

## ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

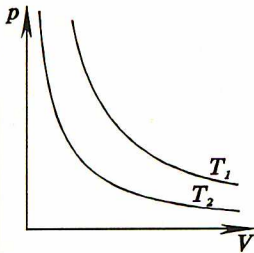
1. На рисунках изображены изопроцессы, происходящие с идеальным газом одной и той же массы.

а) Какая изотерма соответствует большей температуре?

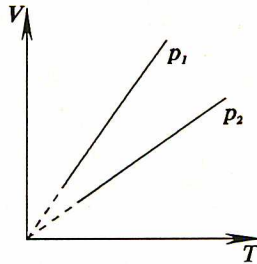
б) Какая изобара соответствует большему давлению?

в) Какая изохора соответствует большему объему?

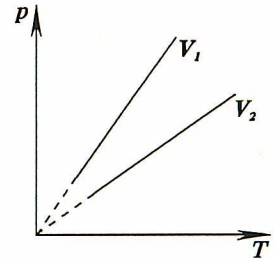
а)



б)

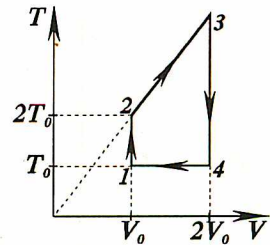


в)



2. На рисунке в координатах  $V-T$  изображен циклический процесс, происходящий с некоторым количеством идеального газа. Изобразите тот же процесс в координатах  $p-V$  и  $p-T$ .

3. Используя газовые законы, выведите уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона)  $f(p, V, T) = \text{const}$ , т.е. найдите функцию  $f(p, V, T)$ , сохраняющую постоянное значение при любых процессах, происходящих с идеальным газом. Нужны ли для этого все три газовых закона?

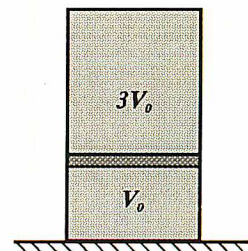


4. (Только после сданной задачи  $N 3$  !) Узнайте у преподавателя, что такое универсальная газовая постоянная. Выведите уравнение, связывающее давление идеального газа с его объемом, температурой и массой (уравнение Менделеева-Клапейрона).

Указание (наводящий вопрос). Как зависит объем газа от его массы при постоянных давлении и температуре?

5. Чтобы изотермически уменьшить объем газа в цилиндре с поршнем в  $n$  раз, на поршень положили груз массы  $m$ . Какой массы груз следует добавить, чтобы объем газа изотермически уменьшился еще в  $k$  раз?

6. В цилиндрическом сосуде с газом находится в равновесии тяжелый поршень. Масса газа и его температура над поршнем и под ним одинаковы. Отношение внутреннего объема верхней части сосуда к внутреннему объему нижней равно 3. Каким будет это соотношение, если температуру газа увеличить в два раза?



7. На поверхности жидкости плотности  $\rho_0$  плавает цилиндрический тонкостенный стакан (пустой), наполовину погруженный в жидкость.

а) На сколько погрузится стакан в жидкость, если его поставить на поверхность жидкости вверх дном? Высота стакана  $H$ , давление воздуха  $p_0$ .

б) На какую глубину нужно погрузить перевернутый вверх дном стакан, чтобы он вместе с заключенным в нем воздухом пошел ко дну?

8. Абсолютно жесткая цилиндрическая банка заполнена абсолютно несжимаемой жидкостью. В жидкости имеется пузырек воздуха, который изначально находится у дна банки (банка расположена вертикально). На сколько изменится давление в жидкости при всплывании пузырька, если температура воздуха в нем остается постоянной? Высота банки  $H$ , плотность жидкости  $\rho$ .

## ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ - 1.

1. При нагревании газа, находящегося в цилиндре, закрытом подвижным поршнем, его объем изменился на  $\Delta V$ . Давление  $p$  оставалось при этом постоянным. Найдите работу, которую совершил газ над поршнем. Какую работу совершил поршень над газом?

2. Объем газа, находящегося в воздушном шарике, изменился на  $\Delta V$ . Давление  $p$  оставалось при этом постоянным. Найдите работу, которую газ совершил над оболочкой шарика.

3. Объем газа изменился от  $V_1$  до  $V_2$ . Давление при этом изменялось по известному закону  $p(V)$ . Найдите работу, совершенную газом над внешними телами.

