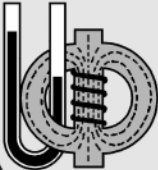


ISSN 2307-5457

*Primum
inter pares*

Материалы XXIX Всероссийской
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:
Актуальные проблемы. Современные
решения“



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ

**УЧЕБНАЯ
ФИЗИКА**

Октябрь - декабрь 2024 №4

Издается с января 1997 года

СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

В. В. Майер	ОПЫТЫ С ЭЛЕКТРОФОРМ КАК СПОСОБ ВВЕДЕНИЯ	
Е. И. Вараксина	ПОНЯТИЯ СВОБОДНЫХ И СВЯЗАННЫХ ЗАРЯДОВ	3
Ю. А. Корнев		

Старшая школа

Ш. Г. Зиятдинов	ЗАДАЧИ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ НА ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ В КУРСЕ ШКОЛЬНОЙ ФИЗИКИ	12
-----------------	---	----

Высшая школа

С. В. Барышников	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА	24
В. В. Майер	ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РОБОТОТЕХНИКИ:	
Е. И. Вараксина	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕМОСТРАЦИОННОГО	
И. А. Васильев	АНАЛИЗАТОРА ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА	31

Исследования

Е. Л. Казакова	АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО	
О. В. Сергеева	ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ ФИЗИКИ В ВУЗЕ	51
С. В. Костарев	СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ	
Ю. С. Остроумова	ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ В ПОДГОТОВКЕ ВОЕННЫХ	
С. Д. Ханин	СПЕЦИАЛИСТОВ В НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ НАПРАВЛЕНИИ	62

АВТОРЫ ЖУРНАЛА	70
----------------	----

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ В 2024 ГОДУ	71
--	----

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

Редакционный совет:

И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Г. Г. Никифоров	к.п.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
А. Ю. Пентин	к.ф.-м.н., доцент, ИСРО РАО, Москва
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская-Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.
E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropach@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Подписной индекс: 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.12.24. Подписано в печать 16.12.24.

Дата выхода в свет: 24.12.24.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,5.

Заказ 166. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Электромагнитная индукция в разных системах отсчета [Майер В. В., Вараксина Е. И. Демонстрационные опыты перед изучением основ специальной теории относительности // Физика в школе. — 2022. — № 2. — С. 29–35.].

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853

Ш. Г. Зиятдинов

ЗАДАЧИ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ НА ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ В КУРСЕ ШКОЛЬНОЙ ФИЗИКИ

В статье обсуждаются задачи повышенного уровня сложности на законы термодинамики, в том числе, нестандартной формы, и методы их решения. Подчеркивается, что при внимательном разборе и понимании задач для их решения оказывается достаточно материала школьного курса математики.

Ключевые слова: термодинамика, повышенный уровень сложности, задачи, методы решения.

Sh. G. Ziyatdinov

ADVANCED PROBLEMS ON LAWS OF THERMODYNAMICS IN HIGH-SCHOOL PHYSICS

We discuss advanced problems on laws of thermodynamics, of standard and non-standard forms, and methods for their solution. We highlight that with careful analysis and thorough understanding of problems one can approach them solely using high-school mathematics.

Ключевые слова: thermodynamics, increased level of complexity, tasks, methods of solution.

DOI: 10.62957/2307-5457-2024-4-12-23

Типовые задачи на тему «Газовые законы» представляют собой расчетные и качественные задачи, решение которых требует знания уравнения Клапейрона–Менделеева и графических иллюстраций основных газовых процессов (изотермического, изобарного, изохорного, изредка адиабатного). Модель идеального газа при этом не конкретизируется. Функциональные зависимости между параметрами термодинамической системы (ТДС) хорошо описывают поведение всех газов. Вместе с тем отметим, что переходы идеального газа из одного состояния в другое могут быть осуществлены бесчисленным количеством способов в зависимости от того, как меняются отдельные параметры ТДС (m , M , p , V , T). Математически записывая зависимости и графически иллюстрируя все множество газовых процессов (не только традиционных), можно весьма успешно решить и качественные, и количественные задачи на переходы газа из одного состояния в другое, не используя элементы высшей математики [1, 5–8].

