший объем V_1 газа, совершающего цикл Карно, равен 153 л . Определить наибольший объем V_3 , если объем V_2 в конце

изотермического расширения и объем V_4 в конце изотермического сжатия равны соответственно 600 и 189 л.

2.5. Во сколько раз максимально возможный коэффициент полезного действия двигателя внутреннего сгорания выше, чем максимально возможный КПД паровой машины, работающей на перегретом паре при температуре $t_1 = 300^\circ\text{C}$, если температура газов в цилиндре двигателя достигает $t_1 = 1000^\circ\text{C}$? Отработанные газ и пар имеют одинаковую температуру $t_1 = 220^\circ\text{C}$.

2.6. Температура нагревателя тепловой машины, работающей по циклу Карно, 197°C , а холодильника 17°C . Определить термический КПД машины. На сколько нужно повысить температуру нагревателя, чтобы увеличить КПД машины в 2 раза (при неизменной температуре холодильника)?

2.7. При увеличении температуры нагревателя на 300°C КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно, увеличился в 2 раза. Определить начальную температуру, если температура холодильника 70°C .

2.8. Холодильник идеального теплового двигателя имеет температуру 27°C . На сколько процентов изменится КПД этого двигателя, если температуру нагревателя увеличить от 127 до 327°C ?

2.9. Один моль идеального одноатомного газа совершает циклический процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ (рис. 24), так, что отношение $Q_{12}/Q_{23} = 1,08$. Определить работу, совершаемую газом за цикл.

2.10. Тепловая машина работает по циклу Карно, КПД которого 0,4. Каким будет КПД этой машины, если она совершит тот же цикл в обратном направлении?

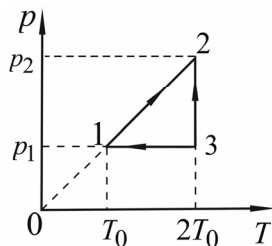


Рис. 24

Уровень 3

3.1. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно, КПД цикла 25 %. Во сколько раз нужно увеличить температуру нагревателя, чтобы КПД машины стал равен 75 %, если температуру холодильника при этом уменьшают в 1,5 раза?

3.2. Найти КПД тепловой машины работающей по циклу, изображенному на рис. 25.

3.3. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. Наименьший объем $V_{\min} = 10$ л, наибольший $V_{\max} = 20$ л, наименьшее давление $p_{\min} = 246$ кПа, наибольшее $p_{\max} = 410$ кПа. Построить график цикла. Определить температуру T газа для характерных точек цикла и его термический КПД η .

3.4. Идеальный многоатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар, причем наибольшее давление газа в два раза больше наименьшего, а наибольший объем в четыре раза больше наименьшего. Определить термический КПД η цикла.

3.5. Идеальный одноатомный газ, занимающий объем $V_1 = 2$ л, подвергали адиабатному расширению, в результате которого его объем возрос в 5 раз. После этого газ подвергли изобарному сжатию до первоначального объема, а затем он в результате изохорного нагревания был возвращен в первоначальное состояние. Построить график цикла и определить термический КПД цикла.

3.6. Найти работу, которую совершают ν молей гелия в цикле, состоящем из адиабатического расширения $1 \rightarrow 2$, изобары $2 \rightarrow 3$ и изохоры $3 \rightarrow 1$. В адиабатическом процессе разность максимальной и минимальной температуры газа равна ΔT . В изобарическом процессе от газа отвели количество тепла Q ($Q > 0$).

3.7. Тепловая машина работает по циклу (рис. 26), состоящему из изохоры $2 \rightarrow 3$, изобары $3 \rightarrow 1$ и процесса $1 \rightarrow 2$, при котором давление газа и объем связаны соотношением $p = \alpha V$, где α – постоянная величина. Найти КПД тепловой машины, если в качестве рабочего тела в ней используется одноатомный идеальный газ. Отношение максимальной температуры в цикле к минимальной равно 4.

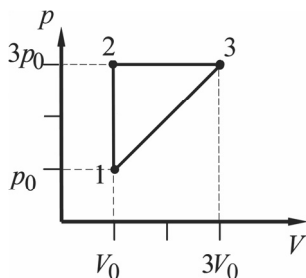


Рис. 25

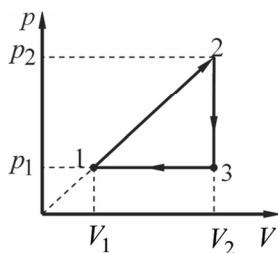


Рис. 26

3.8. Известно, что КПД η_1 цикла $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ и КПД η_2 цикла $3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ (рис. 27) связаны соотношением $\eta_2 = 0,75\% \eta_1$. Найти, во сколько раз давление в изобарическом процессе $2 \rightarrow 4$ превышает давление в изобарическом процессе $3 \rightarrow 1$. Рабочее тело – идеальный одноатомный газ.

3.9. Какую работу совершают два моля идеального одноатомного газа в цикле $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ (рис. 28), изображенном на рисунке, если $p_0 = 100$ кПа, $T_0 = 400$ К? Определить КПД такого цикла.

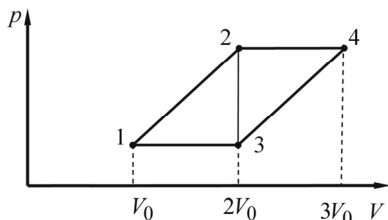


Рис. 27

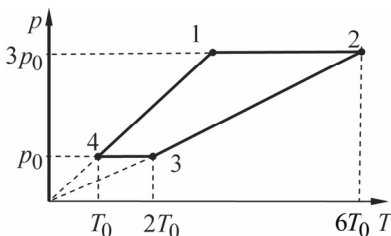


Рис. 28

3.10. Работающая по обратному циклу Карно холодильная машина, передавая тепло от холодильника кипятильнику, превратила в кипятильнике в пар $m_1 = 1$ кг воды. Вначале в кипятильнике и холодильнике находилась вода при температурах соответственно $t_1 = 100$ °С и $t_2 = 0$ °С. Какая масса m_2 воды заморозилась при этом в морозильнике? Удельная теплота плавления льда $\lambda = 335$ кДж/кг, удельная теплота парообразования воды $r = 2,26$ МДж/кг.

4. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Если несколько тел с различными температурами привести в соприкосновение, то между ними произойдет теплообмен, который приведет к выравниванию температуры тел.

Уравнение теплового баланса: по закону сохранения энергии, если тела не совершают работу, то количество теплоты, отданное более нагретым телам, равно количеству теплоты, полученному менее нагретыми телами:

$$Q_1 = Q_2.$$

При сгорании топлива выделяется тепловая энергия

$$Q = qm,$$

где q – удельная теплота сгорания топлива; m – масса сгоревшего топлива.

Удельная теплота сгорания топлива q – это величина, численно равная количеству теплоты, выделяющейся при сгорании единицы массы вещества топлива:

$$q = \frac{Q}{m}, \quad [q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Плавлением называют процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое. Фазовый переход из твердой фазы в жидкую

(и наоборот) сопровождается поглощением (выделением) определенной теплоты плавления Q .

Удельная теплота плавления и отвердевания λ представляет собой количество теплоты, необходимое для превращения единицы массы вещества из твердого состояния в жидкое при температуре плавления и постоянном давлении:

$$\lambda = \frac{Q}{m}, [\lambda] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Точкой (или **температурой плавления**) называется температура, при которой плавится (или отвердевает) кристаллическое тело при постоянном давлении.

Температура плавления существует только у *кристаллических* тел (имеющих кристаллическую решетку). Аморфные тела (стекло, воск, парафин) не имеют определенной точки плавления.

Парообразование – процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное. Фазовый переход из жидкого состояния в газообразное (и наоборот) сопровождается поглощением (выделением) определенной теплоты парообразования:

$$Q = rm,$$

где r – удельная теплота парообразования и конденсации.

Удельная теплота парообразования и конденсации (r или L) – это величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для превращения единицы массы жидкости в пар при температуре кипения:

$$r = \frac{Q}{m}, [r] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Точка или температура кипения – температура кипения жидкости при постоянном давлении. При увеличении внешнего давления температура кипения повышается, при уменьшении – понижается.

Парообразование может происходить двумя путями: *испарением* и *кипением*.

Испарение – процесс парообразования, происходящий с открытой поверхности жидкости при любой температуре.

Кипение – процесс парообразования, происходящий одновременно внутри и на поверхности жидкости при температуре кипения.

Сублимацией называется процесс прямого перехода вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу. Процесс, обратный сублимации, называется **десублимацией**.

Теплота сублимации равна сумме теплот плавления и парообразования.

При испарении жидкости идет двойной процесс: переход молекул жидкости в пространство над ее поверхностью и обратный.

Насыщенный пар – это пар, находящийся в состоянии **динамического равновесия** со своей жидкостью, т. е. число испарившихся молекул равно числу конденсирующихся (возвращающихся в жидкость) молекул. При меньшей концентрации – пар ненасыщенный.

Давление, при котором пар становится насыщенным, называется **давлением насыщенного пара** и зависит от температуры.

