



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Практическое занятие №5

Термодинамические процессы



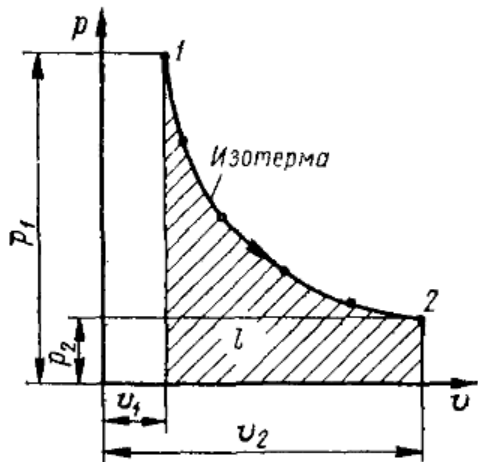
Процессы идеальных газов:

- 1) *Изохорный*, происходящий при постоянном объеме газа ($V=const$);
- 2) *Изобарный*, происходящий при постоянном давлении ($p=const$);
- 3) *Изотермический*, происходящий при постоянной температуре ($T=const$);
- 4) *Адиабатный*, происходящий без подвода или отвода теплоты т.е. протекающий без теплообмена с окружающей средой ($q=0$);
- 5) *Политропный* – обобщенный процесс изменения всех параметров рабочего тела, для которого четыре предыдущих являются частными случаями.



Для изучения этих процессов необходимо определить:

- 1) Уравнение процесса, которое устанавливает закономерность изменения состояния рабочего тела;
- 2) Графическое изображение процесса в диаграммах;
- 3) Связь, существующую между параметрами в процессе;
- 4) Изменение внутренней энергии рабочего тела в процессе;
- 5) Работу, совершаемую рабочим телом в процессе;
- 6) Теплоту, участвующую в процессе.



Изотермический процесс:

1. Уравнение изотермического процесса: $T = \text{const.}$

Уравнение изотермического процесса можно еще записать следующим образом:
 $pV = \text{const.}$

2. Графическое изображение процесса в pV -диаграмме имеет вид равнобокой гиперболы, что вытекает из уравнения $pV = \text{const.}$, и называется изотермой.

3. Связь между параметрами для изотермического процесса 1-2 определяется уравнением состояния идеального газа для точек 1 и 2:

$$p_1 v_1 = RT_1; \quad p_2 v_2 = RT_1$$



$$p_1/p_2 = v_2/v_1$$

Закон Бойля-Мариотта: в изотермическом процессе отношение абсолютных давлений обратно пропорционально отношению удельных объемов

4. Изменение внутренней энергии идеального газа в изотермическом процессе равно нулю, так как он протекает без изменения температуры, а внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры:

$$u_2 - u_1 = 0 \quad \text{так как} \quad T_1 = T_2.$$



5. В изотермическом процессе есть изменение объема, следовательно, **совершается работа.**

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv = \int_{v_1}^{v_2} (RT/v) \, dv = RT \int_{v_1}^{v_2} dv/v = RT \ln (v_2/v_1)$$
$$l_{1-2} = RT \ln (p_1/p_2)$$

Работу процесса для 1 кг идеального газа можно выразить также, используя уравнение состояния:

$$l_{1-2} = p_1 v_1 \ln (v_2/v_1) = p_1 v_1 \ln (p_1/p_2)$$

Для произвольной массы рабочего тела уравнения примут вид:

$$L = mRT \ln (v_2/v_1) = mRT \ln (p_1/p_2) =$$
$$= p_1 V_1 \ln (v_2/v_1) = p_1 V_1 \ln (p_1/p_2).$$



6. Рассмотрим аналитическое выражение первого закона термодинамики, согласно которому **теплота процесса**:

$$q_{1-2} = (u_2 - u_1) + l_{1-2}$$

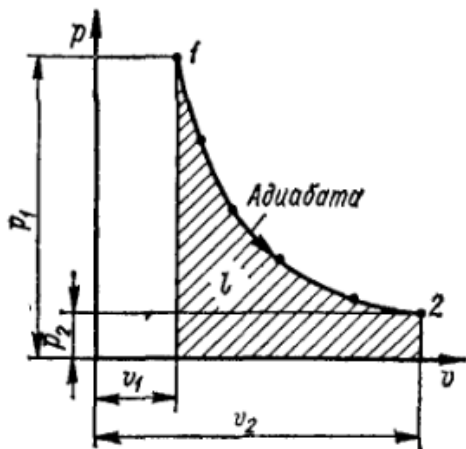
В изотермическом процессе:

$$u_2 - u_1 = 0$$

Следовательно,

$$q_{1-2} = l_{1-2}$$

Таким образом, вся подведенная теплота в изотермическом процессе расходуется на совершение работы.



Адиабатный процесс

Адиабатным называется процесс, протекающий без подвода или отвода теплоты, т. е. без теплообмена с окружающей средой.

В реальных условиях адиабатные процессы осуществить нельзя, так как нет идеальной теплоизоляции.