1. Задания первой группы предполагают умение оперировать математическими уравнениями газовых процессов и их графическими иллюстрациями в различных координатах и умение перевода процесса из одной диаграммы в другую. В этом случае учащимся требуется правильно записать функциональную зависимость между параметрами ТДС согласно условию задачи и получить функциональную зависимость между параметрами уже в требуемой диаграмме. Таким образом, при решении задач первой группы нужно: а) получить уравнение — функциональную зависимость между параметрами ТДС для газового процесса согласно условию задачи; б) записать уравнение состояния газа Клапейрона–Менделеева; в) из системы двух записанных уравнений исключить ненужный параметр ТДС и получить функциональную математическую зависимость между газовыми параметрами ТДС согласно требуемой диаграмме.

2. Задания второй группы предполагают понимание сути первого начала термодинамики, методов оценки величин работы A ТДС, изменения ее внутренней энергии ΔU и количества поглощенной ею теплоты Q при различных равновесных процессах, не обязательно только при изотермических, изобарных и изохорных, реже при адиабатных (что предлагается в типовой школе). Вместе с тем, при анализе задач на первое начало термодинамики (на расчеты ΔU , Q , теплоемкости идеального газа при различных процессах) модель идеального газа требует конкретизации. Известно, что в типовом школьном учебнике и задачниках анализируются лишь одноатомные газы. Однако участникам физических олимпиад, выпускникам школ при выполнении КИМ ЕГЭ и др. часто предлагаются задачи на многоатомные газы и задачи, в условиях которых о модели газа совсем не говорится. Как показывает анализ методической литературы, решение большинства предложенных задач второй группы возможно при использовании единственного предложения из школьного учебника, посвященного многоатомному газу: «... внутренняя энергия многоатомного газа пропорциональна его абсолютной температуре» [7, с. 210], то есть $U \sim T$. Кроме того, при расчете величины работы A большую помощь оказывает геометрический смысл работы — площадь некоторой фигуры, соответствующей исследуемому процессу и представленной в диаграмме (p, V) [6, 7].

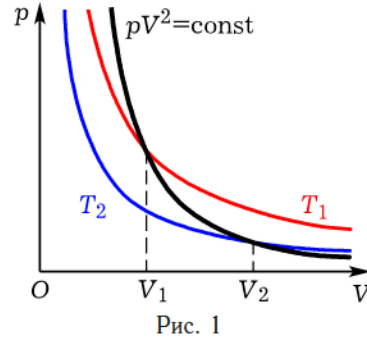
Отметим, что в этой работе задачи на второе начало термодинамики обсуждать не будем — они достаточно подробно были нами проанализированы в [2, 3].

Приведем некоторые примеры нетрадиционных задач, которые могут быть решены при использовании аналитических и графических методов.

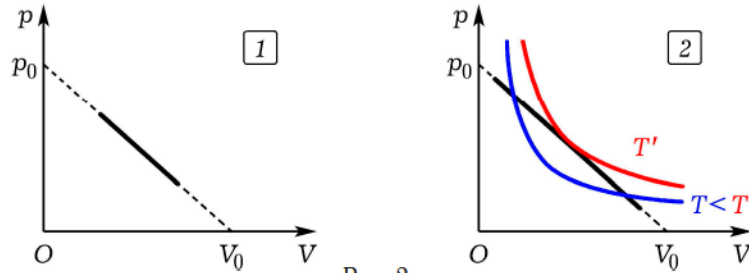
Задача 1. *Как и во сколько раз изменится температура идеального газа, если увеличить его объем в два раза при осуществлении процесса, в котором давление и объем газа связаны соотношением $pV^2 = \text{const}$?*

Решение. Из уравнения зависимости $pV^2 = \text{const}$ и закона Клапейрона–Менделеева $pV = \frac{m}{M}RT$, исключив параметр p , получим в диаграмме $V - T$ зависимость $V = \text{const}/T$. Таким образом, при увеличении объема в два раза температура газа соответственно уменьшается в два раза.

Ответ: температура уменьшится в два раза (рис. 1).



Задача 2. Один моль идеального одноатомного газа расширяется по линейному закону зависимости давления от объема, изображенному на рис. 2.1. Найдите максимальную температуру газа в этом процессе.