Влажность

В атмосфере воздуха всегда присутствует некоторое количество водяного пара. Содержание водяного пара в атмосфере называется **влажностью** воздуха. Влажность бывает абсолютная и относительная.

Абсолютная влажность воздуха – величина, равная отношению массы водяного пара к единице объема воздуха при данной температуре:

$$\rho_A = \frac{m}{V}.$$

Относительная влажность – отношение *парциального давления* паров воды в газе к равновесному давлению *насыщенных паров* при данной температуре. Также под относительной влажностью понимают отношение абсолютной влажности воздуха к максимально возможной. Если ρ_A – плотность и p_A – парциальное давление водяного пара при данной температуре, ρ_H – плотность и p_H – давление насыщенного пара при той же температуре, то *относительная влажность* может быть рассчитана как

$$\varphi = \frac{p_A}{p_H} 100 \% \approx \frac{\rho_A}{\rho_H} 100 \% [\varphi] = \% .$$

Температура, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называется **точкой росы**. Абсолютная влажность воздуха равна влажности насыщенного пара при температуре, равной точке росы.

Капиллярные явления

Силы поверхностного натяжения – результирующие силы, действующие на молекулы поверхностного слоя жидкости на границе раздела жидкости и другой среды (например, воздуха) в результате взаимодействия молекул жидкости между собой и взаимодействия молекул жидкости с молекулами другой среды.

Коэффициент поверхностного натяжения можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{F_n}{l}, [d] = \frac{\text{Н}}{\text{м}},$$

где F_n – сила поверхностного натяжения; l – длина контура поверхности жидкости, на которую действует эта сила. Также коэффициент поверхностного натяжения можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{W}{S},$$

где W – потенциальная энергия поверхностного слоя; S – площадь поверхностного слоя.

Изогнутый поверхностный слой оказывает на жидкость избыточное давление по сравнению с тем, которое бы испытывала жидкость с плоским поверхностным слоем. Выпуклый поверхностный слой давит на нижележащие слои жидкости, вогнутый – растягивает. **Капиллярное давление** (закон капиллярного давления Лапласа для сферической поверхности радиуса R), т. е. избыточное давление, оказываемое на жидкость со стороны сферической поверхности радиусом R , равно

$$p_{\text{и}} = \pm \frac{2\sigma}{R},$$

где знак «+» – для выпуклого мениска, знак «–» – для вогнутого мениска.

В узких трубках (капиллярах) вследствие смачивания или несмачивания жидкостью стенок сосуда кривизна поверхности жидкости (мениск) становится значительной. Избыточное давление вызывает заметное поднятие или опускание уровня жидкости. **Высота подъема жидкости в капиллярной трубке**

$$h = \frac{2\pi \cos \theta}{R\rho g},$$

где θ – *краевой угол* ($\theta = 0$ при полном смачивании стенок трубки жидкостью, $\theta = \pi$ при полном несмачивании); R – радиус трубки; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. В колбе находится вода при температуре 0°C . Выкачивая из колбы воздух и пары воды, воду замораживают посредством ее испарения. Какая часть воды, бывшей первоначально в колбе (%), при этом испарилась, если притока тепла извне не было? Удельная теплота испарения воды равна $2,4 \cdot 10^6$ Дж/кг, удельная теплота плавления льда равна $3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Дано:

$$t = 0^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$$

$$r = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$\frac{m_2}{m} (\%) - ?$$

Решение

Необходимое для образования пара количество теплоты может быть получено только за счет теплоты отвердевания (плавления), которая освобождается при замерзании воды.

При замерзании m_1 воды выделяется

$$\Delta Q = \lambda m_1.$$

За счет этого количества теплоты образуется количество пара, равное m_2 :

$$\lambda m_1 = r m_2.$$

Масса всей воды до откачивания $m = m_1 + m_2$, тогда

$$\lambda(m - m_2) = rm \Rightarrow \frac{m_2}{m} = \frac{\lambda}{\lambda + r} = \frac{3,3 \cdot 10^5}{10^5(3,3 + 2,4)} = 0,12;$$

$$\frac{m_2}{m} (\%) = 0,12 \cdot 100 \% = 12 \%.$$

Ответ: $\frac{m_2}{m} (\%) = 12 \%$.

Задача 2. В комнате объемом 40 м^3 температура воздуха 20°C , его относительная влажность $\varphi_1 = 20 \%$. Сколько надо испарить воды, чтобы относительная влажность достигла 50% ? Известно, что при температуре 20°C давление насыщенных паров $p_{\text{н}} = 2,3 \text{ КПа}$.

Дано:

$$V = 40 \text{ м}^3$$

$$t = 20^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 20 \%$$

$$\varphi_2 = 50 \%$$

$$p_{\text{н}} = 2300 \text{ Па}$$

$$m - ?$$

Решение

Относительную влажность можно определить по формуле:

$$\varphi = \frac{p_A}{p_{\text{н}}} 100 \%, \text{ откуда } \varphi_1 = \frac{p_{A1}}{p_{\text{н}}} 100 \%$$

$$\text{и } \varphi_2 = \frac{p_{A2}}{p_{\text{н}}} 100 \%.$$

Давление пара при относительных влажностях φ_1 и φ_2

$$p_{A1} = \frac{\varphi_1 p_{\text{н}}}{100 \%} \text{ и } p_{A2} = \frac{\varphi_2 p_{\text{н}}}{100 \%}.$$

Плотность связана с давлением равенством

$$\rho = \frac{Mp}{RT},$$

$$\text{откуда } \rho_1 = \frac{Mp_{A1}}{RT} \text{ и } \rho_2 = \frac{Mp_{A2}}{RT}.$$

Массы воды в комнате при влажности φ_1 и φ_2 :

$$m_1 = \rho_1 V = \frac{Mp_{A1}V}{RT} \text{ и } m_2 = \rho_2 V = \frac{Mp_{A2}V}{RT}.$$

Масса воды, которую надо испарить:

$$m = m_2 - m_1 = \frac{MV}{RT}(p_{A2} - p_{A1}) = \frac{Mp_{\text{н}}V}{RT100\%}(\varphi_2 - \varphi_1) =$$

$$= \frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot 2300 \cdot 40}{8,31 \cdot 273 \cdot 100}(50 - 20) = 0,22 \text{ кг.}$$

Ответ: $m = 0,22$ кг.

Задача 3. Тонкое алюминиевое кольцо радиусом 7,8 см соприкасается с мыльным раствором. Каким усилием можно оторвать кольцо от раствора? Температуру раствора считать комнатной. Масса кольца 7 г.

Дано:

$$R = 7,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$F - ?$$

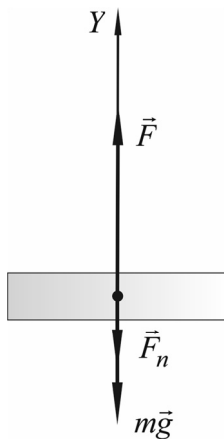


Рис. 29

Решение

На кольцо действуют: сила тяжести $m\vec{g}$, сила поверхностного натяжения $\vec{F}_n$, внешняя сила $\vec{F}$. Изобразим эти силы на рис. 29.

Поскольку кольцо соприкасается с раствором и наружной и внутренней сторонами, то сила поверхностного натяжения равна

$$F_n = 2\sigma l,$$

где $l = 2\pi R$.

Условие отрыва кольца от раствора, записанное в скалярной форме относительно выбранного направления оси Y , имеет вид

$$F = mg + F_n \text{ или } F = mg + 2\sigma l = mg + 4\pi\sigma R.$$

Тогда

$$F = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 + 4 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 7,8 \cdot 10^{-2} = 0,11 \text{ Н.}$$

Ответ: $F = 0,11 \text{ Н.}$

Задача 4. Какая энергия высвобождается при слиянии мелких водяных капель радиусом $2,0 \cdot 10^{-3}$ мм в одну каплю радиусом 2 мм?

Дано:	Решение
$r = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$	Изменение потенциальной энергии поверхностного слоя капель, вызванное уменьшением площади ΔS поверхности капель при их слиянии в одну каплю, равно
$R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	
$W - ?$	
	$\Delta W = \sigma \Delta S = \sigma(S_1 - S_2),$

где S_1 – площадь поверхности всех малых капель; S_2 – площадь поверхности большой капли; σ – поверхностное натяжение воды.

Для замкнутой системы тел применяем законы сохранения полной механической энергии и импульса.

Очевидно, что $S_1 = 4\pi r^2 n$ и $S_2 = 4\pi R^2$. Здесь $nm = M$, где n – число мелких капель, M – масса большой капли.

Поскольку

$$m = \rho V_1 = \frac{4}{3}\rho\pi r^3 \text{ и } M = \rho V_2 = \frac{4}{3}\rho\pi R^3, \text{ то } \frac{4}{3}n\pi r^3 = \frac{4}{3}\rho\pi R^3,$$

откуда $n = \frac{R^3}{r^3}$. Следовательно, площадь поверхности всех мелких капель $S_1 = 4\pi r^2 R^3 / r^3 = 4\pi R^3 / r$. Подставляя выражения для S_1 и S_2 , находим

$$\Delta W = \sigma \left(\frac{4\pi R^3}{r} - 4\pi R^2 \right) = 4\pi R^2 \sigma \left(\frac{R}{r} - 1 \right),$$

$$\Delta W = 4 \cdot 3,14 (2 \cdot 10^{-3})^2 7,4 \cdot 10^{-2} ((2 \cdot 10^{-3}) / (2 \cdot 10^{-6}) - 1) = 3,5 \text{ мДж}.$$

Ответ: $W = 3,5 \text{ мДж}$.

