

**В.И. Портнов**

**Методические рекомендации  
к выполнению конкурсных заданий по физике  
теоретического этапа Московского конкурса межпредметных навыков и  
знаний «Интеллектуальный мегаполис. Потенциал» в номинации  
«Кадетский класс» по направлению «Защита населения и территорий от  
чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (МЧС)»,  
ВКС, СВ, ПВО, РВСН, ВМФ»**

**МОСКВА 2024**

## Оглавление

Введение.....	3
1 Особенности задач по термодинамике .....	4
1.1 0-е начало термодинамики. Температура.....	4
1.2 Уравнения состояния.....	5
2 Газовые законы.....	6
2.1 Уравнение Менделеева-Клапейрона и закон Дальтона.....	6
2.2 $p$ - $V$ и другие диаграммы.....	7
2.3 Равновесные процессы в идеальном газе .....	8
2.4 Неравновесные процессы и их критерии .....	8
2.5 Внутренняя энергия идеального газа.....	10
2.6 Работа и передаваемое тепло. 1-е начало термодинамики.....	10
2.7 Тепловая машина и её КПД .....	11
2.8 Адиабата. Цикл Карно .....	12
2.9 Холодильник. Тепловой насос.....	13
3 Решение демонстрационного варианта (задача продвинутого уровня).....	14
4 Твёрдые и жидкие тела.....	15
4.1 Уравнение состояния для жидкости. Модуль всестороннего сжатия... ..	16
4.2 Тепловое расширение - аналог процесса Гей-Люссака .....	16
4.3 Особенности теплового расширения твёрдых тел .....	17
5 Теплопроводность. Потоки тепла .....	17
5.1 Условия теплового равновесия.....	18
6 Решение демонстрационного варианта (задача базового уровня).....	18
Заключение .....	20

## Введение

Данные методические рекомендации предназначены для подготовки к выполнению конкурсных заданий по физике теоретического этапа Московского конкурса межпредметных навыков и знаний «Интеллектуальный мегаполис. Потенциал» в номинации «*Кадетский класс*» по направлению «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (МЧС)», ВКС, СВ, ПВО, РВСН, ВМФ».

Рассматривается необходимый теоретический минимум для решения конкурсных задач по физике. Методические рекомендации сопровождаются решением примеров.

В методических рекомендациях приведён разбор решения демонстрационного варианта задания по физике.

Предполагается ознакомление обучающегося с темами: термодинамика конденсированного состояния, газовые законы и тепловые машины, тепловые потоки, законы сохранения и условия равновесия в механике.

## 1 Особенности задач по термодинамике

Исторически термодинамика появилась в результате грандиозной научно-технической революции, поменявшей взгляд человечества на глубинные свойства мироздания. Благодаря появлению тепловых машин в начале XIX в., человечество стало существенно богаче, причём даже не столько материально, сколько идейно. По сути, термодинамика вызвала из небытия 3 понятия – о том, что существует энергия хаотического (теплового) движения, о необратимости большинства процессов, происходящих в природе, и о состоянии равновесия, к которому стремятся все изолированные системы.

Условно термодинамика может быть разделена на 2 логически дополняющих друг друга части. Это, во-первых, феноменологическая термодинамика (ФТ), а во-вторых, - молекулярно-кинетическая теория (МКТ). Основное внимание мы будем уделять ФТ, беря из МКТ, как правило, только справочные сведения. ФТ 1) не рассматривает атомную структуру материи; 2) использует величины, которые определяются только для макроскопической системы, 3) построение теории основывается на известных опытных данных, 4) свойства вещества в рамках ФТ выражаются в форме характеристических параметров (плотность, вязкость, теплоёмкость, теплопроводность, и т.д.).

### 1.1 0-е начало термодинамики. Температура

Как и 1-й закон Ньютона, 0-е начало термодинамики всего лишь постулирует возможность существования некоторого состояния, которое мы назовём термодинамическим равновесием. Существует единственная физическая величина, которая обязана быть одинаковой во всех частях системы, находящейся в термодинамическом равновесии. Это температура. При различии температур в различных областях системы, возникают тепловые потоки, которые выражают стремление системы к равновесию. Поэтому, если система замкнута, то рано или поздно система приблизится к тепловому равновесию.

Надо отметить, что способы измерения температуры различны в разных интервалах температур. Важно, что интервалы применения различных методов пересекаются, что даёт нам возможность построить единую шкалу температур.