Решение. Если на этом же рисунке построить семейство изотерм (гипербол), то можно заметить, что среди изотерм будет одна, которая касается заданной прямой в одной точке (рис. 2.2). Очевидно, эта изотерма и есть искомая изотерма с максимальным значением температуры T' . Остальные изотермы либо пересекаются с прямой в двух точках, либо вообще не пересекаются. Решая совместно уравнения заданной прямой

$$p = -\left(\frac{p_0}{V_0}\right)V + p_0,$$

(уравнение прямой предлагаем вывести читателям самостоятельно) и гиперболы $p = a/V$, где $a = \nu RT = \text{const}$, получим квадратное уравнение:

$$\frac{p_0}{V_0}V^2 - p_0V + \nu RT = 0. \quad \text{Отсюда} \quad V_{1,2} = \frac{p_0 \pm \sqrt{p_0^2 - 4\left(\frac{p_0}{V_0}\right)\nu RT}}{2\left(\frac{p_0}{V_0}\right)}.$$

Требование $V_1 = V_2$ (условие касания гиперболы и прямой) дает

$$D = p_0^2 - 4 \left(\frac{p_0}{V_0} \right) \nu R T' = 0, \quad \text{откуда следует} \quad T' = \frac{p_0 V_0}{4 \nu R}.$$

Ответ: $T' = \frac{p_0 V_0}{4 \nu R}$.

Задача 3. На рис. 3 изображены две изотермы одной и той же массы идеального газа. Определите температуру T_3 идеального газа в точке a_3 , находящейся в середине отрезка $a_1 a_2$. Температуры T_1 и T_2 считайте известными.

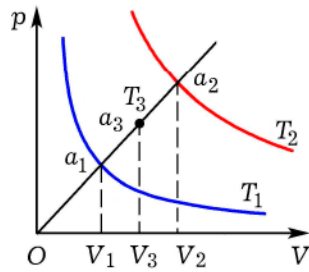


Рис. 3

Решение. Состояния газа 1, 2, 3 одновременно подчиняются закону

$$p = aV \quad (1)$$

и уравнению Клапейрона–Менделеева

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (2)$$

Кроме того, для состояния 3 верно соотношение

$$V_3 = \frac{V_1 + V_2}{2}. \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$V = b\sqrt{T}, \quad \text{где} \quad b = \sqrt{\frac{m}{M} \cdot \frac{R}{a}}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), имеем

$$b\sqrt{T_3} = \frac{b\sqrt{T_1} + b\sqrt{T_2}}{2}, \quad \text{откуда получаем} \quad T_3 = \left(\frac{\sqrt{T_1} + \sqrt{T_2}}{2} \right)^2.$$

Ответ: $T_3 = \frac{1}{4} (\sqrt{T_1} + \sqrt{T_2})^2$.

Задача 4. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при расширении, если его давление p и объем V связаны формулой $pV^n = \text{const}$, где $n > 1$?

Решение. Объем и давление газа связаны соотношениями:

$$pV^n = \text{const} = b \quad \text{и} \quad pV = \nu RT.$$

Отсюда $\nu RT V^{n-1} = b$, значит $T \sim 1/V^{n-1}$ или $T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{n-1}$. Тогда при расширении газа $V_2 > V_1$ при $n - 1 > 0$ его температура уменьшается, то есть $\Delta T < 0$ и, соответственно, $\Delta U < 0$ — внутренняя энергия газа при его расширении уменьшается.

Графически решение задачи можно представить следующим образом (рис. 4). Графики зависимостей $pV^n = \text{const}$ при различных n по отношению к графику изотермического процесса $pV = \text{const}$ ($n = 1$), гиперболе–изотерме (линия a), можно разбить на две группы: первая группа — более «крутые», чем изотерма, $n > 1$ (линия b);

вторая группа — менее «крутые», чем изотерма, $n < 1$ (линия $в$).

Таким образом, при расширении газа с $n > 1$ его температура падает, естественно, внутренняя энергия газа при этом уменьшается, так как $U \sim T$.

Задача 5. Зависимость давления p (в атм) от абсолютной температуры T (в К) для идеального газа в количестве $\nu = 2$ моль, совершающего замкнутый процесс 1–2–3–4–1, представлена на рис. 5.1. Какую работу совершает газ, если $V_3/V_2 = 5$?