4.а) Одинаковые количества одного и того же газа находятся в цилиндрах разного объема. Их нагревают одинаковыми нагревателями. Объем цилиндров при этом не меняется. Какой из газов нагревается быстрее? Все тепло, выделяемое нагревателем, достается газу.

б) Тот же вопрос, если один газ находится в цилиндре постоянного объема, а другой - в вертикальном цилиндре, закрытом подвижным поршнем.

в) Тот же вопрос, если газы находятся в вертикальных цилиндрах, закрытых подвижными поршнями разной массы.

5. Найдите молярную теплоемкость одноатомного идеального газа в процессе, при котором тепло передается газу

- а) изохорически ( $C_v$ )
- б) изобарически ( $C_p$ )
- в) изотермически.

6. Один моль идеального одноатомного газа расширяется так, что его давление прямо пропорционально объему:  $p = aV$ . Найдите теплоемкость газа в таком процессе. Придумайте простое устройство, в котором возможен такой процесс.

7. Как будет меняться внутренняя энергия воздуха, находящегося в комнате с открытой форточкой, после включения отопления?

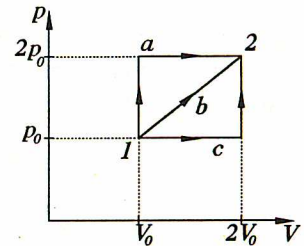
8. Адиабатическим (адиабатным) называется процесс, при котором теплообмен тела с окружающими телами отсутствует. График соответствующей зависимости одного термодинамического параметра от другого называется адиабатой. Нарисуйте в координатах  $p - V$  адиабату идеального газа (качественно). Как идет эта кривая - круче или положе, чем изотермы?

9\* Найдите зависимость давления идеального газа от объема в адиабатическом процессе.



## ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ - 2.

1! Один моль идеального одноатомного газа переходит из состояния 1 в состояние 2 по одному из трех путей, показанных на рисунке. Найдите работу, совершенную газом, и количество теплоты, полученной им, для каждого из путей перехода. Можно ли совершить переход из 1 в 2 так, чтобы количество полученной газом теплоты было отрицательно (т.е. чтобы газ в результате отдал теплоту)?



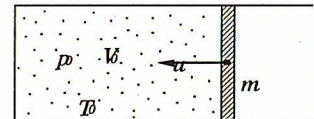
2! Можно ли в предыдущей задаче совершить переход из 1 в 2 так, чтобы газ отдавал теплоту на каждом участке процесса?

3. Идеальный газ из состояния с объемом  $V_0$  и давлением  $p_0$  изотермически переходит в состояние с объемом  $V$ . Найдите работу, совершенную газом, и количество тепла, полученного им.

4. Одноатомный идеальный газ медленно прокачивают через змеевик (длинную трубку). Давления на входе и выходе змеевика равны соответственно  $p_1$  и  $p_2$ , температуры  $T_1$  и  $T_2$ . Найдите работу, которую совершает 1 моль газа при прохождении через змеевик и количество теплоты, отдаваемой им.

5. В объеме  $V_1$  находится одноатомный газ при давлении  $p_1$  и температуре  $T_1$ , а в объеме  $V_2$  - тот же газ при давлении  $p_2$  и температуре  $T_2$ . Объемы теплоизолированы от окружающего пространства. Их соединяют тонкой трубкой. Какие из величин, характеризующих газ, останутся при этом постоянными? Каковы будут давление и температура газа после соединения?

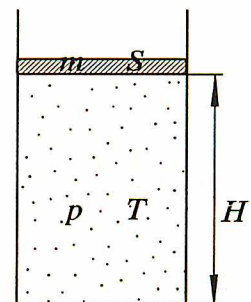
6. Поршень массы  $m$ , замыкающий объем  $V_0$  одноатомного идеального газа при давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$ , движется со скоростью  $u$ . Снаружи - вакуум. Определите температуру и объем газа при максимальном сжатии, если система теплоизолирована, теплоемкости сосуда и поршня малы (по сравнению с чем?).



7. Тот же вопрос, если температура системы поддерживается постоянной (кстати, как это реально осуществить?).

8. В вакуумном пространстве вертикально стоит цилиндрический сосуд, закрытый сверху подвижным поршнем массы  $m$ . Внутри сосуда находится одноатомный газ при температуре  $T$  и давлении  $p$ . Внутреннее сечение цилиндра  $S$ , а поршень находится на высоте  $H$  над его дном. Поршень отпускают без начальной скорости. Чему равна максимальная скорость, развиваемая поршнем, если газ сжимается поршнем

- адиабатически
- изотермически.

