

## Первый закон термодинамики

Темы кодификатора ЕГЭ: работа в термодинамике, первый закон термодинамики, адиабатный процесс.

Начнём с обсуждения работы газа.

Газ, находящийся в сосуде под поршнем, действует на поршень с силой  $F = pS$ , где  $p$  — давление газа,  $S$  — площадь поршня. Если при этом поршень перемещается, то газ совершает работу.

При расширении газа эта работа будет положительной (сила давления газа и перемещение поршня направлены в одну сторону). При сжатии работа газа отрицательна (сила давления газа и перемещение поршня направлены в противоположные стороны).

### Работа газа в изобарном процессе

Предположим, что газ расширяется при постоянном давлении  $p$ . Тогда сила  $F$ , с которой газ действует на поршень, также постоянна. Пусть поршень переместился на расстояние  $\Delta x$  (рис. 1).

Работа газа равна:

$$A = F\Delta x = pS\Delta x.$$

Но  $S\Delta x = \Delta V$  — изменение объёма газа. Поэтому для работы газа при изобарном расширении мы получаем формулу:

$$A = p\Delta V. \quad (1)$$

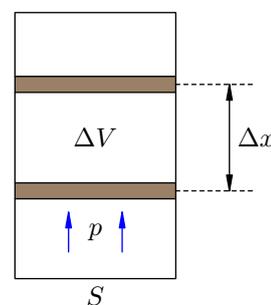


Рис. 1.  $A = p\Delta V$

Если  $V_1$  и  $V_2$  — начальный и конечный объём газа, то для работы газа имеем:

$$A = p(V_2 - V_1).$$

Изобразив данный процесс на  $pV$ -диаграмме, мы видим, что работа газа равна площади прямоугольника под графиком нашего процесса (рис. 2).

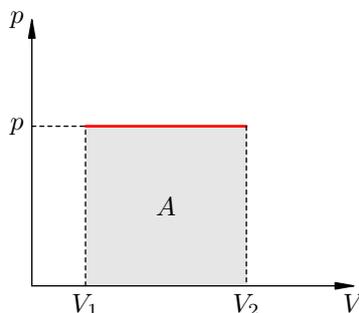


Рис. 2. Работа газа как площадь

Пусть теперь газ изобарно сжимается от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$ . С помощью аналогичных рассуждений приходим к формуле:

$$A = -p(V_1 - V_2).$$

Но  $-(V_1 - V_2) = V_2 - V_1 = \Delta V$ , и снова получается формула (1).

Работа газа опять-таки будет равна площади под графиком процесса на  $pV$ -диаграмме, но теперь со знаком минус.

Итак, формула  $A = p\Delta V$  выражает работу газа при постоянном давлении — как в процессе расширения газа, так и в процессе сжатия.

### Работа газа в произвольном процессе

Геометрическая интерпретация работы газа (как площади под графиком процесса на  $pV$ -диаграмме) сохраняется и в общем случае неизобарного процесса.

Действительно, рассмотрим малое изменение  $dV$  объёма газа — настолько малое, что давление  $p$  будет оставаться приблизительно постоянным. Газ совершит малую работу  $dA = pdV$ . Тогда работа  $A$  газа во всём процессе найдётся суммированием этих малых работ:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

Но данный интеграл как раз и является площадью криволинейной трапеции (рис. 3):

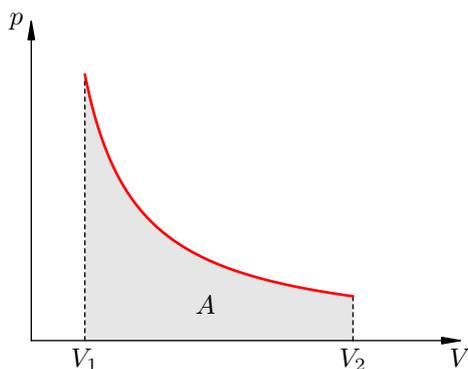


Рис. 3. Работа газа как площадь

### Работа, совершаемая над газом

Наряду с работой  $A$ , которую совершает газ по передвижению поршня, рассматривают также работу  $A'$ , которую поршень совершает над газом.

Если газ действует на поршень с силой  $\vec{F}$ , то по третьему закону Ньютона поршень действует на газ с силой  $\vec{F}'$ , равной силе  $\vec{F}$  по модулю и противоположной по направлению:  $\vec{F}' = -\vec{F}$  (рис. 4).

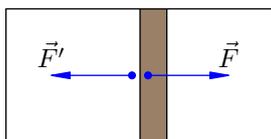


Рис. 4. Внешняя сила  $\vec{F}'$ , действующая на газ

Следовательно, работа поршня  $A'$  равна по модулю и противоположна по знаку работе газа:

$$A' = -A.$$

Так, в процессе расширения газ совершает положительную работу ( $A > 0$ ); при этом работа, совершаемая над газом, отрицательна ( $A' < 0$ ). Наоборот, при сжатии работа газа отрицательна ( $A < 0$ ), а работа, совершаемая поршнем над газом, положительна ( $A' > 0$ ).