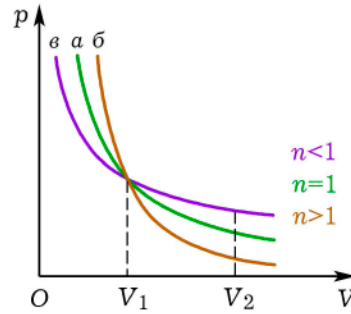


Рис. 4

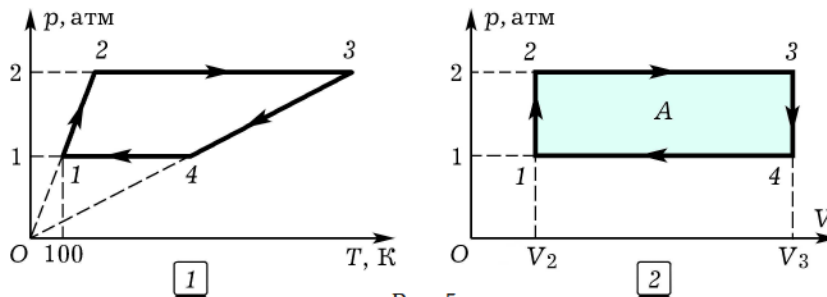


Рис. 5

Решение. На диаграмме (p, V) цикл представляет собой прямоугольник, и искомую работу можно найти как площадь этого прямоугольника (рис. 5.2):

$$\begin{aligned} A = S = \Delta p \cdot \Delta V &= (p_2 - p_1) \cdot (V_4 - V_1) = (p_2 - p_1) \cdot (V_3 - V_2) = \\ &= 4(p_2 - p_1)V_2 = 4p_1V_1 = 4\nu RT_1 \approx 6,6 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Ответ: $A \approx 6,6$ кДж.

Задача 6. Найдите работу 1 моля идеального газа за 1 цикл в процессе 1–2–3–1, график которого изображен на рис. 6.1 (1–2 — отрезок прямой, проходящей через начало координат; 2–3 — отрезок вертикальной прямой; 3–1 — отрезок параболы, проходящей через начало координат). Известны температуры T_1, T_2, T_3 .

Решение. Перестроим цикл в системе координат (p, V) . Как видно из рис. 6.1 и рис. 6.2, процесс 1–2 является изохорическим, 2–3 — изобарическим. Процесс 3–1 в системе координат (p, T) может быть записан в виде: $T = c \cdot p(p_0 - p)$, где c и p_0 — некоторые постоянные (предлагаем получить уравнение параболы самим читателям). Переход 3–1 к системе координат (p, V) представляет собой прямую $p = -bV +$

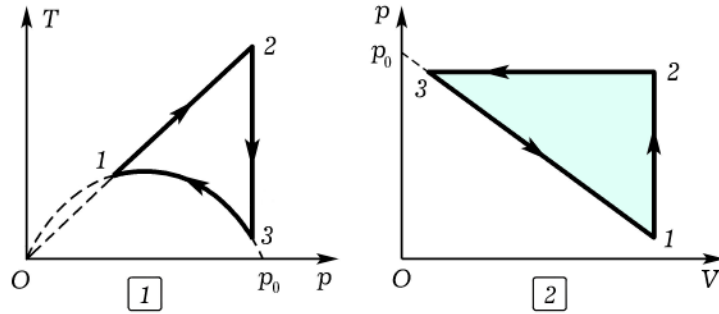


Рис. 6

p_0 , где $b = 1/\nu cR$. Таким образом, расчет работы при заданном цикле сводится к определению площади треугольника в диаграмме (p, V) . При этом $V_1 = V_2$, $p_2 = p_3$. Отсюда для работы A получаем:

$$\begin{aligned} A &= -S_{123} = -\frac{1}{2} \Delta p \Delta V = -\frac{1}{2} (p_2 - p_1) (V_2 - V_3) = \\ &= -\frac{1}{2} (p_2 V_2 - p_2 V_3 - p_1 V_2 + p_1 V_3) = \frac{1}{2} \nu R \left(T_3 - T_2 + T_1 - T_1 \cdot \frac{T_3}{T_2} \right) = \\ &= \frac{\nu R (T_3 - T_2) (T_2 - T_1)}{2T_2}. \end{aligned}$$

Ответ: $A = \frac{\nu R (T_3 - T_2) (T_2 - T_1)}{2T_2}.$

* * *

Далее остановимся на одном серьезном моменте, рассмотренном нами раньше в работе [3]. Анализ учебно-методической литературы (сборники задач) показывает, что в некоторых задачах на оценку количества теплоты Q предлагаются ошибочные решения или ответы. Ошибки встречаются при рассмотрении процессов, в которых давление p прямолинейно падает при расширении газа. Приведем пример.