## 1.2 Уравнения состояния

Связи между различными макроскопическими характеристиками вещества называются уравнениями состояния. Для достаточно сложных систем таких уравнений может быть много. Особенно это касается многокомпонентных систем, в которых могут происходить различные реакции (например, химические). Однородная однокомпонентная система обладает только тремя независимыми макропараметрами, например, давлением, объёмом и температурой. Вместо объёма можно взять плотность, вместо температуры – энергию. Здесь надо понимать, что есть так называемые экстенсивные (глобальные) и интенсивные (локальные) величины. Глобальными являются объём, масса, число молей, энергия и т.д. Локальными – температура, давление, плотность, молярная плотность.

Надо сказать, что уравнения состояния бывают разными. Например, уравнение Ван-дер-Ваальса качественно описывает вещество, которое может переходить из жидкого состояния в парообразное и обратно. Это уравнение исследовать довольно сложно, однако, жидкое вещество вполне можно описать в некотором ограниченном интервале температур и давлений. Это мы сделаем в 3-м разделе.

## 2 Газовые законы

Исследование идеальных газов (почти все химически стабильные газы по свойствам близки к идеальным) привело к установлению абсолютного нуля температуры. В частности, линейность зависимости давления от температуры в законе Шарля переходит в закон прямой пропорциональности при переходе к абсолютным температурам.

Перечислим основные газовые законы, из которых получилась термодинамика газов:

Бойля-Мариотта	$pV = \text{const}$	при	$T = \text{const}$
Гей-Люссака	$V/T = \text{const}$	при	$p = \text{const}$
Шарля	$p/T = \text{const}$	при	$V = \text{const}$
Дальтона	$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$		

Подробное описание этих законов, а также закон адиабатический мы рассмотрим ниже.

### 2.1 Уравнение Менделеева-Клапейрона и закон Дальтона

Объединяя законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля, мы получим уравнение Клапейрона  $pV/T = \text{const}$ , которое Менделеев довёл до совершенного вида  $pV = m/\mu RT$ . Отношение  $m/\mu$  равно числу молей и часто обозначают буквой  $\nu$  (ню). Универсальная газовая постоянная  $R = kN_A$ , где  $k$  – константа Больцмана,  $N_A$  – число Авогадро.

Закон Дальтона даёт нам возможность судить о свойствах смесей газов. В отличие от жидкостей и твёрдых тел газы абсолютно растворяются друг в друге. При этом складываются все локально аддитивные интенсивные величины, а именно плотности, давления, теплоёмкости. Последнее особенно важно для определения адиабатического процесса в смесях газов. Интересно, что складываются также электростатическая поляризуемость для непроводящих разреженных газов.

## 2.2 p-V и другие диаграммы

На диаграмме «Vp» V означает абсциссу, а p – ординату. На остальных диаграммах – аналогично, вторая буква заголовка означает ординату (рис. 1).