4.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Алгоритм решения задач на применение уравнения теплового баланса

1. Убедиться, что система взаимодействующих тел замкнута.
2. Определить границы фазовых переходов.
3. Определить агрегатное состояние вещества.
4. Записать уравнение теплового баланса. При составлении уравнения теплового баланса удобно пользоваться температурой θ , установившейся в результате теплообмена.
5. Проверить размерность и выполнить расчет.

Алгоритм решения задач на определение влажности, насыщенный и ненасыщенный пар

1. Определить начальные условия (температуру, давление и т. д.).
2. Записать формулы для определения относительной и абсолютной влажности воздуха.
3. При определении процесса, при котором происходит изменение термодинамических параметров, необходимо применять первый закон термодинамики именно для этого процесса.
4. Выразить необходимые величины через заданные параметры, используя необходимые законы термодинамики.
5. Проверить размерность и выполнить расчет.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение удельной теплоты сгорания топлива. В каких единицах она измеряется?
2. Запишите уравнение теплового баланса.
3. Что такое фаза и фазовый переход?
4. Какой процесс называется плавлением? Что такое удельная теплота плавления и отвердевания?
5. Какие аморфные тела вы знаете?
6. Что такое парообразование и удельная теплота парообразования? В каких единицах она измеряется?
7. Что такое кипение и испарение? В чем разница между данными процессами?
8. Что такое сублимация и десублимация?
9. Чем отличаются насыщенный и ненасыщенный пар?
10. Что такое относительная и абсолютная влажность?
11. Как определяется коэффициент поверхностного натяжения?
12. Как определить высоту подъема жидкости в капиллярной трубке?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в прил. В. Основные формулы вынесены в прил. Д, табл. 1.

Уровень 1

1.1. Определить количество теплоты, которое сообщено 2 кг гелия при постоянном объеме, если его температура повысилась на 100 К.

1.2. Сколько нужно сжечь керосина, чтобы полностью испарить 0,1 кг воды, температура которой 20 °С? КПД керосинового нагревателя $\eta = 0,20$.

1.3. В калориметр, содержащий 500 г воды при температуре 20 °С, кладут кусок льда при температуре 0 °С. Какая наименьшая масса льда нужна для того, чтобы температура содержимого калориметра стала равной 0 °С?

1.4. В алюминиевый калориметр массой 140 г налили 250 г воды при температуре 15 °С. После того как брусок из свинца массой 100 г, нагретый до 100 °С, поместили в калориметр с водой, там установи-

лась температура $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Составить уравнение теплового баланса и определить удельную теплоемкость свинца.

1.5. Сколько воды нужно испарить в комнате объемом 5000 м^3 , в которой относительная влажность воздуха при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равна 60% , чтобы эта влажность увеличилась до 70% ?

1.6. В объеме 1 м^3 воздуха при нормальных условиях содержится влага массой $2,4\text{ г}$. Какую долю и какой процент составляет это количество по сравнению с тем количеством влаги, которое содержал бы этот же воздух в объеме 1 м^3 , если бы пар был насыщенным?

1.7. Человек чувствует себя комфортно при относительной влажности, равной $40\ldots 60\%$. Почему может возникнуть ощущение изнурительной жары при температуре воздуха $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $80\ldots 90\%$, в то время как при температуре $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности 30% самочувствие может быть хорошим?

1.8. В закрытом сосуде находится воздух при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $3,5\%$. Какой станет относительная влажность воздуха, если сосуд охладить до температуры $29\text{ }^{\circ}\text{C}$? Давление насыщенного пара при $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ равно 30 мм рт. ст.

1.9. Определить толщину слоя жидкости, разлитой на горизонтальной плоскости. Краевой угол θ , плотность жидкости ρ , поверхностное натяжение σ .

1.10. Радиус кривизны капли в верхней ее точке R . Чему равна масса капли, если ее высота h , а радиус соприкосновения капли с горизонтальной плоскостью, на которой она находится, равен r ? Плотность жидкости ρ , поверхностное натяжение σ , поверхность не смачивается жидкостью.

Уровень 2

2.1.64 маленькие капельки ртути сливаются в одну каплю. На сколько градусов повысится температура большой капли по сравнению с температурой маленьких капель? Радиус каждой маленькой капельки 1 мм .

2.2. Сколько нужно смешать горячей воды, имеющей температуру $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, и холодной, имеющей температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы получить 60 кг воды с температурой $40\text{ }^{\circ}\text{C}$?

2.3. Какое количество воды может испариться в помещении размером $10 \times 8,0 \times 4,5 \text{ м}^3$, если температура воздуха 22°С , а относительная влажность 70% ? Плотность насыщенного пара при 22°С равна $19,4 \text{ г/м}^3$.

2.4. В медный калориметр массой $m = 0,2 \text{ кг}$ со льдом массой $m_1 = 1,5 \text{ кг}$, имеющим температуру $T_{m1} = 270 \text{ К}$, пустили пар при температуре $T_p = 390 \text{ К}$, после чего в калориметре установилась температура $\theta = 320 \text{ К}$. Определить массу пара. Считать систему лед–калориметр–пар изолированной.

2.5. В воду массой 100 г , имеющей температуру 20°С , помещают цилиндр массой 300 г , нагретый до температуры 80°С . Температура воды и цилиндра стала равной 32°С . Определить удельную теплоемкость цилиндра.

2.6. В латунный калориметр массой 200 г с водой массой 400 г при температуре 17°С опустили тело из серебра массой 600 г при 85°С . Вода нагрелась до 22°С . Определить удельную теплоемкость серебра.

2.7. Капилляр с внутренним радиусом $r = 2 \text{ мм}$ опущен в жидкость. Найти поверхностное натяжение жидкости, если известно, что в капилляр поднялась масса жидкости $m = 90 \cdot 10^{-3} \text{ г}$.

2.8. При определении силы поверхностного натяжения капельным методом число капель глицерина, вытекающего из капилляра, составляет $n = 50$. Общая масса глицерина $m = 1 \text{ г}$, а диаметр шейки капли в момент отрыва $d = 1 \text{ мм}$. Определить поверхностное натяжение глицерина.

2.9. Какую силу F необходимо приложить к горизонтальному алюминиевому кольцу высотой $h = 10 \text{ мм}$, внутренним диаметром $d_1 = 50 \text{ мм}$ и внешним диаметром $d_2 = 52 \text{ мм}$, чтобы оторвать его от поверхности воды? Какую часть найденной силы составляет сила поверхностного натяжения?

2.10. Вертикальный капилляр длиной l с запаянным верхним концом привели в соприкосновение с поверхностью жидкости, после

чего она поднялась на высоту h . Плотность жидкости ρ , диаметр внутреннего канала капилляра d , атмосферное давление p_0 . Найти коэффициент поверхностного натяжения жидкости, считая смачивание полным.

Уровень 3

3.1. В стальной сосуд массой 300 г налили 1,5 л воды при 17 °С. В воду опустили кусок мокрого снега массой 200 г. Когда снег растаял, установилась температура 7 °С. Сколько воды было в комке снега?

3.2. В термостат, содержащий 2 кг воды и 0,5 кг льда при температуре 0 °С, добавили 1 кг воды с температурой 60 °С. Определить установившуюся температуру.

3.3. В сосуде находится воздух, температура которого $T = 10$ °С, а влажность $B = 60$ %. Как изменится влажность воздуха, если нагреть его до 100 °С и в три раза уменьшить объем?

3.4. Масса кубического метра влажного воздуха при относительной влажности 60 %, температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении равна 1,2 кг. Определить давление насыщенного водяного пара при температуре 20 °С.

3.5. Спирт по каплям вытекает из сосуда через вертикальную трубку внутренним диаметром $d = 2$ мм. Капли отрываются через время $\Delta t = 1$ с одна после другой. Через какое время вытечет масса $m = 10$ г спирта? Диаметр шейки капли в момент отрыва считать равным внутреннему диаметру трубки.

3.6. С помощью пипетки отмерили 15 капель минерального масла. Их масса оказалась равной 1,8 г. Определить диаметр шейки пипетки, если коэффициент поверхностного натяжения минерального масла 10 Н/м.

3.7. В двух капиллярных трубках разного диаметра, опущенных в воду, установилась разность уровней $\Delta h_1 = 2,6$ см. При опускании этих же трубок в спирт разность уровней оказалась $\Delta h_2 = 1$ см. Зная коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma_1 = 73$ мН/м, найти коэффициент поверхностного натяжения спирта σ_2 .

3.8. Капля ртути массой $m = 2$ г введена между параллельными стеклянными пластинами. Какую силу следует приложить, чтобы расплющить каплю до толщины $d = 0,1$ мм? Считать, что ртуть не смачивает стекло.