Задача 7. Рассчитайте количество теплоты, поглощенной идеальным одноатомным газом в процессе 1–2 (рис. 7.1), p и V — давление и объем газа.

Решение. Количество теплоты Q рассчитывают, применяя первое начало термодинамики $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$. На всем участке 1–2 газ расширяется, значит совершенная работа положительная $A_{12} > 0$. Изменение внутренней энергии ΔU_{12} определяется изменением температуры на этом участке. При решении задач такого типа следует проанализировать, как изменяется температура в конкретных условиях задачи [1–3; 4, с. 180–182; 9].

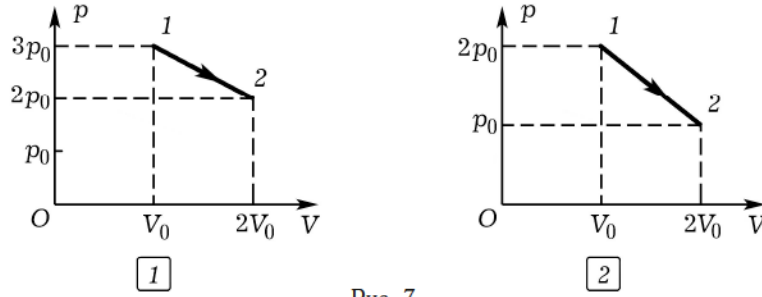


Рис. 7

В случае, показанном на рис. 7.1, температура газа возрастает на всем участке $1-2$ ($4p_0V_0 > 3p_0V_0$, то есть $\Delta T > 0$ и $\Delta U > 0$). Тогда получаемую газом теплоту можно вычислить по формуле:

$$Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12} = \frac{3}{2}\nu R(T_2 - T_1) + \frac{5}{2}p_0V_0 = \frac{3}{2}p_0V_0 + \frac{5}{2}p_0V_0 = 4p_0V_0.$$

Ответ: $Q_{12} = 4p_0V_0$.

Задача 7а. Перейдем к несколько измененной задаче с другими начальным и конечным состояниями (рис. 7.2). Газ в начальном 1 и конечном 2 состояниях имеет одинаковые температуры $T_1 = T_2$, так как $2p_0V_0 = p_02V_0$. Из этого можно заключить, что $\Delta U_{12} = 0$. Работа газа A_{12} численно равна площади трапеции, то есть $A_{12} = 3/2 \cdot p_0V_0$. Тогда получаемое газом количество теплоты в процессе $1-2$ определяется по формуле:

$$Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12} = 0 + \frac{3}{2}p_0V_0 = \frac{3}{2}p_0V_0.$$

Это неверное решение.

Процесс $1-2$ не является изотермическим, поскольку графиком служит прямая линия, а не гипербола. В таком процессе газ сначала нагревается (см. задачу 2), а затем охлаждается. В некоторых задачах предлагается следующее решение. Полагают, что газ получает тепло до момента достижения максимальной температуры и определяют ее так, как это сделано выше в задаче 2. Получают $T_{\max} = 9/8 \cdot T_1$. Определяют соответствующие давление и объем $p_{\max} = 3/2 \cdot p_0$ и $V_{\max} = 3/2 \cdot V_0$. Рассчитывают получаемое газом количество теплоты:

$$\begin{aligned} Q_{1,T_{\max}} &= \Delta U_{1,T_{\max}} + A_{1,T_{\max}} = \frac{3}{2}\nu R(T_{\max} - T_1) + \frac{7}{8}p_0V_0 = \\ &= \frac{3}{2}\nu R\left(\frac{9}{8}T_1 - T_1\right) + \frac{7}{8}p_0V_0 = \frac{3}{2}\nu R \cdot \frac{1}{8}T_1 + \frac{7}{8}p_0V_0 = \frac{3}{8}p_0V_0 + \frac{7}{8}p_0V_0 = \frac{10}{8}p_0V_0. \end{aligned}$$

Отметим, что и это решение неверно.

Для решения задачи нужно найти состояние газа на прямой $1-2$, после которого, расширяясь, газ перестает получать теплоту от нагревателя $\delta Q = dU + \delta A = 0$. Это состояние соответствует точке

касания прямой не с изотермой, а с адиабатой. Решение соответствующей системы уравнений является более сложным. Решение подобной задачи рассмотрено известными методистами О. Ф. Кабардиным и В. А. Орловым в работах [4, с. 180–182; 9].

