

Лекція 3. Термодинамічні процеси та їх дослідження.

□ Під час взаємодії системи з навколишнім середовищем у ній відбувається термодинамічний процес, в результаті чого змінюються і параметри стану. Задачею вивчення термодинамічних процесів як раз і є розроблення методів (вивчення) визначення функції зміни параметрів та кількості теплоти q і роботи l , якими система обмінюється з навколишнім середовищем.

□ З цією метою проводиться аналіз процесу в наступному порядку: виводиться рівняння процесу в $p-v$ координатах; встановлюється залежність між термічними параметрами в процесі; визначається зміна внутрішньої енергії, робота процесу; теплота, необхідна для протікання процесу; визначається зміна ентальпії та ентропії між початковим та кінцевим станом процесу. Отримані таким чином дані дозволяють проаналізувати особливості перетворення енергії в термодинамічному процесі, скласти схему енергобалансу та знайти долю теплоти, яка витрачається на зміну внутрішньої енергії та на виконання роботи проти зовнішніх сил. Для практичного застосування важливим є вивчення деяких часткових процесів, що відбуваються за умови постійності одного з параметрів стану. Такі процеси називають ізопроцесами.

- Перш ніж приступити до аналізу основних термодинамічних процесів, необхідно звернути увагу на те, що внутрішня енергія, ентальпія та ентропія являються параметрами стану і їх зміна не залежить від характеру процесу, тому розрахункові формули для їх обчислення будуть однаковими для усіх процесів ідеальних газів (правда з виключенням деяких складових для окремих процесів), тобто:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_{vm} (t_2 - t_1), \text{ або } du = c_v dT$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_{pm} (t_2 - t_1), \text{ або } dh = c_p dT$$

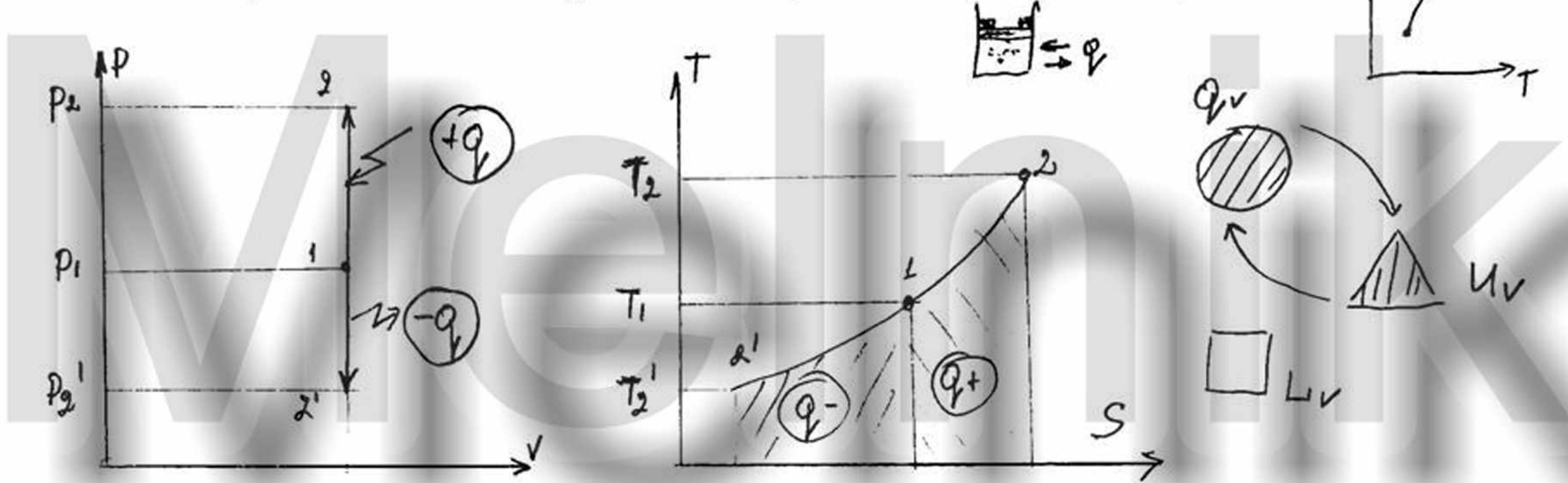
$$\Delta s = (s_2 - s_1) = c_{vm} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$$\Delta s = (s_2 - s_1) = c_{pm} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

- Термодинаміка вивчає п'ять основних процесів, які відбуваються в ідеальних газах. В цих процесах ми будемо розглядати тільки рівноважні процеси, які відбуваються без втрат на тертя.