3.9. Кольцо внутренним диаметром $d_1 = 25$ мм и внешним диаметром $d_2 = 26$ мм подвешено на пружине и соприкасается с поверхностью жидкости. Жесткость пружины $k = 9,8 \cdot 10^{-1}$ Н/м. При опускании поверхности жидкости кольцо оторвалось от нее при растяжении пружины на $\Delta l = 5,3$ мм. Найти поверхностное натяжение жидкости.

3.10. Между двумя горизонтальными плоскопараллельными стеклянными пластинками помещена масса $m = 5$ г ртути. Когда на верхнюю пластинку положили груз массой $M = 5$ кг, расстояние между пластинками стало равным $d = 0,087$ мм. Пренебрегая массой пластинки по сравнению с массой груза, найти поверхностное натяжение ртути. Несмачивание считать полным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Петров Н.Ю.* Физика. Вводный курс. Механика: учеб. пособие / Н.Ю. Петров, Е.И. Кренева, М.Р. Мирсияпов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 168 с.
2. *Горлов Б.Б.* Физика. Теория, задачи, тесты: учеб. пособие для поступающих в вузы, перераб. и доп. / Б.Б. Горлов, А.В. Баранов, Г.Е. Невская. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 280 с.
3. Большой энциклопедический словарь. Физика / гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1998. – 944 с.
4. Compendium of Chemical Terminology Gold Book / International Union of Pure and Applied Chemistry, 2014. – 1622 p.
5. *Татевский В.М.* Квантовая механика и теория строения молекул / В.М. Татевский. – М.: Изд-во МГУ, 1965. – 162 с.
6. *Глинка Н.Л.* Общая химия: учебное пособие для вузов / под ред. А.И. Ермакова. – изд. 30-е, исправленное – М.: Интеграл-Пресс, 2003. – 728 с.
7. *Окунь Л.Б.* Масса // Физическая энциклопедия / гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1992. – Т. 3. – 672 с.
8. On the possible future revision of the International System of Units, the SI Resolution 1 of the 24th meeting of CGPM (2011): <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/>.
9. Физическая энциклопедия / гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая российская энциклопедия, 1998. – Т. 5. – 760 с.
10. *Давыдков В.В.* Курс общей физики для студентов ИДО. Часть 1: учеб. пособие / В.В. Давыдков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 88 с.
11. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 5 т. Том 3. Молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие. / И.В. Савельев. – 5-е изд., испр. – СПб.: Лань, 2011. – 224 с.
12. *Иродов И.Е.* Физика макросистем. Основные законы: учебное пособие / И.Е. Иродов. – 4-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 207 с.
13. *Детлаф А.А.* Курс физики: учебное пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 8-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 719 с.
14. *Савченко Н.Е.* Задачи по физике с анализом их решения / Н.Е. Савченко. – 2-е изд., стер. – М.: Просвещение, 2000. – 320 с.
15. *Долгов А.Н., Муравьев С.Е., Соболев Б.В.* Задачи вступительных экзаменов и олимпиад по физике с решениями. Молекулярная физика и термоди-

намика: учебное пособие / под ред. С.Е. Муравьева. – М.: МИФИ, 2008. – 248 с.

16. Штыгашев А. А. Задачи по физике. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество: учеб. пособие / А.А. Штыгашев, Ю.Г. Пейсахович. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 160 с.

17. The SI brochure (англ.) Брошюра СИ на сайте Международного бюро мер и весов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.bipm.org/>.

18. CGPM (2011). On the possible future revision of the International System of Units, the SI, Comptes Rendus des Séances de la XXIV Conférence Générale, Resolution 1, 2011, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres: <http://www.bipm.org/en/convention/cgpm/resolutions.html>.

19. ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – Взамен ГОСТ 8.417–81.; введ. 01.09.2003. – М.: Стандартинформ, 2010. – 32 с.

20. Symbols, Units and Nomenclature in Physics: Document U. I. P. 20 (1987). – International Union of Pure and Applied Physics. S.U.N. Commission / пер. с англ. А.А. Радцига. – 60 p.

21. Symbols, units, nomenclature and fundamental constants in Physics: 1987 revision (2010 reprint). – International Union of Pure and Applied Physics. Commission C2 – SUNAMCO / Prepared by E. Richard and Cohen Pierre Giacomo. – 67 p.

22. Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry / E.R. Cohen et al. – IUPAC Green Book, 3rd Edition, 2nd Printing, IUPAC & RSC Publishing, Cambridge, 2008 – 236 p.

23. Свойства элементов: справ. изд. / под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1985. – С. 672.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Тесты для самостоятельного решения

Методические указания к выполнению зачетной работы по разделу «Основы молекулярной физики и термодинамики»

1. Зачетная работа содержит шесть заданий: три задания части **А** и три задания части **В**.

2. В заданиях части **А** предлагается выбрать верный вариант из предложенных. Каждое задание должно сопровождаться кратким решением / пояснением.

3. При выполнении зачетной работы требуется обязательно привести развернутые решения / пояснения к заданиям части **В**.

4. Возможные оценки заданий части **А** – 0, 1 баллов.

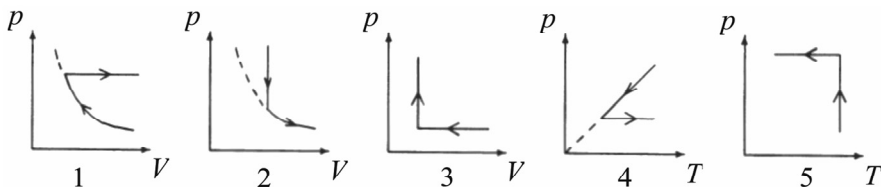
5. Возможные оценки заданий части **В** – 0, 1, 2 баллов.

6. Ускорение свободного падения принять равным $g = 10 \text{ м/с}^2$.

ВАРИАНТ 1

Часть А

А1. На рисунке изображены графики изопроцессов для идеального газа.



Какой график соответствует изобарическому сжатию и изохорическому нагреванию?

Правильный ответ ... (указать номер графика).

A2. При изобарическом сжатии внутренняя энергия идеального газа:

- 1) увеличивается;
- 2) не изменяется;
- 3) уменьшается.

Правильный ответ ... (указать номер).

A3. Если количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику, уменьшится в 2 раза, то коэффициент полезного действия тепловой машины:

- 1) уменьшится на $Q_2/2Q_1$;
- 2) уменьшится на Q_2/Q_1 ;
- 3) увеличится на Q_2/Q_1 ;
- 4) увеличится на $Q_2/2Q_1$.

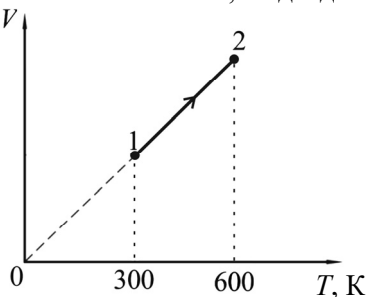
Правильный ответ ... (указать номер).

Часть В

B1. На диаграмме состояний изображен изопроцесс, совершаемый идеальным одноатомным газом. Количество теплоты, подведенное к двум молям газа, равно V (округлить ответ до целого числа) ... (численное значение).

B2. Чему равно изменение внутренней энергии одноатомного газа, если ему передано количество теплоты 600 Дж, а газ при постоянном давлении 100 кПа расширился на $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$?

Правильный ответ ... (численное значение).

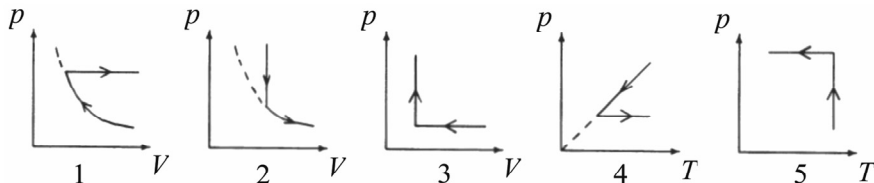


B3. Найти концентрацию молекул идеального одноатомного газа в сосуде вместимостью 5,00 л при температуре 290°C , если его внутренняя энергия равна 300 Дж. Правильный ответ ... (численное значение).

ВАРИАНТ 2

Часть А

А1. На рисунке изображены графики изопроцессов для идеального газа.



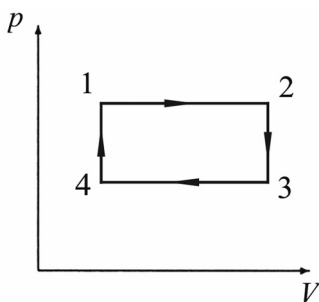
Какой график соответствует изохорическому охлаждению и изобарическому расширению?

Правильный ответ ... (укажите номер графика).

А2. Молекулы какого из перечисленных газов, входящих в состав воздуха, в равновесном состоянии обладают наибольшей средней арифметической скоростью?

1. N_2 .
2. O_2 .
3. H_2 .
4. CO_2 .

Правильный ответ ... (укажите номер).



А3. На рисунке дан график изменения состояния идеального газа в координатах pV . Указать, на каких стадиях процесса газ получал тепло.