Задача 8. Один моль одноатомного идеального газа совершает замкнутый цикл, состоящий из процесса с линейной зависимостью давления от объема, изохоры и изобары (рис. 8.1). Найдите количество теплоты, подведенное к газу на участках цикла, где температура растет. Температура газа в состояниях 1 и 2 равна 300 К, отношение объемов на изобаре $V_2/V_1 = 5/2$.

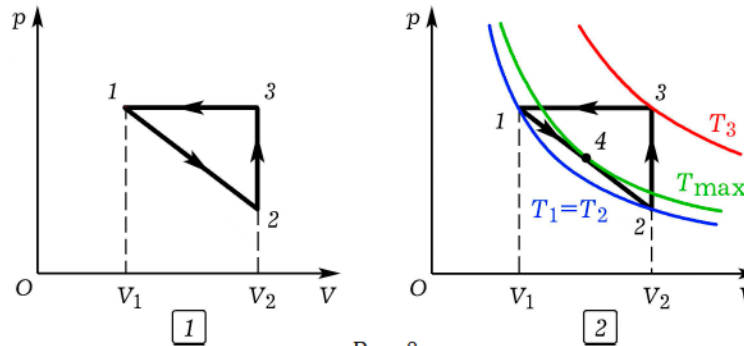


Рис. 8

Решение. Для нахождения участков цикла, где температура растет, проведем ряд изотерм (рис. 8.2). Теперь наглядно видно, что T растет на участках 2–3 (изохорический процесс нагревания) и на отрезке 1–4 участка 1–2. Причем температура $T_4 = T_{\max}$ является максимальной в процессе 1–2 и она равна $T_{\max} = 49/40 \cdot T_1$ из $p_{\max} = 7/10 \cdot p_1$ и $V_{\max} = 7/4 \cdot V_1$ (см. решение задачи 7а). Количество поглощенной теплоты на участке 2–3 согласно первому началу термодинамики:

$$Q_{23} = \Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_1) = \frac{9}{4} \nu R T_1.$$

Количество же теплоты, подведенное к газу на участке 1–4, согласно первому началу термодинамики представляется как сумма $Q_{14} = \Delta U_{14} + A_{14}$. При этом $\Delta U_{14} = 3/2 \cdot \nu R (T_{\max} - T_1) = 27/80 \cdot \nu R T_1$. Работа A_{14} представляется как площадь трапеции, и она равна $A_{14} = 51/80 \cdot \nu R T_1$ (см. решение задачи 7а).

Таким образом, количество теплоты, подведенное к газу на участке 1–4, равно:

$$Q_{14} = \frac{27}{80} \nu R T_1 + \frac{51}{80} \nu R T_1 = \frac{39}{40} \nu R T_1.$$

В итоге, количество теплоты, подведенное к газу на участках цикла,

где температура растет, составляет:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{23} + Q_{14} = \frac{9}{4}\nu RT_1 + \frac{39}{40}\nu RT_1 = \frac{129}{40}\nu RT_1 \approx 8,04 \text{ кДж.}$$

Ответ: $Q_{\text{общ}} \approx 8,04 \text{ кДж.}$

Задача 9. Над одним моле одноатомного газа совершается процесс, показанный на рис. 9.1 ($p \sim \sqrt{T}$), причем $T_2 = 4T_1$ ($T_1 = 200 \text{ K}$). Найдите подведенное количество теплоты.

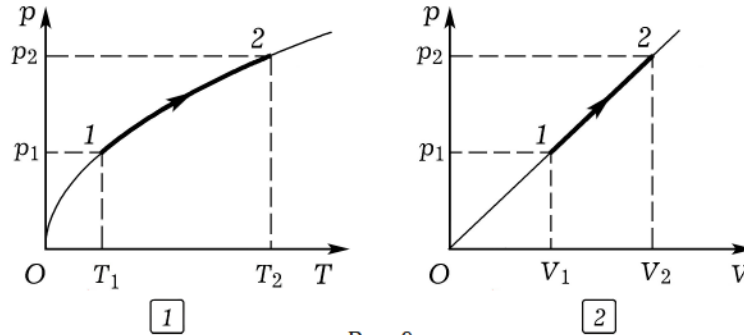


Рис. 9

Решение. Необходимо перейти в диаграмму (p, V), в которой процесс 1–2 представится в виде прямой, проходящей через начало координат (рис. 9.2). Для начала найдем связь между V и T , используя уравнение Клапейрона–Менделеева и $p = K\sqrt{T}$, откуда получим