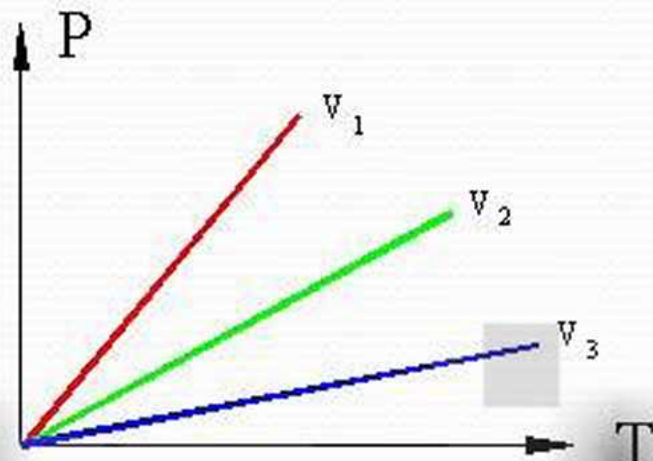
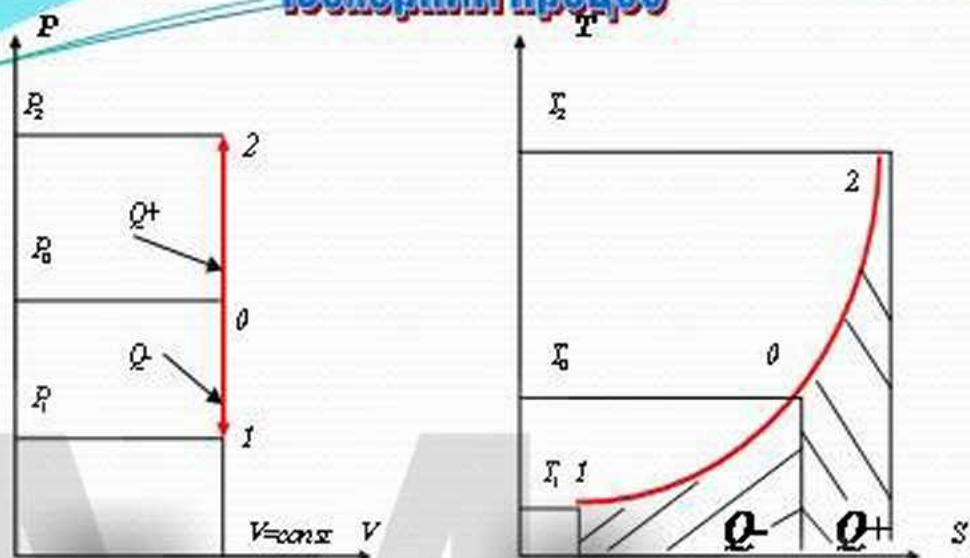
- **Ізохорний процес. (З-н Шарля)** Це процес, що відбувається без зміни об'єму ($V = \text{const}$), а тиск і температура тіла змінюються (нагрівання чи охолодження в закритій посудині). Це, наприклад, процеси які відбуваються в балонах, автоклавах і т.п.

(тобто нагрівання чи охолодження газу в закритій посудині φ)



- В ізохорному процесі робота не виконується і уся підведена теплота йде тільки на зміну внутрішньої енергії, а значить на ріст температури.
- Якщо ж теплота від системи відводиться, то внутрішня енергія і температура зменшуються.