- а) 1–2;
- б) 2–3;
- в) 3–4;
- г) 4–1.

Правильный ответ ... (указать букву)

Часть В

В1. Построить в осях VT графики V изотермического (1), изохорического (2) и изобарического (3) процессов.

В2. У теплового двигателя, работающего по циклу Карно, температура нагревателя 500 К, а температура холодильника 300 К. Рабочее тело за один цикл получает от нагревателя 40 кДж теплоты. Какую работу совершает при этом рабочее тело?

Правильный ответ ... (численное значение).

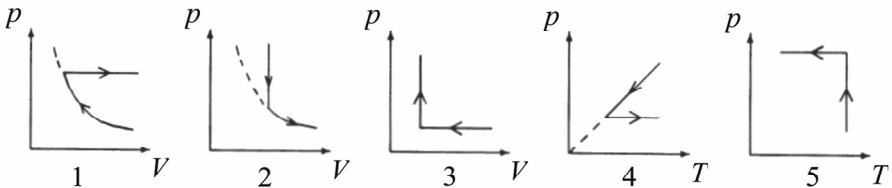
В3. Одному молю **двухатомного** газа было передано 5155 Дж теплоты, при этом газ совершил работу, равную 1000 Дж. Насколько повысилась его температура?

Правильный ответ ... (численное значение).

ВАРИАНТ 3

Часть А

А1. На рисунке изображены графики изопроцессов для идеального газа.



Какой график соответствует изохорическому охлаждению и изотермическому расширению?

Правильный ответ ... (укажите номер графика)

А2. При неизменном давлении одноатомного идеального газа среднеквадратичная скорость движения его атомов увеличилась в 4 раза. При этом плотность этого газа:

- 1) увеличилась в 4 раза;
- 2) уменьшилась в 4 раза;

- 3) увеличилась в 16 раз;
- 4) уменьшилась в 16 раз.

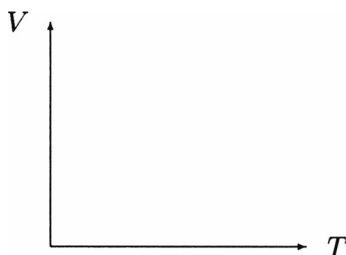
Правильный ответ ... (указать номер).

A3. Условием термодинамического равновесия при тепловом контакте является:

- 1) равенство температур макросистем;
- 2) равенство концентраций молекул макросистем;
- 3) равенство масс макросистем;
- 4) равенство внутренних энергий макросистем.

Правильный ответ ... (указать номер).

Часть В



B1. Построить в осях pT графики изотермического (1), изохорического (2) и изобарического (3) процессов.

B2. В баллоне объемом 20 л находится 150 г смеси водорода и азота. Давление газовой смеси $1,00 \cdot 10^6$ Па, температура в баллоне 290 К. Найти массы азота и водорода в баллоне.

1) $m_{N_2} = \dots$

2) $m_{H_2} = \dots$

(численное значение)

B3. Сравнить КПД двух циклов Карно. В первом цикле к рабочему телу теплота **подводится** при температуре 500 К и **отводится** при температуре 300 К, а во втором – теплота **подводится** при температуре 400 К, а **отводится** при температуре 200 К.

1) $\eta_1 = \dots$

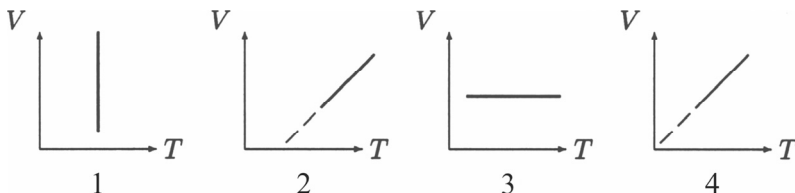
2) $\eta_2 = \dots$

(численное значение)

ВАРИАНТ 4

Часть А

А1. На рисунке приведены графики процессов для идеального газа.



Изобарическому процессу соответствует график ... (указать номер).

А2. Какое из уравнений является основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа?

1) $v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$; 2) $p = \frac{2}{3} n \langle W_k \rangle$;

3) $\langle W_k \rangle = \frac{2}{3} kT$; 4) $\langle W_k \rangle = \frac{i}{2} kT$.

Правильный ответ ... (указать номер).

А3. Температуру холодильника тепловой машины увеличили, оставив температуру нагревателя прежней. Количество теплоты, полученное газом от нагревателя за цикл, не изменилось. Как изменились при этом КПД тепловой машины и работа газа за цикл? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

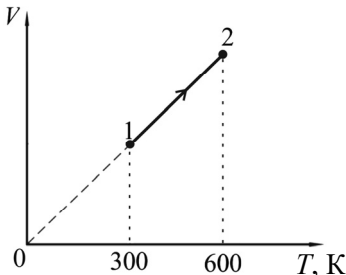
- 1) увеличивается;
- 2) уменьшается;
- 3) не изменяется.

КПД тепловой машины	Работа газа за цикл

Записать в таблицу выбранные цифры для каждой физической величины (цифры в ответе могут повторяться)

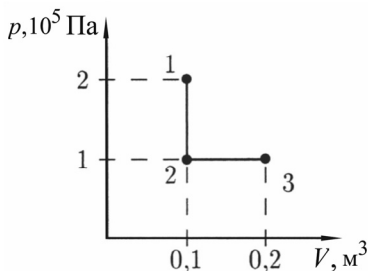
Часть В

В1. На диаграмме состояний изображен изопроцесс, в ходе которого два моля идеального одноатомного газа перешли из состояния 1 в состояние 2. Работа, совершенная газом, равна (округлите ответ до целого числа) ... (численное значение).



В2. При изобарическом сжатии идеального одноатомного газа его объем уменьшился от V_1 до V_2 , а внутренняя энергия изменилась на ΔU .

Давление газа $p = \dots$ (выразить через заданные величины).



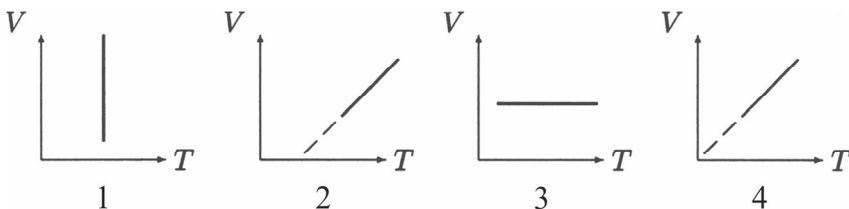
В3. Один моль идеального одноатомного газа переведен из состояния 1 в состояние 3, как показано на рисунке. На каком участке процесса подводится теплота? ... (указать номер процесса).

Количество теплоты, подведенной к газу, на этом участке равно ... (численное значение).

ВАРИАНТ 5

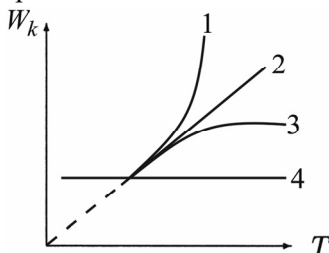
Часть А

А1. На рисунке приведены графики процессов для идеального газа.



Изотермическому процессу соответствует график ... (указать номер).

A2. Какой график (см. рисунок) верно изображает зависимость средней кинетической энергии молекул идеального газа от абсолютной температуры?



Правильный ответ ... (указать номер).

A3. Газ сжали, совершив работу 38 Дж, и сообщили ему количество теплоты 238 Дж. Как изменилась внутренняя энергия газа?

1. Увеличилась на 200 Дж.

2. Уменьшилась на 200 Дж.

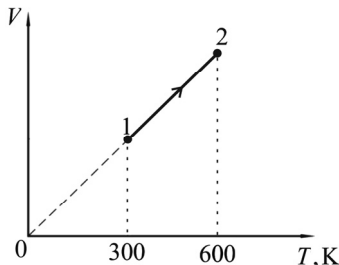
3. Уменьшилась на 276 Дж.

4. Увеличилась на 276 Дж.

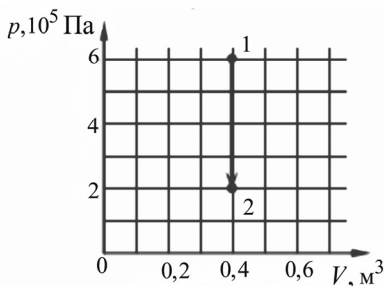
Правильный ответ ... (указать номер).

Часть В

B1. На диаграмме состояний изображен изопроцесс, в ходе которого два моля идеального одноатомного газа перешли из состояния 1 в состояние 2. Изменение внутренней энергии газа в ходе этого процесса равно (округлить ответ до целого числа) ... (численное значение).



B2. В баллоне объемом $200 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ находится газ под давлением 100 кПа при температуре 290 К. После подкачивания газа давление повысилось до 300 кПа, а температура возросла до 320 К. Насколько увеличилось число молекул газа?



Правильный ответ $\Delta N = \dots$ (численное значение).