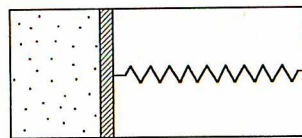


9. Опишите (качественно) дальнейшее движение поршня в предыдущей задаче. Трение между поршнем и стенками цилиндра отсутствует.

10. Пусть в условиях предыдущей задачи между поршнем и стенками имеется очень маленькое трение. Найдите высоту над дном сосуда, на которой остановится поршень после того, как его колебания затухнут. Теплоемкости поршня и цилиндра малы, вся система теплоизолирована. Можно ли в этих условиях считать процессы, происходящие с газом, адиабатическими?

11\* Колебания поршня в задаче 6 обязательно затухнут, даже если трение между поршнем и цилиндром отсутствует. Почему?

12. В расположенном горизонтально цилиндре слева от закрепленного поршня находится идеальный одноатомный газ, а справа - вакуум. Цилиндр теплоизолирован от окружающей среды, а пружина, расположенная между поршнем и стенкой, находится в недеформированном состоянии. Поршень освобождают, и после установления равновесия выясняется, что объем, занимаемый газом, увеличился вдвое. Как изменились при этом температура и давление газа? Теплоемкости цилиндра, поршня и пружины малы.

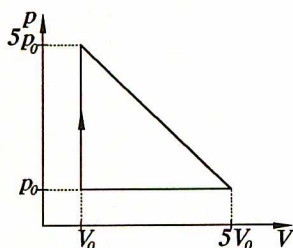
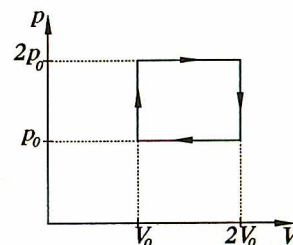


13. Теплоизолированный сосуд с внутренним объемом  $V$  откачан до глубокого вакуума. Окружающий воздух имеет температуру  $T_0$  и давление  $p_0$ . В некоторый момент открывается кран и происходит быстрое заполнение сосуда атмосферным воздухом. Какую температуру будет иметь воздух в сосуде после его заполнения?



## ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ.

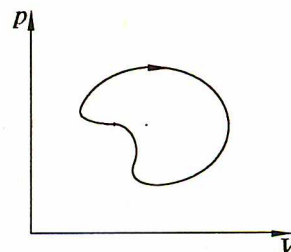
1! Найдите коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу, изображенному на рисунке. Рабочим телом машины служит 1 моль идеального одноатомного газа. Найдите также минимальную температуру нагревателя, возможную для этого цикла, и максимальную температуру холодильника. Сравните КПД этой машины с КПД идеальной тепловой машины, работающей с тем же нагревателем и холодильником.



2\* То же задание для цикла, изображенного на рисунке слева.

3! Задача 2 существенно сложнее задачи 1. Почему?

4. Цикл, по которому работает тепловая машина, изображен на рисунке справа. Укажите, как по этому рисунку определить, на каких участках процесса рабочее тело получало тепло, а на каких отдавало, а также как определить минимально возможную температуру нагревателя и максимально возможную температуру холодильника.



5. Два тела имеют одинаковую температуру  $T$ . Возможен ли процесс, единственным результатом которого будет изменение температуры этих тел?

6. Может ли существовать такое вещество, которое можно квазистатически перевести из одного состояния в другое и адиабатически и изотермически, причем промежуточные состояния в этих процессах будут различны (т.е. могут ли изотерма и адиабата некоторого вещества пересекаться в двух различных точках)?

7. Идеальная тепловая машина с известным КПД  $\eta$  работает по обратному циклу (такая машина называется холодильной). Какое количество тепла можно забрать из холодильника, совершив механическую работу  $A$ ?

8. Покажите, что если холодильная машина в предыдущей задаче является неидеальной (температуры нагревателя и холодильника те же), то количество забранного у холодильника тепла при той же затраченной работе будет меньше.

9. Обратимая тепловая машина состоит из рабочего тела и трех тепловых резервуаров с температурами  $T_1 > T_2 > T_3$ . Известно, что за один цикл рабочее тело получает тепло  $Q_2$  от резервуара с температурой  $T_2$  и отдает столько же тепла резервуару с температурой  $T_3$ . Найдите работу, совершаемую машиной за один цикл. Нарисуйте возможный цикл работы машины. Зависит ли ответ от выбора цикла?