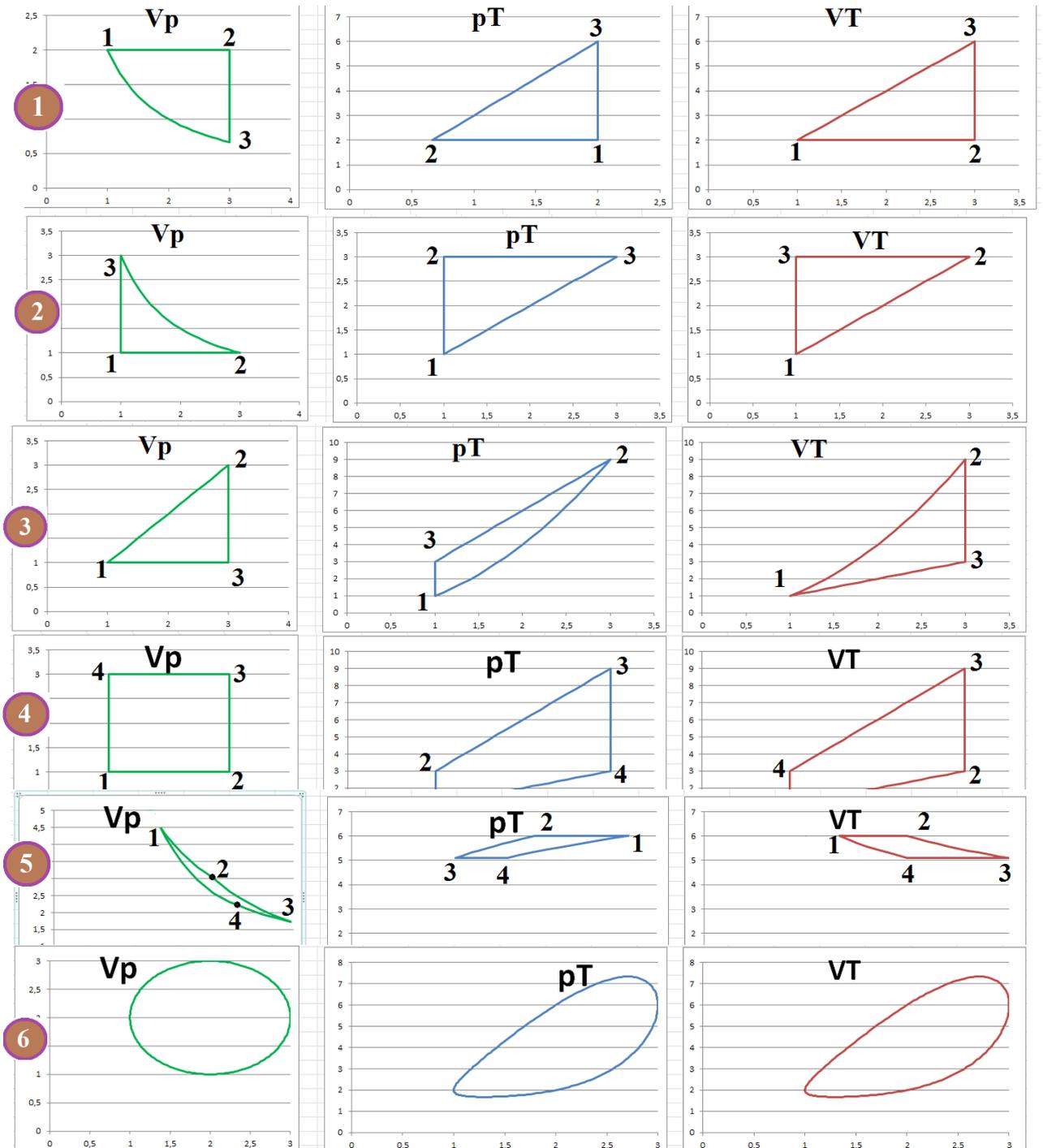


Рис. 1 Диаграммы

Задача учащегося – научиться строить графики разных процессов в разных осях. Предлагаем подробно разобрать предложенные процессы и по-

строить похожие самостоятельно.

### 2.3 Равновесные процессы в идеальном газе

Процесс является равновесным, если все промежуточные состояния являются стационарными состояниями (рис. 2), то есть имеют определённые значения давления, плотности, температуры и т.д.

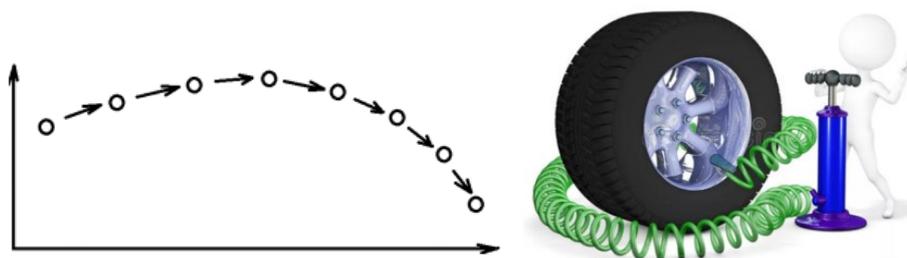


Рис. 2 Равновесный процесс

Критерием стационарности процессов может быть взята малость скорости движения частей установки (поршня, стенок и т.п.) по сравнению со скоростью звука в среде. Поэтому процесс, скажем, надувания колеса насосом вполне можно считать равновесным.

### 2.4 Неравновесные процессы и их критерии

Приведём список неравновесных явлений, которые могут проходить в газах:

- любые предметы, движущиеся в газе со значительной скоростью
- струи и потоки любого происхождения
- все виды химических (или ядерных) реакций и превращений
- любые тепловые потоки
- электрические токи любого происхождения
- ударные волны
- волны разрежения

Примером неравновесного процесса, который встречается в задачах по

термодинамике, является разрыв мембраны посреди сосуда (рис. 3).

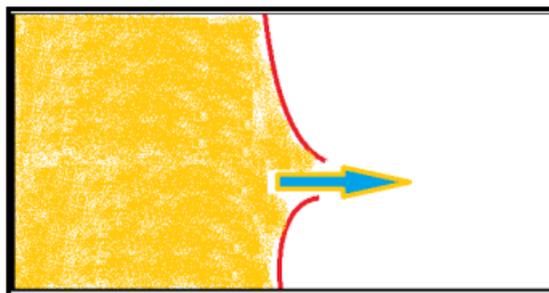


Рис. 3 Неравновесный процесс

Изменения, произошедшие с газом, соответствуют изотермическому процессу, однако работу газ *не совершает*.