B3. Во время опыта абсолютная температура воздуха в сосуде понизилась в 2 раза, и он перешел из состояния 1 в состояние 2, как показано на рисунке. Кран у сосуда был закрыт неплотно, и сквозь него мог просачиваться воздух. Рассчитать

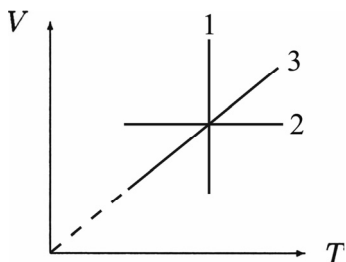
отношение N_2/N_1 количества молекул газа в сосуде в конце и начале опыта. Воздух считать идеальным газом.

Правильный ответ $N_2/N_1 \dots$ (численное значение).

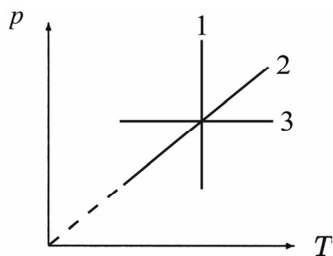
Ответы на тестовые задания

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
A1	3	4	2	4	1
A2	3	3	4	2	2
A3	4	a, d	1	2, 2	4
B1	$Q = 12\,465 \text{ Дж}$	*	**	$A = 4986 \text{ Дж}$	$\Delta U = 7479 \text{ Дж}$
B2	$\Delta U = 300 \text{ Дж}$	16 кДж	$m_{N_2} = 143,7 \text{ г}$ $m_{H_2} = 6,3 \text{ г}$	$p = \frac{2}{3} \frac{\Delta U}{V_2 - V_1}$	$8,6 \cdot 10^{24}$
B3	$n = 1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$	200 К	$\eta_1 = 0,4$ $\eta_2 = 0,5$	Участок 2–3 25 кДж	2/3

(*) Ответ на вопрос B1,
вариант 2:



(**) Ответ на вопрос B1,
вариант 3:



Приложение Б

Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева (длинная форма)*

Группа Период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	Атомный номер 6 Обозначение элемента C Английское название carbon 12,011 Русское название углерод																		2
2	1 H водород 1,008	3 Li литий 6,94	4 Be бериллий 9,012															9 F фтор 18,998	10 Ne неон 20,180
3	11 Na натрий 22,990	12 Mg магний 24,305	13 Al алюминий 26,982	14 Si кремний 28,086	15 P фосфор 30,974	16 S сера 32,06	17 Cl хлор 35,45	18 Ar аргон 39,948											
4	19 K калий 39,098	20 Ca кальций 40,078	21 Sc скандий 44,956	22 Ti титан 47,88	23 V ванадий 50,942	24 Cr хром 52,00	25 Mn марганец 54,938	26 Fe железо 55,845	27 Co кобальт 58,933	28 Ni никель 58,69	29 Cu медь 63,546	30 Zn цинк 65,38	31 Ga галлий 69,723	32 Ge германий 72,630	33 As мышьяк 74,922	34 Se селен 78,96	35 Br бром 79,904	36 Kr криптон 83,80	
5	37 Rb рубидий 85,468	38 Sr стронций 87,62	39 Y иттрий 88,906	40 Zr зirconium 91,224	41 Nb ниобий 92,906	42 Mo молибден 95,94	43 Tc технеций [98]	44 Ru рутений 101,07	45 Rh родий 102,91	46 Pd палладий 106,42	47 Ag серебро 107,87	48 Cd кадмий 112,41	49 In индий 114,82	50 Sn олово 118,71	51 Sb сурьма 121,76	52 Te теллур 127,60	53 I йод 126,90	54 Xe ксенон 131,29	
6	55 Ba барий 137,33	56 La лантан 138,91	57-71 Лантаноиды		72 Hf hafnium 178,49	73 Ta тантал 180,95	74 W вольфрам 183,84	75 Re рений 186,21	76 Os осмий 190,23	77 Ir иридий 192,22	78 Pt платина 195,08	79 Au золото 196,97	80 Hg ртуть 200,59	81 Tl таллий 204,38	82 Pb свинец 207,2	83 Bi висмут 208,98	84 Po полоний [209]	85 At астат [210]	86 Rn радон [222]
7	87 Fr франций [223]	88-103 Актиноиды	104 Rf rutherfordium [261]	105 Db dubnium [262]	106 Sg seaborgium [266]	107 Bh bohrium [264]	108 Hs hassium [277]	109 Mt meitnerium [268]	110 Ds darmstadtium [271]	111 Rg roentgenium [272]	112 Cn copernicium [285]	113 Nh nihonium [286]	114 Fl flerovium [289]	115 Mc moscovium [290]	116 Lv livermorium [293]	117 Ts tennessine [294]	118 Og oganeson [294]		
Лантаноиды 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu лантан церий празеодим прометий самарий европий гадолиний тербий диспрозий иттербий лютеций																			
Актиноиды 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr актиний торий протактиний уран нептуний плутоний америций кюрий берклий калифорний эйнштейний фермий менделевий нобелий лавриенций																			

* Таблица составлена на основе официальной периодической таблицы элементов (версия от 28 ноября 2016 года), представленная на веб-сайте IUPAC: www.iupac.org.

** Для ряда неустойчивых элементов в квадратных скобках вместо атомной массы приведено массовое число (число нуклонов в ядре) наиболее стабильного (долгоживущего) изотопа.

Приложение В

Т а б л и ц а 1

Основные физические постоянные*

Наименование	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме	c	299 792 458 м/с (точно)**
Элементарный заряд	e	$1,602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19}$ Кл***
Масса покоя электрона	m_e	$9,109\,383\,56(11) \cdot 10^{-31}$ кг $5,485\,799\,0990(16) \cdot 10^{-4}$ а.е.м.
Масса покоя нейтрона	m_n	$1,674\,927\,471(21) \cdot 10^{-27}$ кг $1,008\,664\,91588(49)$ а.е.м.
Масса покоя протона	m_p	$1,672\,621\,898(21) \cdot 10^{-27}$ кг $1,007\,276\,466\,879(91)$ а.е.м.
Гравитационная постоянная	G	$6,674\,08(31) \cdot 10^{-11}$ Н · м ² /кг ²
Электрическая постоянная (диэлектрическая постоянная)	$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$	$8,854\,187\,817\,620 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,256\,637\,06 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Постоянная в законе Кулона	$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$	$8,987\,551\,787 \cdot 10^9$ Н·м ² /Кл ² (или $\Phi^{-1} \cdot \text{м}$)
Атомная единица массы	$m_u = 1$ а.е.м.	$1,660\,539\,040(20) \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Авогадро	N_A, L	$6,022\,140\,857(74) \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹

Продолжение табл. 1

Наименование	Обозначение	Значение
Постоянная Больцмана	k, k_B	$1,380\,648\,52(79) \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Фарадея	$F = N_A e$	96 485,332 89(59) Кл/моль
Универсальная газовая постоянная	$R = k_B N_A$	8,314 4598(48) Дж/(моль · (К))
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$V_m = RT/p$	$22,413962(13) \cdot 10^{-3}$ м ³ /моль
Средняя молярная масса воздуха	—	$28,98 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
Постоянная Планка	h	$6,626\,070\,040(81) \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Приведенная постоянная Планка (постоянная Дирака)	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1,054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Абсолютный нуль температуры	T_0	0 К = –273,15 °С
Температура тройной точки воды	—	273,16 К = 0,01 °С
Скорость звука в воздухе при нормальных условиях	—	331,46 м/с
Постоянная Ридберга	$R_\infty = \frac{m_e k^2 e^4}{4\pi \hbar^3}$	$1,097\,373\,156\,850\,8(65) \cdot 10^7$ м ^{–1}
Радиус первой боровской орбиты	$a_0 = \frac{4\pi \varepsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$	$5,29\,177\,210\,67(12) \cdot 10^{-11}$ м
Магнетон Бора	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	$927,400\,999\,94(57) \times 10^{-26}$ Дж · Тл ^{–1}

Наименование	Обозначение	Значение
Удельный заряд электрона	$\frac{e}{m_e}$	$-1,758\,820\,024(11) \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Средний радиус Земли	R_3	$6,371 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	M_3	$5,9736 \cdot 10^{24}$ кг
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = \frac{\pi^2 k_B^4}{60 h^3 c^2}$	$5,670\,367(13) \cdot 10^{-8}$ Вт $\cdot$ м $^{-2}$ $\cdot$ К $^{-4}$

* Официальный набор значений фундаментальных физических постоянных и коэффициентов для их перевода регулярно издается рабочей группой CODATA (*Committee on Data for Science and Technology* – Комитет по данным для науки и техники) по фундаментальным постоянным. Более подробную информацию можно найти на официальном веб-сайте CODATA: <http://www.codata.org/>.

** Скорость света в вакууме – **фундаментальная физическая постоянная**, по определению точно равная 299792458 м/с. Точность значения связана с тем, что с 1983 г. метр в СИ определен как расстояние, которое проходит свет в вакууме за промежуток времени, равный 1/299792458 с.

*** Число в скобках после значения показывает квадратическую погрешность (квадратичное отклонение) в последних значащих цифрах на уровне 1σ (среднеквадратическое отклонение).