$$V = \frac{\nu R}{K}\sqrt{T}.$$

Очевидно, количество теплоты, подведенное к газу в процессе 1–2, согласно первому началу термодинамики, представляется как сумма: $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$. При этом $\Delta U_{12} = 3/2 \cdot \nu R(T_2 - T_1) = 9/2 \cdot \nu RT_1$. Зная зависимости давления p и объема V от температуры T , найдем работу газа в процессе 1–2 (рис. 9.2):

$$A_{12} = S_{12} = \frac{(p_1 + p_2)(V_2 - V_1)}{2} = \frac{3}{2}\nu RT_1.$$

Отсюда получаем теплоту $Q_{12} = 6\nu RT_1 \approx 10 \text{ кДж.}$

Ответ: $Q_{12} = 6\nu RT_1 \approx 10 \text{ кДж.}$

Задача 10. Пусть некоторое вещество имеет уравнение состояния $p = 2aV$, а его внутренняя энергия есть $U = -aV^2 + f(T)$, где a — некоторая постоянная, $f(T)$ — известная функция. Покажите, что всякий изотермический процесс является для этого вещества также адиабатическим.

Решение. Рассмотрим некий изотермический процесс при температуре T , при котором объем меняется от значения V_1 до значения V_2 . Тогда работа вещества будет равна площади под прямой $p = 2aV$ на pV -диаграмме (рис. 10). Эта площадь определяется равенством: $A = aV_2^2 - aV_1^2$. Изменение внутренней энергии определяется просто из условий задачи: $\Delta U = (-aV_2^2 + f(T)) - (-aV_1^2 + f(T)) = aV_1^2 - aV_2^2$. Тогда по первому началу термодинамики количество сообщенной теплоты равно: $Q = A + \Delta U = 0$. Поскольку в процессе веществу тепло не передавалось, процесс адиабатический. Таким образом, любой изотермический процесс для этого вещества является и адиабатическим, что и требовалось доказать.

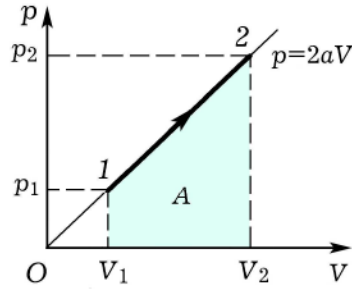


Рис. 10

Задача 11. Найдите теплоемкость ν молей идеального газа в процессе, при котором температура газа пропорциональна квадрату его объема (рис. 11.1). Молярную теплоемкость газа при постоянном объеме можно считать известной.

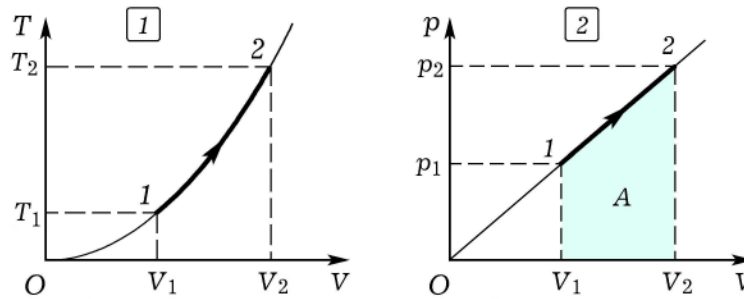


Рис. 11

Решение: Согласно первому началу термодинамики и определению теплоемкости можно записать:

$$c = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} + \frac{A}{\Delta T}.$$

При зависимости $T = aV^2$ (или $p = avRV$) работа определяется как площадь трапеции (рис. 11.2):

$$A = \frac{(p_2 + p_1)\Delta V}{2} = \frac{avR(V_2 + V_1)\Delta V}{2} = \frac{avR(V_2^2 - V_1^2)}{2} = \frac{\nu R \Delta T}{2}.$$

Величина $\Delta U/\Delta T$ представляет собой теплоемкость при постоянном объеме c_V . Таким образом, $c = c_V + \nu R/2 = \nu(C_V + R/2)$, где C_V — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Ответ: $c = \nu(C_V + R/2)$.