Будьте внимательны: если в задаче просят найти работу, совершённую над газом, то имеется в виду работа  $A'$ .

## Первый закон термодинамики

Как мы знаем, существует лишь два способа изменения внутренней энергии тела: теплопередача и совершение работы.

Опыт показывает, что эти способы независимы — в том смысле, что их результаты складываются. Если телу в процессе теплообмена передано количество теплоты  $Q$ , и если в то же время над телом совершена работа  $A'$ , то изменение внутренней энергии тела будет равно:

$$\Delta U = Q + A'. \quad (2)$$

Нас больше всего интересует случай, когда тело является газом. Тогда  $A' = -A$  (где  $A$ , как всегда, есть работа самого газа). Формула (2) принимает вид:  $\Delta U = Q - A$ , или

$$Q = \Delta U + A. \quad (3)$$

Соотношение (3) называется *первым законом термодинамики*. Смысл его прост: *количество теплоты, переданное газу, идёт на изменение внутренней энергии газа и на совершение газом работы*.

Напомним, что величина  $Q$  может быть и отрицательной: в таком случае тепло отводится от газа. Но первый закон термодинамики остаётся справедливым в любом случае. Он является одним из фундаментальных физических законов и находит подтверждение в многочисленных явлениях и экспериментах.

## Применение первого закона термодинамики к изопроцессам

Напомним, что в изопроцессе остаётся неизменным значение некоторой величины, характеризующей состояние газа — температуры, объёма или давления. Для каждого вида изопроцессов запись первого закона термодинамики упрощается.

### 1. Изотермический процесс, $T = \text{const}$ .

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры. Если температура газа не меняется, то не меняется и внутренняя энергия:  $\Delta U = 0$ . Тогда формула (3) даёт:

$$Q = A.$$

Всё подведённое к газу тепло идёт на совершение газом работы.

### 2. Изохорный процесс, $V = \text{const}$ .

Если объём газа остаётся постоянным, то поршень не перемещается, и потому работа газа равна нулю:  $A = 0$ . Тогда первый закон термодинамики даёт:

$$Q = \Delta U.$$

Всё тепло, переданное газу, идёт на изменение его внутренней энергии.

### 3. Изобарный процесс, $p = \text{const}$ .

Подведённое к газу тепло идёт как на изменение внутренней энергии, так и на совершение работы (для которой справедлива формула (1)). Имеем:

$$Q = \Delta U + p\Delta V.$$

## Адиабатный процесс

Процесс называется *адиабатным*, если он идёт без теплообмена с окружающими телами.

Адиабатный процесс совершается газом, находящимся в теплоизолированном сосуде. Такой сосуд препятствует всем видам теплопередачи: теплопроводности, конвекции, излучению. Пример теплоизолированного сосуда — термос.

Приблизительно адиабатным будет всякий процесс, протекающий достаточно быстро: в течение процесса теплообмен просто не успевает произойти.

При адиабатном процессе  $Q = 0$ . Из первого закона термодинамики получаем:  $A + \Delta U = 0$ , или  $A = -\Delta U$ .

В процессе адиабатного расширения газ совершает положительную работу, поэтому  $\Delta U < 0$  (работа совершается за счёт убыли внутренней энергии). Следовательно, газ охлаждается. Если заставить газ совершить достаточно большую работу, охладить его можно весьма сильно. Именно на этом основаны методы сжижения газов.

Наоборот, в процессе адиабатного сжатия будет  $A < 0$ , поэтому  $\Delta U > 0$ : газ нагревается. Адиабатное нагревание воздуха используется в дизельных двигателях для воспламенения топлива.

Кривая, изображающая ход адиабатного процесса, называется *адиабатой*. Интересно сравнить ход адиабаты и изотермы на  $pV$ -диаграмме (рис. 5).

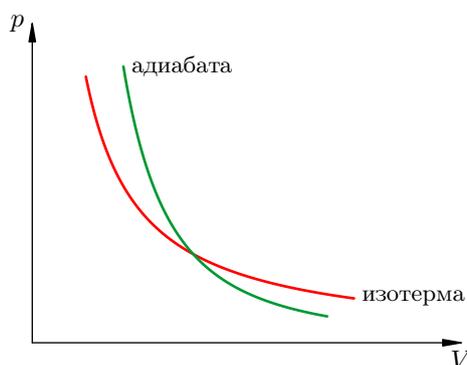


Рис. 5. Сравнительный ход изотермы и адиабаты

В обоих процессах давление убывает с увеличением объёма, но в адиабатном процессе убывание идёт быстрее. Почему?

При изотермическом расширении давление падает потому, что уменьшается концентрация частиц газа, в результате чего удары частиц по стенкам сосуда становятся реже. Однако интенсивность этих ударов остаётся прежней: ведь температура газа не меняется — значит, не меняется и средняя кинетическая энергия его частиц.

А при адиабатном расширении, наряду с уменьшением концентрации частиц, падает также и температура газа. Удары частиц становятся не только более редкими, но и более слабыми. Вот почему адиабата убывает быстрее изотермы.