Т а б л и ц а 2

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц*

Десятичный множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
Кратные			
10^{24}	иотта	Y	И
10^{21}	зетта	Z	З
10^{18}	экса	E	Э
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т

Окончание табл. 2

Десятичный множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
10^9	гига	<i>G</i>	Г
10^6	мега	<i>M</i>	М
10^3	кило	<i>k</i>	к
10^2	гекто	<i>h</i>	г
10^1	дека	<i>da</i>	да
Дольные			
10^{-1}	деци	<i>d</i>	д
10^{-2}	санتي	<i>c</i>	с
10^{-3}	милли	<i>m</i>	м
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	<i>n</i>	н
10^{-12}	пико	<i>p</i>	п
10^{-15}	фемто	<i>f</i>	ф
10^{-18}	атто	<i>a</i>	а
10^{-21}	zepto	<i>z</i>	з
10^{-24}	иокто	<i>y</i>	и

* Наименования и обозначения единиц времени (минута, час, сутки), плоского угла (градус, минута, секунда), астрономической единицы, диоптрии и атомной единицы массы **не допускается** применять с приставками.

Таблица 3

Значения некоторых математических функций и констант

$e^1 = 2,718\,281\,828$	$\ln x = 2,3026 \lg x$
$\lg e = 0,434\,294\,481$	$\pi = 3,141\,592\,654$
$\ln 10 = 2,302\,585\,093$	$\pi^2 = 9,869\,604\,401$
$\lg x = 0,4343 \ln x$	$\sqrt{\pi} = 1,772\,453\,851$

Т а б л и ц а 4

Примеры обозначения физических величин¹

Наименование величины		Обозначение	Единица СИ	
русское	международное		международное обозначение	русское обозначение
Пространство и время				
Время	Time	t	s	с
Высота	Height	h	m	м
Диаметр	Diameter	d	m	м
Длина	Length	l, L, a	m	м
Объем, вместимость	Volume	V, v	m ³	м ³
Площадь	Area	A, S	m ²	м ²
Скорость линейная ²	Velocity	v, u	m·s ⁻¹	м·с ⁻¹
Ускорение линейное	Acceleration	a	m·s ⁻²	м·с ⁻²
Ускорение свободного падения ³	Acceleration of free fall	g	m·s ⁻²	м·с ⁻²
Механические величины				
Давление	Pressure	p, P	Pa	Па
Импульс (количество движения)	Momentum ⁴	p	kg·m·s ⁻¹	кг·м·с ⁻¹
Коэффициент полезного действия ⁵	Energy conversion efficiency	η	%	%
Коэффициент трения	Friction coefficient	μ, f	—	—
Масса	Mass	m	kg	кг
Мощность	Power	P	W	Вт
Плотность	(mass) density	ρ	kg·m ⁻³	кг·м ⁻³

Продолжение табл. 4

Наименование величины		Обозначение	Единица СИ	
русское	международное		международное обозначение	русское обозначение
Поверхностное натяжение	Surface tension	γ, σ	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-1},$ $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}, \text{Дж} \cdot \text{м}^{-2}$
Гравитационная постоянная	Gravitational constant	G	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Работа	Work	W, A	J	Дж
Сила	Force	F	N	Н
Энергия	Energy	E, W	J	Дж
Энергия кинетическая	Kinetic energy	E_k, T, K	J	Дж
Энергия потенциальная	Potential energy	$E_p, V,$ Φ, U	J	Дж
Тепловые величины и величины молекулярной физики				
Коэффициент линейного теплового расширения	Linear expansion coefficient	α_l	К^{-1}	К^{-1}
Количество теплоты	Quantity of heat	Q	J	Дж
Количество вещества ⁶	Amount of substance	n, ν	mol	моль
Молярная (универсальная) газовая постоянная	Molar gas constant	R	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
Молярная масса ⁷	Molar mass	M	$\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$
Относительная молекулярная масса ⁸	Relative molecular mass (relative molecular weight)	M_r	1	1

Окончание табл. 4

Наименование величины		Обозначение	Единица СИ	
русское	международное		международное обозначение	русское обозначение
Плотность числа молекул (концентрация частиц)	Number density of particles (number concentration, concentration)	n	м^{-3}	м^{-3}
Постоянная (число) Авогадро	Avogadro constant	N_A, L	mol^{-1}	моль $^{-1}$
Постоянная Больцмана	Boltzmann constant	k, k_B	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	Дж $\cdot$ К $^{-1}$
Температура по шкале Цельсия ⁹	Celsius temperature	t, θ	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Температура термодинамическая (абсолютная температура)	Thermodynamic temperature	T	К	К
Теплоемкость	Heat capacity	C, C_p, C_V	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	Дж $\cdot$ К $^{-1}$
Теплопроводность	Thermal conductivity	κ, k, K, λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Вт $\cdot$ м $^{-1} \cdot$ К $^{-1}$
Удельная теплоемкость	Specific heat capacity	c, c_p, c_V	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	Дж $\cdot$ К $^{-1} \cdot$ кг $^{-1}$
Число частиц	Number of particles	N	1	1
Энергия внутренняя	Internal energy	U	Дж	Дж

¹ Величины, выделяемые **жирным** шрифтом – **векторные**. Таблица составлена на основе [17–22].

² Также существует термин Speed: $v = |\mathbf{v}| = |\dot{\mathbf{r}}| = |d\mathbf{r}/dt|$. Скорость иногда обозначается символом v .

³ Также существует понятие standard acceleration of gravity (standard acceleration of free fall) – стандартное («нормальное») ускорение свободного падения $g = 9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ (фиксировано).

⁴ В англоязычной литературе также встречается термин impulse $I = \int F dt$, тогда как $p = mv$.

⁵ Не входящие в СИ, по решению Генеральной конференции по мерам и весам? «допускаются для использования совместно с СИ» единицы относительных и логарифмических величин, такие как процент. Коэффициент полезного действия может измеряться в долях.

⁶ Символ ν может быть использован в качестве альтернативного символа для количества вещества, когда символ n используется для обозначения плотности числа частиц (концентрации частиц).

⁷ Определяется как масса данного вещества (химического элемента или химического соединения), деленная на количество вещества. Единицей СИ для молярной массы является кг/моль. Тем не менее, в силу исторических причин, молярная масса очень часто выражается в г/моль. Термин «молярная масса» включает слово «молярная». Строго говоря, использовать наименование единицы измерения в названии соответствующей ей физической величины не рекомендуется.

⁸ Относительная величина («безразмерное» (с размерностью единица) отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную) измеряется в единицах. Для измерения молекулярной массы используется внесистемная единица массы – атомная единица массы.

⁹ Относится к производным единицам СИ, имеющим специальные наименования и обозначения; $1^\circ\text{C} = 1\text{ K}$, при этом $t = T - 273,15$.

Т а б л и ц а 5

Физические свойства некоторых веществ

Плотность			
Вещество	Значение плотности в кг/м ³	Вещество	Значение плотности в кг/м ³
Водород при н.у. ¹	0,0899	Глицерин	1260
Сухой воздух при н.у.	1,29	Спирт	800
Гелий при н.у.	0,178	Ртуть (0 °C)	13 600
Водяной пар (100 °C) при н.у.	0,598	Бальса	150
Кислород при н.у.	1,43	Пробка	200
Углекислый газ при н.у.	1,98	Сосна	400
Бензин	710	Бакаут	1280
Эфир	720	Парафин	900
Ацетон	792	Лед	900
Спирт	800	Алюминий	2700

Продолжение табл. 5

Плотность			
Вещество	Значение плотности в кг/м ³	Вещество	Значение плотности в кг/м ³
Керосин	820	Мрамор	2700
Масло машинное	910	Цинк	7100
Вода (4 °С)	1000	Сталь, железо	7800
Вода морская	1030	Медь	8900
Молоко цельное	1040	Свинец	11 350
Температура фазовых переходов ²			
Вещество	Температура плавления, °С	Вещество	Температура кипения, °С ($p = 101\,325\text{ Па}$)
Ртуть	–38,9	Метиловый спирт	64,5
Водяной лед	0	Этиловый спирт	78,4
Галлий	29,8	Молоко	100
Олово	232	Вода	100
Свинец	327	Глицерин	290
Алюминий	660	Ртуть	357
Удельная теплоемкость ³			
Вещество	$c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ⁴	Вещество	Удельная теплоем- кость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Водород	14 300	Вода (0 °С)	4,220
Гелий	5190	Вода (10 °С)	4,190
Водяной пар (100 °С)	2078	Вода (20 °С)	4,180
Азот	1040	Этанол	2440
Воздух (100 %-ная влаж- ность)	1,030	Лед (0 °С)	2110
Воздух (сухой, 27 °С)	1,010	Алюминий	897
Кислород	918	Сталь	462

Удельная теплоемкость ³			
Вещество	$c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ⁴	Вещество	Удельная теплоем- кость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
		Железо	449
		Бронза	420
		Медь	385
		Латунь	370
		Олово	227
		Ртуть	140
		Свинец	130
Удельная теплота плавления и отвердевания			
Вещество	$\lambda, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$\lambda, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Алюминий	390	Платина	101
Лед	330	Сталь	84
Железо	277	Олово	60,7
Медь	213	Свинец	25
Удельная теплота парообразования и конденсации ⁵			
Вещество	$r, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ⁶	Вещество	$r, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Вода	2260	Диэтиловый эфир	380
Этиловый спирт	837	Ртуть	282
Удельная теплота сгорания топлива			
Вещество	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Вещество	$q, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
Водород	141	Этанол	30
Метан	50	Метанол	23
Бытовой газ	46	Сухое горючее	31
Керосин	43	Каменный уголь	29
Бензин	42	Дрова березовые сухие	15

¹ н.у. – нормальные условия.² Данные взяты из [23].