Ізохорний процес



Рівняння процесу $\frac{P}{T} = const$

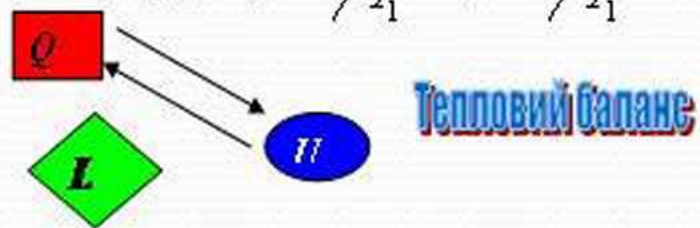
Рівняння 1-го закону ТД $\partial q = du = c_v dT$

Робота процесу $l_{1-2} = 0$

Найважливіша робота $l_x = V(P_2 - P_1)$

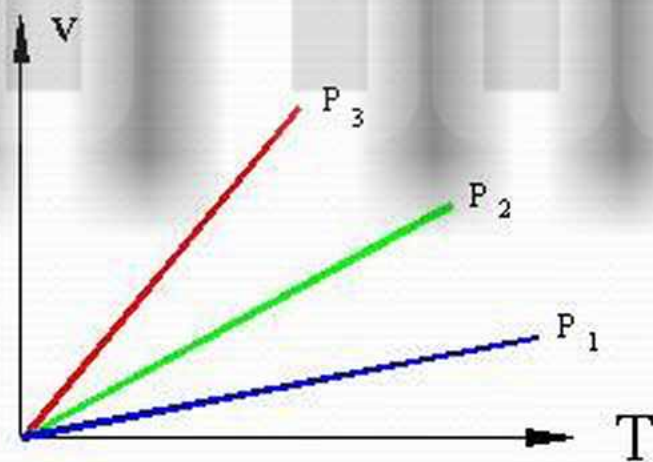
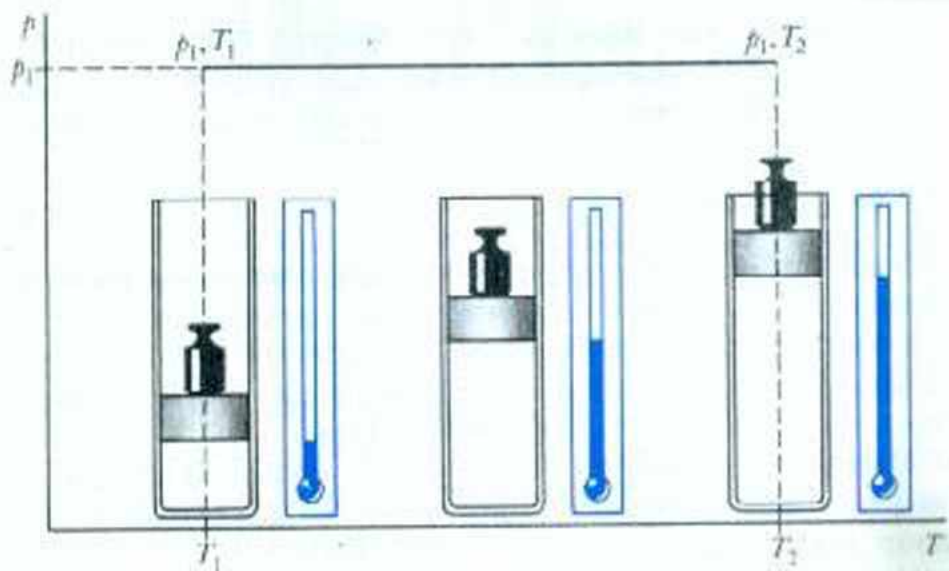
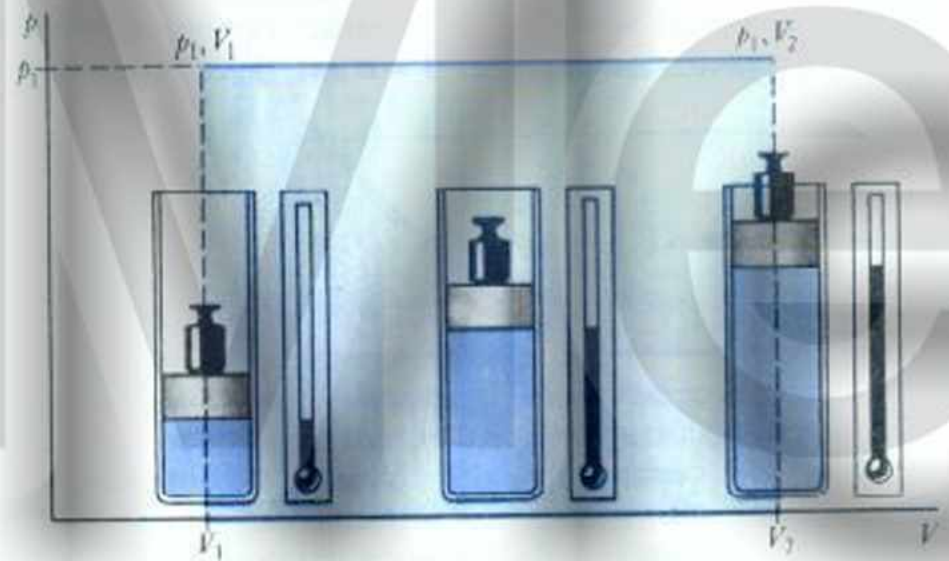
Теплота процесу $q_{1-2} = u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v(T_2 - T_1)$