1. **Уравнение адиабатного процесса** выводится с помощью высшей математики и имеет следующий вид:

$$pV^k = \text{const},$$

где k — показатель адиабаты.



Показатель адиабаты является физическим свойством вещества. Для идеального газа $k = c_p/c_v$.

2.Графическое изображение адиабатного процесса в p - v -диаграмме имеет вид кривой, которая круче изотермы, так как

$$k = c_p/c_v = (c_v + R)/c_v = (1 + R/c_v) > 1.$$

Линия адиабатного процесса называется **адиабатой**.

3. В отличие от ранее рассмотренных процессов, в адиабатном процессе все три параметра, входящие в уравнение состояния идеального газа, изменяются. **Связь между параметрами** p и V определяется уравнением адиабатного процесса $p v^k = \text{const}$, или $p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$, откуда

$$p_1/p_2 = (v_2/v_1)^k, \text{ или } v_2/v_1 = (p_1/p_2)^{1/k}$$

Чтобы определить зависимость между параметрами v и T , напомним уравнение состояния идеального газа для начала и конца адиабатного процесса:

$$p_1 v_1 = RT_1; \quad p_2 v_2 = RT_2$$



$$p_1 v_1 / p_2 v_2 = T_1 / T_2$$

$$v_2^k v_1 / (v_1^k v_2) = T_1 / T_2$$

$$(v_2 / v_1)^{k-1} = T_1 / T_2$$

$$v_2 / v_1 = (p_1 / p_2)^{1/k}, \text{ или } v_1 / v_2 = (p_2 / p_1)^{1/k}$$

$$p_1 p_2^{1/k} / (p_2 p_1^{1/k}) = T_1 / T_2, \text{ или } p_1^{1-1/k} / p_2^{1-1/k} = T_1 / T_2$$

$$\text{или } (p_1 / p_2)^{(k-1)/k} = T_1 / T_2.$$

4. В адиабатном процессе температура газа изменяется; следовательно, будет происходить изменение внутренней энергии, которое можно определить по формулам:



Для 1 кг вещества:

$$u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1)$$

Для m кг вещества

$$U_2 - U_1 = c_v m (T_2 - T_1)$$

5. Для вывода формулы **работы** в адиабатном процессе применим первый закон термодинамики

$$q_{1-2} = (u_2 - u_1) + l_{1-2}$$

Так как в адиабатном процессе $q = 0$, то

$$l_{1-2} = (u_2 - u_1) = u_1 - u_2 = c_v (T_1 - T_2)$$



$$c_p/c_v - 1 = R/c_v$$

Откуда

$$k - 1 = R/c_v; \quad c_v = R/(k - 1)$$

Тогда

$$l_{1-2} = R (T_1/T_2)/(k - 1), \quad \text{или} \quad l_{1-2} = (RT_1 - RT_2)/(k - 1)$$

$$l_{1-2} = p_1 v_1 [1 - (v_1/v_2)^{k-1}]/(k - 1);$$
$$l_{1-2} = p_1 v_1 [1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}]/(k - 1);$$
$$l_{1-2} = [1/(k - 1)] (p_1 v_1 - p_2 v_2).$$



6. Адиабатный процесс протекает без подвода или отвода теплоты, следовательно, $q = 0$. Работа расширения совершается в адиабатном процессе за счет уменьшения внутренней энергии газа, так как в этом процессе нет подвода теплоты к рабочему телу извне и единственным источником совершения работы является внутренняя энергия рабочего тела.



Задача №1

1 кг воздуха при температуре $t_1 = 30^\circ \text{C}$ и начальном давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ сжимается изотермически до конечного давления $p_2 = 1 \text{ МПа}$.

Определить конечный объем, затрачиваемую работу и количество теплоты, отводимой от газа.



Задача №2

Воздух в количестве 0,5 кг при $p_1 = 0,5$ МПа и $t_1 = 30^\circ$ С расширяется изотермически до пятикратного объема.

Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество теплоты, сообщаемой газу.



Задача №3

8 м³ воздуха при $p_1 = 0,09$ МПа и $t_1 = 20^\circ\text{C}$ сжимаются при постоянной температуре до 0,81 МПа. Определить конечный объем, затраченную работу и количество теплоты, которое необходимо отвести от газа.



Задача №4

1 кг воздуха при начальной температуре $t_1 = 30^\circ \text{C}$ и давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ сжимается адиабатно до конечного давления $p_2 = 1 \text{ МПа}$.

Определить конечный объем, конечную температуру и затрачиваемую работу.



Задача №5

Воздух при давлении $p_1 = 0,45$ МПа, расширяясь адиабатно до $0,12$ МПа, охлаждается до $t_2 = -45^\circ \text{C}$.

Определить начальную температуру и работу, совершенную 1 кг воздуха.



Задача №6

0,8 м³ углекислого газа при температуре $t_1 = 20^\circ \text{C}$ и давлении $p_1 = 0,7 \text{ МПа}$ адиабатно расширяются до трехкратного объема.

Определить конечные параметры p_2 и t_2 и величину полученной работы L (k принять равным 1,28).