³ Значения приведены для $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 100\text{ кПа}$, если это не оговорено особо.

⁴ Кельвины (К) здесь можно заменять на градусы Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), поскольку абсолютная температурная шкала и шкала Цельсия отличаются друг от друга лишь начальной точкой, но не величиной единицы измерения.

⁵ Удельная теплота парообразования дана при нормальном атмосферном давлении (101,325 кПа) и температуре, равной температуре кипения вещества.

⁶ Удельная теплота парообразования и конденсации также часто обозначается как L .

Т а б л и ц а 6

Зависимость давления p и плотности ρ насыщенного водяного пара от температуры t

p , кПа	ρ , г/м ³	t , $^{\circ}\text{C}$	p , кПа	ρ , г/м ³	t , $^{\circ}\text{C}$
0,10	1,5	−20,0	2,49	18,3	21,0
0,11	1,5	−19,0	2,64	19,4	22,0
0,12	1,6	−18,0	2,81	20,5	23,0
0,14	1,7	−17,0	2,98	21,7	24,0
0,15	1,8	−16,0	3,17	23,0	25,0
0,17	1,9	−15,0	3,36	24,3	26,0
0,26	2,6	−10,0	3,57	25,7	27,0
0,40	3,6	−5,0	3,78	27,2	28,0
0,44	3,8	−4,0	4,01	28,8	29,0
0,48	4,0	−3,0	4,24	30,4	30,0
0,52	4,3	−2,0	5,62	39,6	35,0
0,56	4,6	−1,0	7,38	51,2	40,0
0,61	4,9	0,0	9,58	65,4	45,0
0,66	5,3	1,0	12,33	82,8	50,0
0,71	5,6	2,0	15,73	104,0	55,0
0,76	6,0	3,0	19,92	129,5	60,0
0,81	6,4	4,0	25,00	160,1	65,0
0,87	6,8	5,0	31,16	196,4	70,0
0,93	7,3	6,0	38,55	239,3	75,0
1,00	7,7	7,0	47,35	289,7	80,0
1,07	8,3	8,0	57,81	348,7	85,0
1,15	8,8	9,0	67,48	402,8	89,0
1,23	9,4	10,0	70,10	417,3	90,0

Окончание табл. 6

p , кПа	ρ , г/м ³	t , °С	p , кПа	ρ , г/м ³	t , °С
1,31	10,0	11,0	72,81	432,3	91,0
1,40	10,6	12,0	75,60	447,7	92,0
1,50	11,3	13,0	78,48	463,6	93,0
1,60	12,0	14,0	81,45	480,0	94,0
1,71	12,8	15,0	84,52	496,8	95,0
1,82	13,6	16,0	87,68	514,1	96,0
1,94	14,4	17,0	90,94	531,9	97,0
2,06	15,3	18,0	94,30	550,2	98,0
2,20	16,3	19,0	97,76	569,1	99,0
2,34	17,3	20,0	101,33	588,5	100,0

Таблица 7

Поверхностное натяжение жидкостей на границе с воздухом

Вещество	t , °С	σ , 10 ⁻³ Н/м	Вещество	t , °С	σ , 10 ⁻³ Н/м
Олово	400	518	Масло олив- ковое	18	33,1
Ртуть	20	487	Бензол	20	29,0
Глицерин	30	64,7	Уксусная кис- лота	20	27,8
Глицерин	20	59,4	Нефть	20	26
Вода	20	72,9	Ацетон	20	23,7
Раствор мыла	20	43,0	Спирт этило- вый	20	22,8
Масло касто- ровое	18	35,4	Эфир этило- вый	20	16,9

Приложение Г

Дано:

Решение:

Найти:

Ответ:

Приложение Д

Основные физические формулы по разделам молекулярной физики и термодинамики

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ	
Молярная масса	$M = N_A m_{\text{мол}}, \quad M = N_A m_a$
Количество вещества	$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$
Плотность	$\rho = m/V$
Концентрация частиц	$n = N/V$
Постоянная Больцмана	$k = \frac{R}{N_A}$
Средняя квадратичная скорость молекул	$v_{\text{кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2}$ $v_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$
Наиболее вероятная скорость молекул	$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$
Средняя арифметическая скорость	$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$
Основное уравнение МКТ	$p = \frac{1}{3} n_0 m_0 v_{\text{кв}}^2 = \frac{1}{3} \rho v_{\text{кв}}^2$ $p = \frac{2}{3} n_0 \langle E_{k \text{ пост}} \rangle$
Связи средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа с температурой	$\langle E_{k \text{ пост}} \rangle = \frac{3}{2} kT$
ТЕРМОДИНАМИКА	
Уравнение Менделеева–Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)	$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT$ $p = \frac{kN_A}{V_m} T = kn_0 T$

Продолжение таблицы

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ	
Закон Дальтона для давления смеси разреженных газов	$p = p_1 + p_2 + \dots + p_N$
Приращение внутренней энергии	$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i}{2} \nu R \Delta T$
Первое начало термодинамики (первый закон термодинамики)	$Q = \Delta U + A$
Теплоемкость	$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT}$
Удельная теплоемкость	$c = \frac{C_{\text{тела}}}{m} = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}$
Молярная теплоемкость	$C = \frac{C_{\text{тела}}}{\nu} = Mc$
Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона)	$pV^\gamma = \text{const}$
Молярная теплоемкость газа в процессах с постоянным объемом	$C_V = \frac{i}{2} R$
Молярная теплоемкость газа в процессах с постоянным давлением	$C_p = \frac{i+2}{2} R$
Соотношение Майера	$C_p + C_V = R$
Работа газа	$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$
Работа газа при изобарическом процессе	$A = p \Delta V$
Работа газа при изотермическом процессе	$A_{1-2} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_{1-2}$
Работа газа при адиабатическом процессе	$A_{1-2} = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] =$ $= \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]$

Продолжение таблицы

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ	
Термический коэффициент полезно-го действия для кругового процесса	$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$
Термический КПД двигателя	$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$
КПД цикла Карно	$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$
Холодильный коэффициент	$\varepsilon = \eta' = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$
Холодильный коэффициент идеаль-ной холодильной машины	$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ	
Уравнение теплового баланса	$\sum_{i=1}^N Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_N = 0,$ $\Delta U_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta U_i = 0$
Удельная теплоемкость вещества	$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{Q}{m\Delta t}$
Удельная теплота сгорания топлива	$q = \frac{Q}{m}$
Удельная теплота плавления и отвердевания	$\lambda = \frac{Q}{m}$
Удельная теплота парообразования и конденсации	$r = \frac{Q}{m}$
Абсолютная влажность воздуха	$\rho_A = \frac{m}{V}$
Относительная влажность	$\varphi = \frac{p_A}{p_H} 100 \% \approx \frac{P_A}{P_H} 100 \%$
КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ	
Коэффициент поверхностного натя-жения	$\sigma = \frac{F_n}{l} = \frac{W}{S}$

Окончание таблицы

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ	
Высота подъема жидкости в капиллярной трубке	$h = \frac{2\pi \cos \theta}{R\rho g}$
Капиллярное давление (закон капиллярного давления Лапласа для сферической поверхности радиуса R)	$p_{\text{и}} = \pm \frac{2\sigma}{R}$

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
В1. Исходные понятия и определения термодинамики и молекулярной физики.....	5
В2. Основы решения задач.....	20
1. Молекулярная физика. Газовые законы.....	30
1.1. Теоретический материал и примеры решения задач	30
1.2. Общая схема решения задач молекулярной кинетической теории газов.....	46
Вопросы для самоконтроля.....	47
Задачи для самостоятельного решения.....	48
2. Первое начало термодинамики. Изопроцессы	55
2.1. Теоретический материал и примеры решения задач	55
2.2. Общая схема решения задач на «первое начало термодинамики».....	67
Вопросы для самоконтроля.....	68
Задачи для самостоятельного решения.....	69
3. Тепловые двигатели. Циклы.....	74
3.1. Теоретический материал и примеры решения задач	74
3.2. Общая схема решения задач на определение КПД циклов.....	83
Вопросы для самоконтроля.....	83
Задачи для самостоятельного решения.....	84
4. Уравнение теплового баланса. Фазовые переходы. Влажность воздуха. Капиллярные явления	89
4.1. Теоретический материал и примеры решения задач	89
4.2. Общая схема решения задач на тепловые процессы и фазовые переходы	97
Вопросы для самоконтроля.....	98
Задачи для самостоятельного решения.....	98
Библиографический список	103
Приложения.....	105