## 2.5 Внутренняя энергия идеального газа

В этом месте необходимо вспомнить, что температура (помноженная на половину константы Больцмана) есть мера средней кинетической энергии, приходящейся на одну степень свободы. Если обозначить степень свободы одной молекулы  $i$ , то средняя кинетическая энергия молекул будет равна  $ikT/2$ . В случае, если у молекул имеются колебательные степени свободы, каждая такая степень свободы считается за 2, потому что средняя потенциальная энергия колебаний равна средней кинетической (если колебания гармонические).

Переходя от одиночной молекулы к газу массы  $m$ , получим выражение для внутренней энергии  $U = i/2 \nu RT$ . Теплоёмкость при постоянном объёме  $C_V = 1/2 i \nu R$ . Теплоёмкость при постоянном давлении  $C_p = 1/2 (i+2) \nu R$ . При рассмотрении смеси газов теплоёмкости равны

$$C_V = 1/2 \sum_n (i_n \nu_n) R \quad \text{и} \quad C_p = 1/2 \sum_n ((i_n+2) \nu_n) R$$

## 2.6 Работа и передаваемое тепло. 1-е начало термодинамики

Работа газа над внешней средой описывается достаточно просто как произведение силы давления на перемещение поршня  $A = F\Delta h$ . С учётом площади поршня  $S$ , запишем эту формулу как  $A = p\Delta V$ . В более сложных случаях работа равна площади под графиком процесса на диаграмме  $Vp$ . Или, как её чаще называют,  $p$ - $V$  диаграмме. На рисунке 4 показаны диаграммы для различных процессов. **1** – изохорный процесс, в котором механическая работа не совершается, **2** – изобарный процесс, **3** – изотермический процесс, **4** – адиабатический процесс.

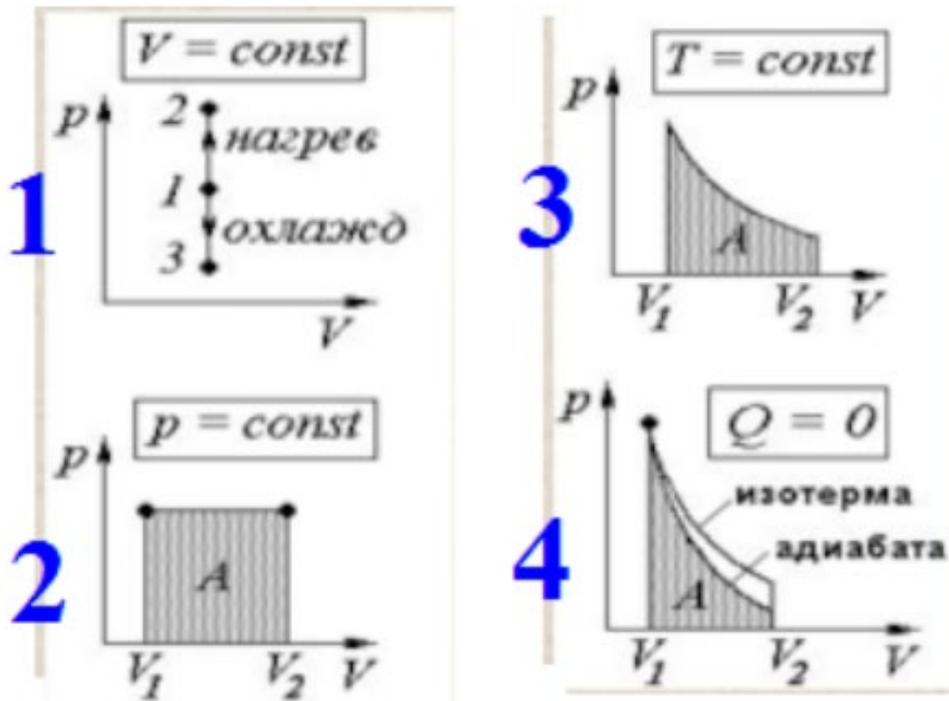


Рис. 4 Диаграммы различных процессов

Переданное тепло можно найти из формулы 1-го начала термодинамики, которая есть не что иное, как закон сохранения энергии:  $Q = \Delta U + A$ . Тогда можно кое-что сказать об особенностях процессов. Изотермический процесс для идеальных газов сохраняет неизменной внутреннюю энергию, Адиабатический процесс совершается без теплопередачи (это для любых, не только идеальных газов).