10\* Какое максимальное количество механической работы можно получить, имея два тела с температурами  $T_1$  и  $T_2$  и теплоемкостями  $C_1$  и  $C_2$  при условии, что все остальные тела должны по окончании процесса вернуться в исходное состояние? Теплоемкости тел не зависят от температуры. Проведите расчет для 1 кг воды при  $0^\circ\text{C}$  и 1 кг воды при  $100^\circ\text{C}$ .

11\* Известно, что при растворении в воде некоторых веществ (например, гипосульфита) температура раствора понижается. Используя этот раствор в качестве холодильника, а окружающую среду в качестве нагревателя, мы можем получить некоторую работу. Затем, дождавшись высыхания, повторим цикл. Получим ли мы таким образом вечный двигатель второго рода?



## МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

- 1! Как изменится число ударов молекул газа о стенку сосуда за единицу времени, если  
 а) вдвое увеличить концентрацию молекул?  
 б) вдвое увеличить температуру газа?

2! В стенке сосуда с газом, находящегося в большом вакуумном объеме, сделано маленькое отверстие. Как изменится энергия, уносимая молекулами газа через отверстие за единицу времени, если

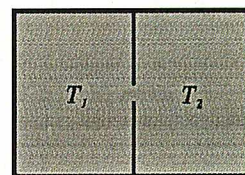
- а) вдвое увеличить концентрацию молекул?  
 б) вдвое увеличить температуру газа?

3! Как в условиях предыдущей задачи будет изменяться температура газа в сосуде со временем, если не оказывать на него никаких внешних воздействий?

4. Сосуд с газом разделен на две части перегородкой, в которой имеется отверстие. В левой части сосуда поддерживается более высокая температура, чем в правой. В какой части сосуда больше

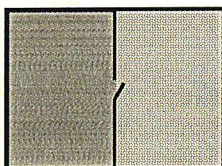
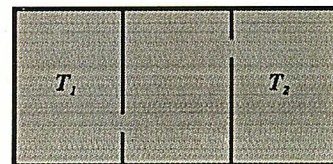
- а) давление газа  
 б) концентрация молекул газа.

Рассмотрите два случая: отверстие большое и отверстие маленькое.



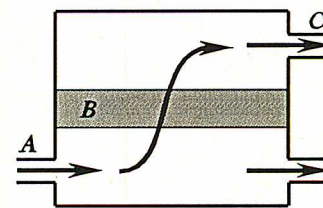
5. В условиях предыдущей задачи для обоих случаев найдите отношение концентраций и давлений газа в разных частях сосуда, если температуры в этих частях равны  $T_1$  и  $T_2$ .

6. Сосуд с газом разделен на три части перегородками, в которых имеются маленькие одинаковые отверстия. В крайних частях поддерживаются температуры  $T_1$  и  $T_2$ . Найдите температуру, которая установится в средней части. Газ в средней части теплоизолирован от внешнего пространства.



7. В левой части сосуда находится смесь гелия с водородом. Парциальные давления гелия и водорода одинаковы. В правой части вакуум. На короткое время в перегородке открывают маленькое отверстие. Определите отношение давления гелия к давлению водорода, которое установится после этого в правой части.

8. Для разделения изотопов урана используется устройство, показанное на рисунке. Газообразное химическое соединение урана, содержащее природную смесь двух изотопов (например, шестифтористый уран - смесь молекул  $^{235}\text{UF}_6$  и  $^{238}\text{UF}_6$ ), поступает по трубе А. В газе, прошедшем через пористую перегородку В, увеличивается процентное содержание легкого изотопа. Этот газ откачивается по трубе С и подается в следующую ячейку. Процесс повторяется многократно. Сколько циклов необходимо провести, чтобы отношение концентраций легкого и тяжелого изотопа увеличилось в 10 раз?



9. Объем идеального газа изменяют, перемещая поршень в цилиндре, содержащем газ. Покажите с помощью молекулярно-кинетической теории, что изменение полной энергии молекул газа действительно равно  $p\Delta V$ . Скорость поршня мала по сравнению со скоростью молекул. Столкновения молекул с поршнем считайте абсолютно упругими.

Указание. Вспомните, как изменяется скорость тела при упругом ударе о движущуюся стенку.

10\* Оцените силу торможения спутника при полете в верхних слоях атмосферы. Концентрация молекул на высоте орбиты спутника  $2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ .