

Онлайн-школа «Фоксфорд»



М.А. ПЕНКИН

Урок 14

Термодинамика незамкнутых процессов

Курс подготовки к вузовским
олимпиадам 11 класса

Внутренняя энергия идеального газа u – сумма кинетических энергий движения молекул.

Потенциальные энергии не учитываются, потому что газ является идеальным (не учитывается взаимодействие молекул). В случае с идеальным газом его внутренняя энергия u зависит только от его температуры T (закон Джоуля) и определяется по формуле

$$u = \frac{i}{2} \nu \cdot R \cdot T,$$

где i – количество степеней свободы.

Число степеней свободы i для различных газов (при нормальных условиях):

Тип газа		Число степеней свободы i	Примеры газа	Внутренняя энергия u
Одноатомный		3	Гелий He, аргон Ar	$u = \frac{3}{2} \nu \cdot R \cdot T$
Двухатомный		5	Водород H ₂ , азот N ₂	$u = \frac{5}{2} \nu \cdot R \cdot T$
Многоатомный (число атомов > 2)	нелинейные молекулы	6	Водяной пар H ₂ O, озон O ₃	$u = 3 \nu \cdot R \cdot T$
	линейные молекулы	5	Углекислый газ CO ₂	$u = \frac{5}{2} \nu \cdot R \cdot T$

Для реального (неидеального) газа внутренняя энергия u зависит не только от температуры T , но и от занимаемого им объёма V .

Работа газа A – работа силы $F = p \cdot S$ давления газа.

В термодинамике работа газа – это результат взаимодействия системы с внешними объектами (например, поршнями), в результате чего изменяются параметры системы.

Пусть объём газа изменился на такую малую величину ΔV , что его давление при этом почти не изменилось и было равным p . Например, произошёл сдвиг поршня на расстояние $\Delta x = \Delta V/S$. Тогда сила F совершит работу $\Delta A = F \cdot \Delta x = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V$.

В произвольном термодинамическом процессе работа газа может быть найдена по формуле

$$A = \sum \Delta A = \sum p \cdot \Delta V = \pm S_{\text{ГР}},$$

где $S_{\text{ГР}}$ – площадь под графиком зависимости давления газа p от занимаемого им объёма V .

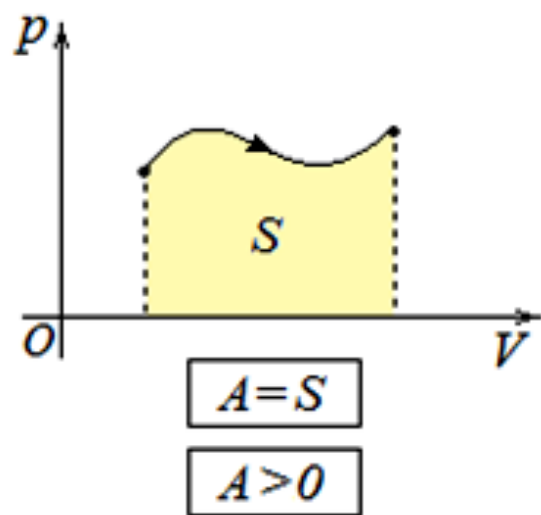


рис.1. Расширение газа

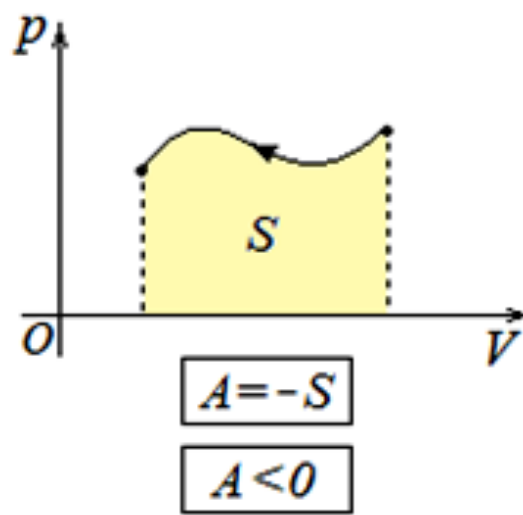


рис.2. Сжатие газа

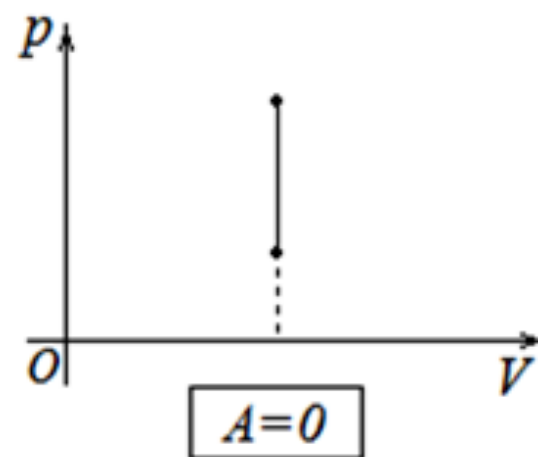


рис.3. Постоянный объём газа

Следует различать работу газа A и работу над газом $A_{\text{над}}$ (работа внешних сил над газом). Для одного и того же равновесного процесса эти две работы равны по модулю, но отлич. по знаку.


$$A_{\text{над}} = -A.$$

Для любого процесса верен первый закон термодинамики (первое начало термодинамики):

$$Q = \Delta u + A,$$

где Q – количество подведённой теплоты к газу, Δu – изменение его внутренней энергии, и A – работа, которую совершает газ.

Первый закон термодинамики – по своей сути закон сохранения энергии с учётом изменения внутренней энергии и теплопередачи: при любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только передаётся от одних тел другим или превращается из одной формы в другую.



№1. Гелий в количестве ν моль расширился в процессе с постоянной теплоёмкостью. В результате газ получил количество теплоты $Q > 0$, а его внутренняя энергия уменьшилась на величину $Q/3$.

1. Какую работу совершил газ?
2. Чему равны теплоёмкость газа в данном процессе?


№2. Водород сжался в процессе 1–2 с постоянной молярной теплоёмкостью. В результате процесса была совершена работа сжатия A ($A > 0$), причём от газа было отведено количество теплоты $5A/4$.

1. Как и насколько изменилась внутренняя энергия газа?
2. Чему равна молярная теплоёмкость газа в данном процессе?

№3. Идеальный одноатомный газ расширяется в процессе, в ходе которого давление газа p прямо пропорционально объёму V , который он занимает. Работа, которую совершает газ, составляет A .

1. Определите изменение внутренней энергии газа.
2. Газ получает или отдаёт теплоту? В каком количестве?

№4. 1 моль одноатомного газа сжали в изобарном процессе. Какое количество теплоты отдал газ в этом процессе, если над ним была совершена работа A ? Как и насколько изменилась температура газа?




№5. Моль одноатомного идеального газа переводится из состояния 1 в состояние 3 путём изобарического нагрева 1–2 и изохорного охлаждения 2–3. На участке 1–2 газ совершает работу A . В процессе всего перехода 1–2–3 к газу подводится количество теплоты Q . Найти разность температур T_2 и T_3 .

№6. Моль гелия расширяется из начального состояния 1 в конечное состояние 3 в двух процессах. Сначала расширение идёт в процессе 1–2 с постоянной молярной теплоёмкостью $3R/4$. Затем газ расширяется в процессе 2–3, где его давление p прямо пропорционально объёму V . Количество теплоты, которое получил газ в процессе 2–3, составляет Q . Температуры газа в состояниях 1 и 3 равны.

1. Какую работу совершил газ в процессе 2–3?
2. В процессе 1–2 газ получал или отдавал теплоту? В каком количестве?
3. Найдите работу, которую совершил газ в процессе 1–2.

№7. Моль азота из начального состояния сжимают в изобарном процессе 1–2, а затем газ продолжают сжимать в адиабатном процессе 2–3. Температуры в состояниях 1 и 3 равны. Найти работу, совершённую над газом в адиабатном процессе, если в изобарном процессе от газа пришлось отвести количество теплоты Q .

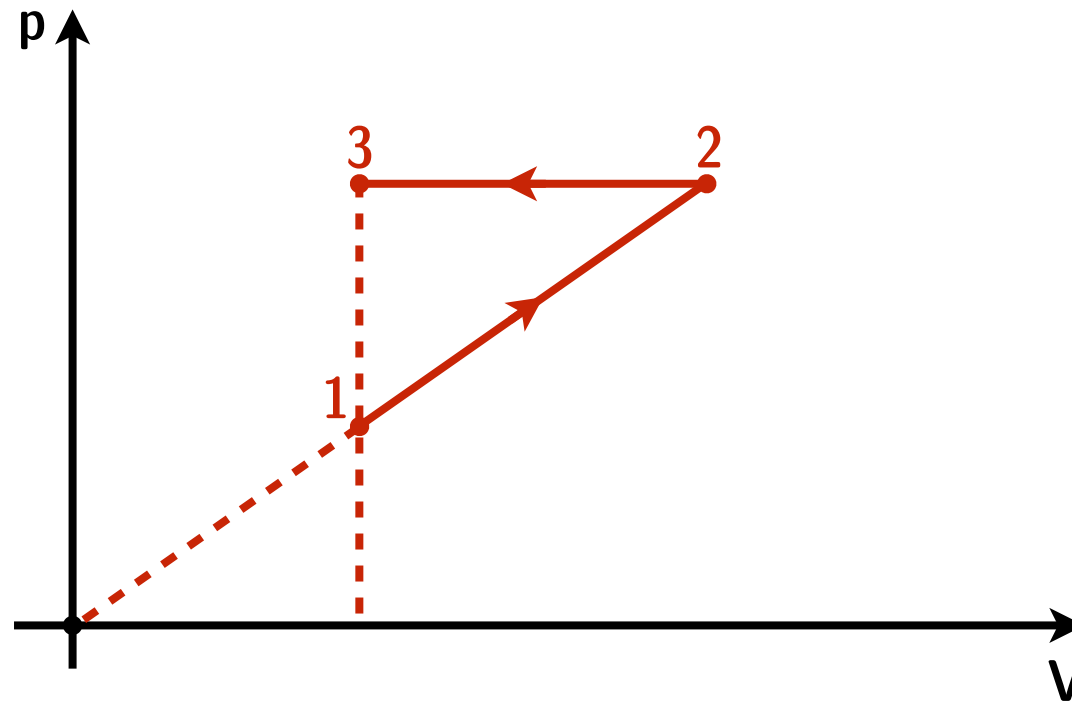


№8. Моль гелия сжимают в бесконечно малом адиабатическом процессе. На сколько процентов изменится давление газа, если относительное изменение температуры составляет $\Delta T/T = 0,32\%$?


№9. Газообразный гелий нагревается (непрерывно повышается температура) от температуры T_0 в процессе, в котором молярная теплоёмкость газа C зависит от температуры T по закону $C = R \cdot T/T_0$.

1. Найти температуру T_1 , при нагревании до которой газ совершил работу, равную нулю.
2. Найти температуру T_2 , при достижении которой газ занимал минимальный объём в процессе нагревания.

№10. Гелий в количестве ν моль расширяется от температуры T_1 в процессе 1–2 с прямопропорциональной зависимостью давления p от объёма V , а затем сжимается в изобарическом процессе 2–3, возвращаясь к начальному объёму. Известно, что $V_2/V_1 = 2$.




1. Найти температуры в состояниях 2 и 3.
2. Найти работу, совершённую газом в процессе 1–2–3.
3. Найти суммарное количество теплоты, полученное газом в процессе 1–2–3.



№11. Идеальный двухатомный газ в количестве ν моль переводится из начального состояния с температурой T в состояние, в котором его температура уменьшилась в 3 раза, а объём увеличился в два раза. Найдите отведённое от газа количество теплоты. Известно, что из всех путей перевода газа из начального состояния в конечное, на которых давление не превышает начальное, был выбран путь, где газ совершил максимальную работу.

№12. В процессе расширения к одноатомному идеальному газу было подведено количество теплоты в 4 раза превышающее величину его внутренней энергии в начальном состоянии. Во сколько раз увеличился объём газа, если в процессе расширения он менялся прямо пропорционально давлению?

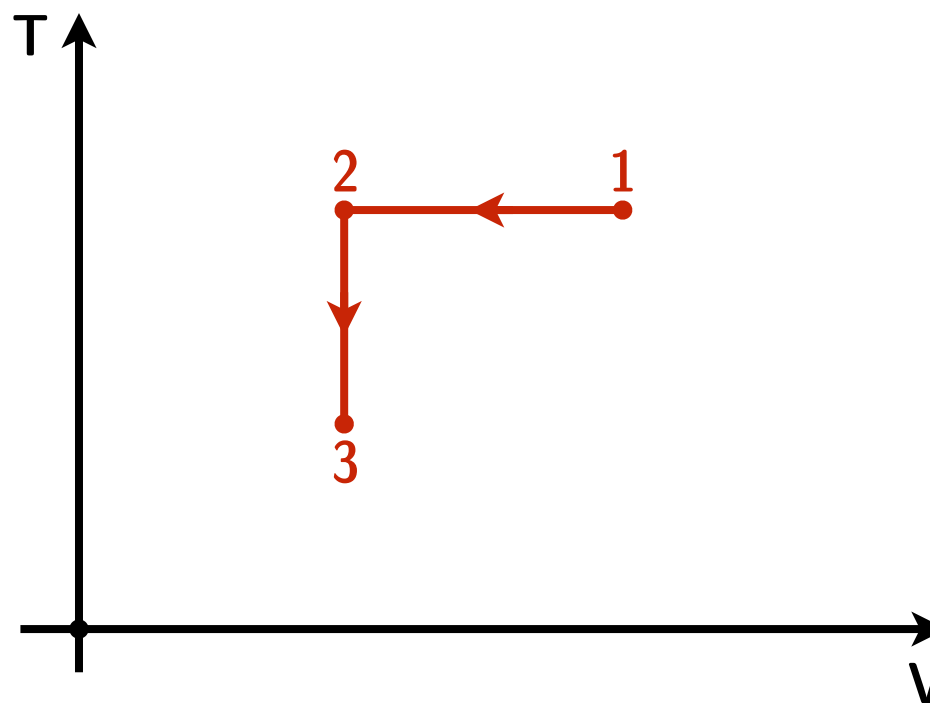
№13. Одноатомный идеальный газ расширяется в процессе с линейной зависимостью давления от объёма. В итоге этого процесса к газу было подведено количество теплоты, в 3,6 раза меньшее его внутренней энергии в начальном состоянии. Во сколько раз увеличился объём газа, если в начальном и конечном состояниях его температура оказалась одинаковой?



№14. Внутренняя энергия U неидеального газа зависит от его температуры T и объёма V по формуле $U = cT - a/V$, где c и a – известные константы. Такой газ нагревается сначала в изохорном процессе, а затем охлаждается в изобарном процессе до первоначальной температуры. Объём газа в конечном состоянии в k раз ($k > 1$) меньше начального, а внутренняя энергия в конечном состоянии меньше, чем в начальном на величину ΔU ($\Delta U > 0$). В результате всего процесса от газа отвели суммарное количество теплоты Q ($Q > 0$).

1. Найти начальный объём газа.
2. Найти конечное давление газа.

№15. Газ фотонов из начального состояния 1 сжимают в изотермическом процессе 1–2, а затем охлаждают в изохорном процессе 2–3. Во всём процессе перехода 1–2–3 над газом совершена работа A , а его температура и объём уменьшились в два раза. Какое количество теплоты было отведено от газа фотонов в процессе перехода 1–2–3?



Указание: в пустом сосуде переменного объёма V , температура стенок T , возникает равновесный газ фотонов, которые излучаются и поглощаются стенками сосуда. Внутренняя энергия этого газа $U = aT^4V$, где $a = \text{const}$. Давление газа фотонов определяется его температурой $p = aT^4/3$.



mapenkin.ru

ПРЕЗЕНТАЦИЮ ПОДГОТОВИЛ
Михаил Александрович **ПЕНКИН**

 [/penkin](#)

 [/mapenkin](#)

 fmicky@gmail.com