## 2.7 Тепловая машина и её КПД

Цикл тепловой машины может быть представлен на диаграмме **Vp** замкнутой кривой (рис. 5). В принципе замкнутая кривая получается на любой диаграмме, однако на **Vp** – диаграмме площадь внутри этой кривой равна совершаемой газом полезной работе. Часть цикла газ получает тепло от внешнего источника, а часть – передаёт тепло во вне.

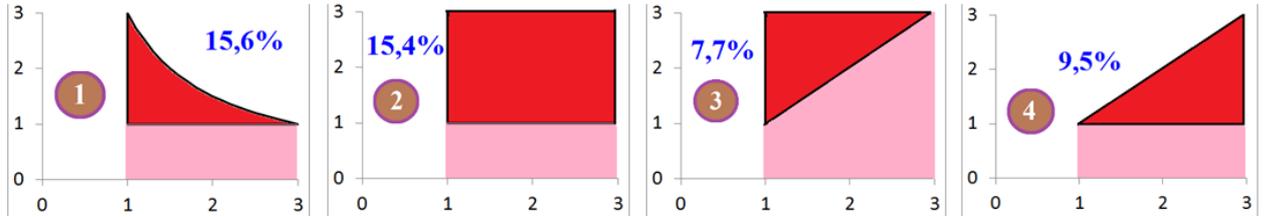


Рис. 5 Цикл тепловой машины

Часть цикла газ совершает работу, а часть – работа совершается над ним. Мы вынуждены смириться с тем, что часть работы теряется, потому что нам необходимо вернуть тепловую машину в исходное состояние. Мы также смиряемся с тем, что часть тепловой энергии уходит в окружающую среду и, тем самым, КПД машины оказывается жёстко ограниченным.

Приведём несколько конкретных примеров расчёта КПД цикла для двухатомного газа. На верхней диаграмме представлен процесс, состоящий из изотермы, изохоры и изобары. Полезная работа закрашена ярко-красным. Работа, которую механизм должен совершить над газом, чтобы вернуть его в исходное сжатое состояние, закрашена розовым. Коэффициент полезного действия представлен цифрами на диаграмме. Для вычисления теплоты в процессах на диаграмме полезно знать формулу для внутренней энергии  $U = i/2 \nu RT = i/2 pV$ . Работа изотермического процесса может быть вычислена по формуле  $A = p_1 V_1 \ln(V_2/V_1)$ .

## 2.8 Адиабата. Цикл Карно

Адиабата – это супергипербола с показателями, пропорциональными теплоёмкостям. Численно это может быть записано как  $p^{C_V} \cdot V^{C_P} = \text{const}$ . Для смеси газов с различным числом степеней свободы молекул отношение показателей может быть самым разным, но не больше 1,67. У элегаза (гексафторид серы  $\text{SF}_6$ ) эффективное число степеней свободы  $i = 36$ , поэтому отношение показателей равно 1,0556. Цикл Карно, состоящий из двух изотерм

и двух адиабат, имеет максимальный КПД из всех возможных с фиксированными температурами нагревателя ( $T_1$ ) и охладителя ( $T_2$ ) и равен  $1 - (T_2/T_1)$ . На рисунке 6 (чёрные линии – изотермы, красные – адиабаты) показан цикл Карно для 2-атомного газа.