Задача 12. Найдите величину теплоемкости и работу, которую совершает один моль гелия в процессе расширения $p^2V = \text{const}$. Начальную и конечную температуры T_1 и T_2 можно считать известными. Сделайте физический рисунок.

Решение. Приращения давления Δp , объема ΔV и температуры ΔT связаны уравнениями: $(p + \Delta p)^2(V + \Delta V) = p^2V$ и $(p + \Delta p)(V + \Delta V) = \nu R(T + \Delta T)$. Раскрыв скобки и пренебрегая слагаемыми второго и третьего порядков малости ($2p\Delta p\Delta V$, $\Delta p^2\Delta V$, Δp^2V , $\Delta p\Delta V$), получим $p\Delta V = 2\nu R\Delta T$. Согласно определению теплоемкости и первому началу термодинамики

$$\nu C\Delta T = \nu C_V\Delta T + p\Delta V = (C_V + 2R)\nu\Delta T,$$

следовательно, $C = C_V + 2R$. Для одноатомного газа-гелия $C_V = 3R/2$ и $C = 7R/2$. Из первого начала термодинамики следует

$$A = Q - \Delta U = 2\nu R(T_2 - T_1).$$

Ответ: $C = 7R/2$, $A = 2\nu R(T_2 - T_1)$.

Задача 13. Один моль идеального газа расширяется по закону $p = a/T$. Конечный объем газа в 4 раза больше начального. Молярная теплоемкость газа в этом процессе подчиняется закону $C = C_V + 3R$, где C_V — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме. Какую работу совершает газ в этом процессе, если его начальный объем $V_1 = 0,5$ л и $a = 33,2$ Дж·К/м³? Сделайте физический рисунок.

Решение. Попытка свести работу к площади (не зная правил интегрирования) к ответу не приводит, так как в диаграмме (p , V) зависимость представляется линией $p^2 = \nu a R/V$ (получите зависимость самостоятельно). Из первого начала термодинамики следует, что $A = Q - \Delta U$. Но $Q = \nu C\Delta T$, $\Delta U = \nu C_V\Delta T$, тогда $A = \nu C\Delta T - \nu C_V\Delta T = 3\nu R\Delta T$. В последнем выражении температуру заменим объемом согласно зависимости $T = \sqrt{aV/\nu R}$ (получите самостоятельно). Таким образом, при $V_2 = 4V_1$ получаем

$$A = 3\nu R \left(\sqrt{\frac{aV_2}{\nu R}} - \sqrt{\frac{aV_1}{\nu R}} \right) = 3\sqrt{a\nu R V_1} \approx 1,1 \text{ Дж.}$$

Ответ: $A \approx 1,1$ Дж.

* * *

В заключение отметим, что приведенные в работе задачи повышенного уровня сложности на законы термодинамики и методы их решения показывают, что при внимательном анализе и осмыслении условий задач для их решения оказывается достаточно материала школьного курса математики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зиятдинов Ш. Г. Газовые законы. Основы термодинамики. Нетрадиционные систематизирующие задачи // «Физика». Приложение к газете «Первое сентября». — 1998. — № 35. — С. 5–11.
2. Зиятдинов Ш. Г. Еще раз о КПД тепловых машин // Физика в школе. — 2015. — № 3. — С. 20–25.
3. Зиятдинов Ш. Г. Об одной задаче на КПД тепловых двигателей // Учитель Башкортостана. — 2023. — № 4. — С. 84–86.
4. Кабардин О. Ф., Орлов В. А., Зильберман А. Р. Физика. Задачник 9–11 кл.: Пособие для общеобразовательных учеб. заведений. — М.: Дрофа, 2012. — 352 с.
5. Каменецкий С. Е., Пурышева Н. С., Носова Т. И. Теория и методика обучения физике в школе. Частные вопросы: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений. — М.: Академия, 2000. — 384 с.
6. Касьянов В. А. Физика. Базовый уровень. 10 класс. Учебник. — М.: Дрофа, 2019. — 287 с.
7. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Сотский Н. Н. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень. — М.: Просвещение, 2010. — 366 с.
8. Саранин В. А. Изотерма или адиабата? // Учебная физика. — 2021. — № 1. — С. 29–30.
9. Орлов В. А. О решении одной термодинамической задачи // Физика в школе. — 1995. — № 6. — С. 61–63.

Уфимский университет
науки и технологий

Поступила в редакцию 04.06.24.