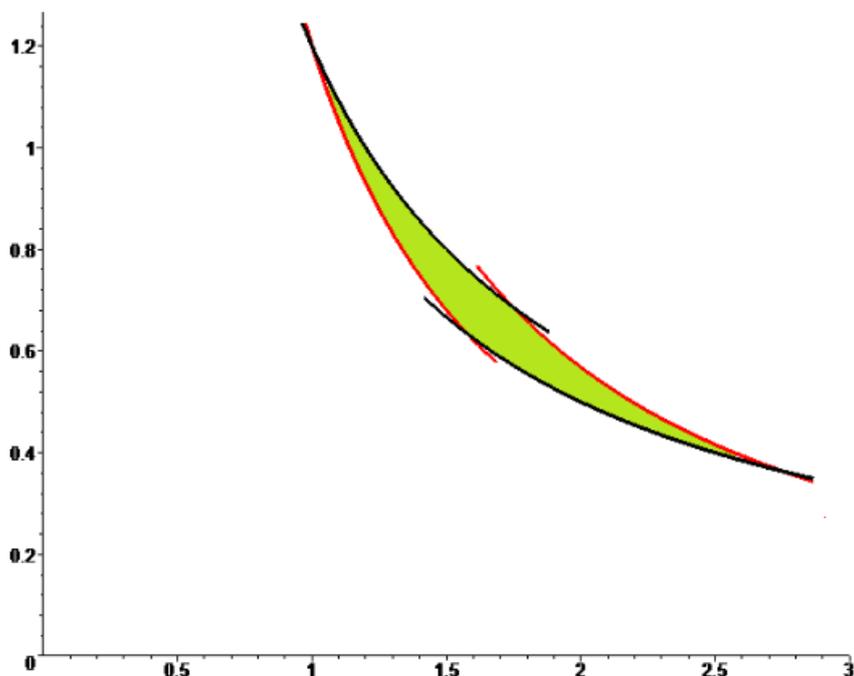


Рис. 6

Иногда удобнее газové процессы представлять на диаграмме в логарифмическом масштабе – тогда адиабата будет представляться прямой линией.

## 2.9 Холодильник. Тепловой насос

Холодильный цикл на  $Vp$  диаграмме идёт против часовой стрелки. Холодильный коэффициент  $k_x = Q_2/(Q_1 - Q_2) = Q_2/(A_1 - A_2)$ . В уже упомянутом выше процессе на рисунке 7, запущенном в обратную сторону, мы получим холодильный коэффициент  $k_x = 5,5$  (550%).

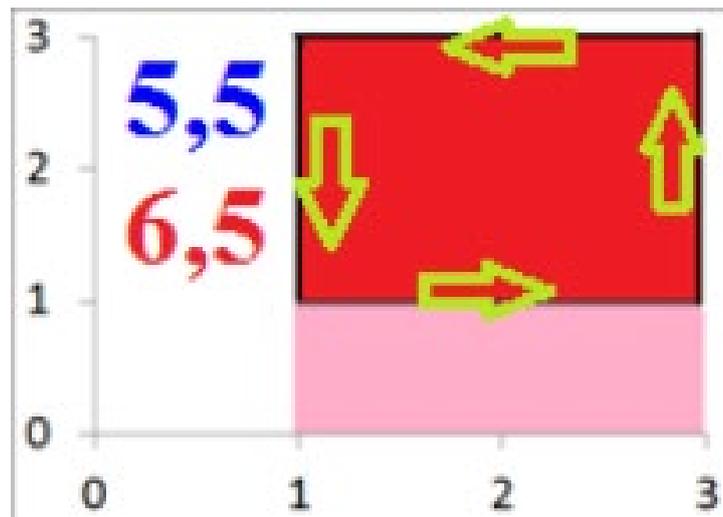
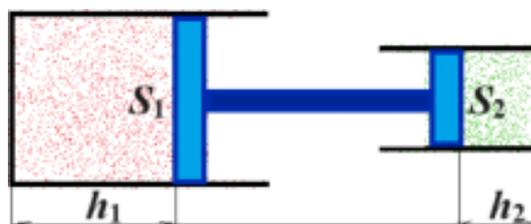


Рис. 7 Холодильный цикл

В холодильнике главное – это холодильная камера, из которой надо всё время отбирать тепло. Тепловые насосы отличаются от холодильников только акцентом на тёплое помещение, которое надо постоянно обогревать. Нагревательный коэффициент теплового насоса  $k_{mn} = Q_1/(Q_1 - Q_2) = Q_1/(A_1 - A_2)$ . Для рассматриваемого процесса  $k_{mn} = 6,5$  (650%).

### 3 Решение демонстрационного варианта (задача продвинутого уровня)

Два коаксиально расположенных цилиндра закреплены как показано на рисунке.



В каждом из цилиндров может двигаться поршень, причём поршни имеют площади  $S_1 = 0,04 \text{ м}^2$  и  $S_2 = 0,01 \text{ м}^2$  и соединены жёстким стержнем постоянной длины. Рабочие высоты цилиндров (т.е. расстояния от поршня до противоположного дна) обозначены как  $h_1$  и  $h_2$ . Из-за жёсткости стержня

поршни могут двигаться только с сохранением суммы рабочих высот ( $h_1 + h_2 = H = 1$  м). В цилиндрах находятся одноатомные газы в количестве  $\nu_1 = 15$  и  $\nu_2 = 20$  моль при температурах  $T_1$  (неизвестна) и  $T_2 = 300$  К. В начальный момент 1-й цилиндр начинают медленно нагревать с помощью электромагнитного поля до температуры  $T = 450$  К. Определить начальную температуру первого цилиндра  $T_1$ , если цилиндры теплоизолированы друг от друга и от окружающей среды (окружающую среду можно считать вакуумом). Конечная температура 2-го цилиндра  $T_f = 432$  К. Ответ дать в °К и округлить до целых.

Примечание: Закон адиабатического процесса для одноатомного газа во втором цилиндре может быть записан в виде:  $p^3 V^5 = \text{const}$

**Решение.** 1) Закон адиабатического процесса может быть записан в следующих видах:  $p^3 V^5 = \text{const}$ ,  $T^3 V^2 = \text{const}$  и  $T^5/p^2 = \text{const}$ . Поскольку температура увеличилась в  $432/300 = (6/5)^2$  раз, объём уменьшился в  $(6/5)^3$  раз, то есть  $h_2/h_2' = 216/125$ .

2) Равновесие поршней в любой момент даёт нам уравнения

$$p_2 = 4 p_1 \quad \text{и} \quad p_2' = 4 p_1' .$$

3) Надо записать уравнения Менделеева-Клапейрона для всех начальных и конечных состояний:  $p_1 S_1 h_1 / T_1 \nu_1 = p_2 S_2 h_2 / T_2 \nu_2$ .  $\Rightarrow h_1 / T_1 \nu_1 = h_2 / T_2 \nu_2$ .  
 $\Rightarrow 20 h_1 / T_1 = 15 h_2 / T_2$ .  $\Rightarrow T_1 = 20 \cdot 300 / 15 \cdot h_1 / h_2 = 400 \cdot h_1 / h_2$ .

Для конечного состояния получается аналогично:  $20 h_1' / T = 15 h_2' / T_f$ .  
 Т.е.  $8640 h_1' = 6750 h_2'$   $\Rightarrow$  (т.к.  $h_1' + h_2' = 1$ )  $h_2' = 32/57$ .  
 $\Rightarrow h_2 = 32/57 \cdot 216/125 = 2304/2375$ .  $\Rightarrow h_1 = 71/2375$  ;  
 $T_1 = 400 \cdot h_1 / h_2 = 400 \cdot 71/2304 = 12,33$  К

Ответ: 12

#### 4 Твёрдые и жидкие тела

Твёрдое и жидкое состояния материи сильно отличается от газообраз-

ного. Прежде всего отметим, что такие состояния являются конденсированными. Их плотности на порядки превосходят характерные плотности газов. Настоящее уравнение состояния конденсированных тел очень сложно, поэтому приходится рассматривать такие тела в узком интервале температур и давлений. Нам будет интересна зависимость объёма (или линейных размеров) от давления и температуры. Рассмотрим сначала жидкое состояние.

#### 4.1 Уравнение состояния для жидкости. Модуль всестороннего сжатия

Жидкость не имеет определённой формы. Об изменении объёма под воздействием внешнего давления можно говорить только как об относительном изменении, причём весьма малом. Зависимость объёма от внешнего давления определяется модулем всестороннего сжатия  $K$ :  $-K\Delta V/V = p$ .

Минус в формуле означает, что под давлением объём уменьшается. В таблице 1 приведены модули всестороннего сжатия для некоторых жидкостей.

Таблица 1 Модули всестороннего сжатия

Жидкость	$K$ , ГПа		Жидкость	$K$ , ГПа
Ацетон	0.78740		Керосин	1.21951
Бензол	1.03093		Ртуть	26.31579
Вода дистил.	2.12766		Этил. спирт	0.85470
Глицерин	4.54545		Эфир	0.69930

Зависимость объёма от давления выполняет ту же функцию для жидкости, что и закон Бойля-Мариотта для газов. Зная хотя бы ещё один закон (например, аналог закона Гей-Люссака), мы сможем построить уравнение состояния жидкости хотя бы в некотором интервале внешних параметров.

#### 4.2 Тепловое расширение - аналог процесса Гей-Люссака

Относительное увеличение объёма при изменении температуры описы-

вается формулой  $\Delta V/V = \beta \Delta T$ . Это уравнение предполагает постоянство давления, поэтому оно и является аналогом закона Гей-Люсака. При этом благодаря малости относительного изменения объёма можно считать, что изменения объёма благодаря действию давления и изменению температуры осуществляется независимо, получаем искомое уравнение состояния:

$$p = K(\beta \Delta T - \Delta V/V)$$

### 4.3 Особенности теплового расширения твёрдых тел

Твёрдые тела сохраняют форму, поэтому при тепловом расширении сохраняют свои пропорции. Поэтому при расширении твёрдых тел используют коэффициент линейного расширения  $\alpha$  вместо  $\beta$ . Впрочем, эти коэффициенты связаны формулой  $\beta = 3\alpha$ . Любой элемент тела расширяется, сохраняя при этом подобие  $\Delta \ell/\ell = \alpha \Delta T$ . Перемещение выбранной точки тела зависит от места (точки) закрепления тела. Поэтому если тело однородное, то его равновесие при нагревании не будет нарушаться. Однако, если тело состоит из частей с разным коэффициентом линейного расширения, то возможны сильные изменения как формы (случай биметаллической пластины), так и общей конфигурации.

## 5 Теплопроводность. Потоки тепла

Как известно, существует 3 основных видов переноса тепла.

**Теплопроводность.** Поток тепла пропорционален разности температур между телами, соединёнными твёрдыми конструкциями. Коэффициент теплопроводности растёт с ростом температуры, однако гораздо медленнее, чем для остальных видов теплообмена.

**Конвекция.** Потоки тепла значительно интенсивнее (в миллионы раз), когда они сопряжены с механическими потоками. Механические потоки могут быть естественными (от форточки вверху комнаты или от батареи внизу)

и искусственными (вентилятор, магнитная крутящаяся мешалка и т.д.). В некоторых случаях возникают особые ситуации (как например, на дне океана устанавливается температура  $4^{\circ}\text{C}$ , соответствующая максимуму плотности воды).

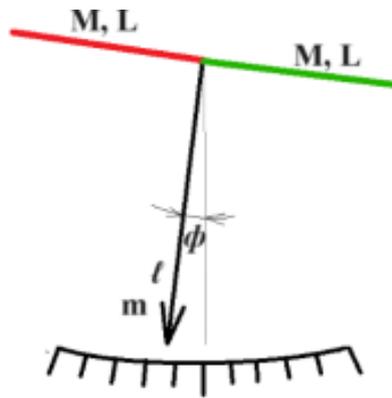
**Излучение.** Пропорционально 4й степени абсолютной температуры, Поэтому, чем больше температура, тем излучение существеннее. Зависит также от окрашенности поверхности. Известно, что в чёрной шубе днём теплее, потому что она хорошо поглощает солнечные лучи. Однако не все знают, что ночью белая шуба значительно теплее, потому что коэффициент отражения работает в обе стороны. То есть, если шуба отражает солнечные лучи, идущие снаружи вовнутрь, то она же отражает и лучи, идущие изнутри наружу, которые могли бы привести к охлаждению всей системы.

### **5.1 Условия теплового равновесия**

Условия стационарности теплового состояния необходимо записывать отдельно для каждого вида потоков. Однако стационарность состояния не означает теплового равновесия. Тепловое равновесие подразумевает полное отсутствие тепловых потоков, то есть равенство температур в каждой точке системы.

## **6 Решение демонстрационного варианта (задача базового уровня)**

Механический термометр устроен как показано на рисунке.



Тяжёлый прямой стержень состоит из двух частей одинаковой массы  $M = 1$  кг. Длина каждой части равна  $L = 50$  см при  $0^\circ\text{C}$ , однако состоят из разных материалов с разными коэффициентами линейного расширения ( $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-6}$  [1/ $^\circ\text{C}$ ] – левая (красная) часть и  $\alpha_2 = 20 \cdot 10^{-6}$  [1/ $^\circ\text{C}$ ] – правая (зелёная). Уравновешивает систему стрелка массы  $m = 1$  г (стрелку и каждую из частей стержня можно считать однородными цилиндрами). Длина стрелки  $l = 50$  см, её удлинением с ростом температуры можно пренебречь. Найти отклонение конца стрелки от вертикали в см при температуре  $t = 5^\circ\text{C}$ . Ответ округлить до целых.

$\alpha_2 - \alpha_1) t$ . С учётом возможного поворота всей системы на угол  $\varphi$ , можно записать условие равновесия как равенство нулю суммы моментов сил тяжести относительно точки подвеса. Итак,  $2Mg \cdot \frac{1}{4}L(\alpha_2 - \alpha_1) t \cos \varphi = mg \cdot \frac{1}{2} l \sin \varphi$ .

Из последнего уравнения получаем  $x = l \operatorname{tg} \varphi = \frac{ML}{m} (\alpha_2 - \alpha_1) t = 4$  мм.

Ответ: 4

## Заключение

В методических рекомендациях для подготовки к выполнению конкурсных заданий по физике теоретического этапа Московского конкурса межпредметных навыков и знаний «Интеллектуальный мегаполис. Потенциал» в номинации «Кадетский класс» по направлению «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (МЧС)», ВКС, СВ, ПВО, РВСН, ВМФ» рассмотрен теоретический минимум для решения конкурсных задач.

Приведен теоретический материал по ознакомлению с термодинамикой конденсированного состояния, газовыми законами и тепловыми машинами, тепловыми потоками, законами сохранения и условиями равновесия в механике. Разобран демонстрационный вариант задания.