Зміна ентальпії $s_{1-2} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{P_2}{P_1}$

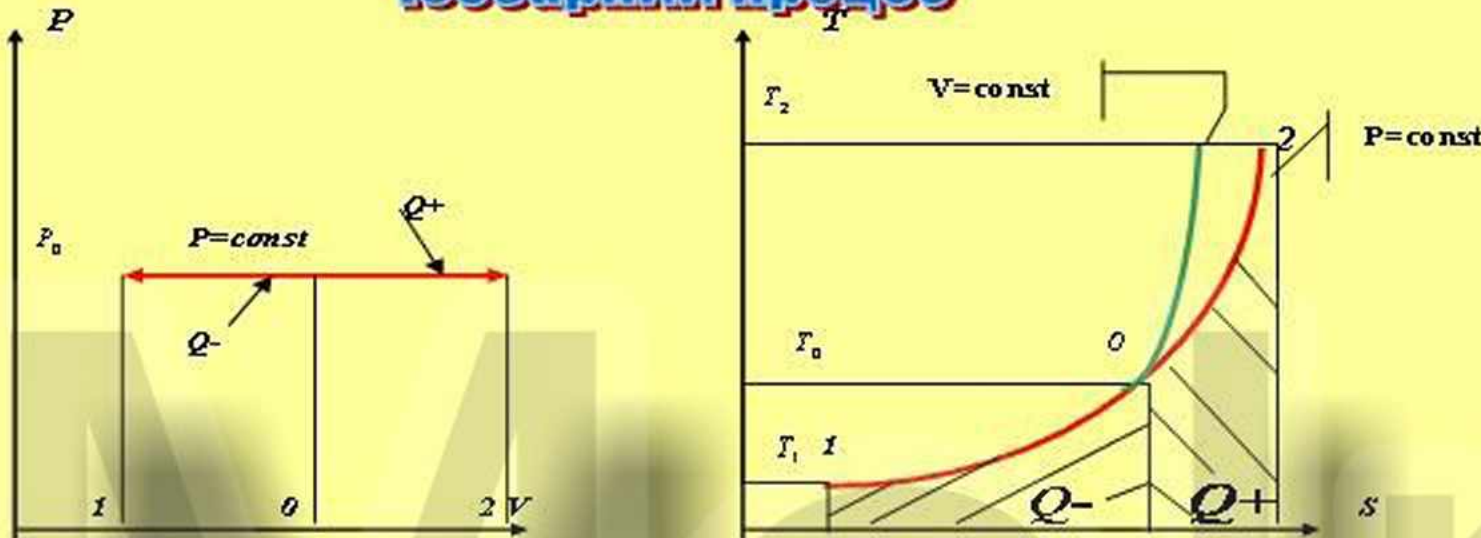


ІЗОБАРНІЙ ПРОЦЕС (ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮСАКА)

- Це процес, який відбувається при незмінному тиску: такий процес зустрічається значно частіше, ніж ізохорний та й відіграє більш важливу роль. Це, по – перше, усі процеси які відбуваються в котлах, конденсаторах, у більшості теплообмінних апаратів, автоклавах і т.п.



Ізобарний процес



Рівняння процесу $\frac{V}{T} = const$

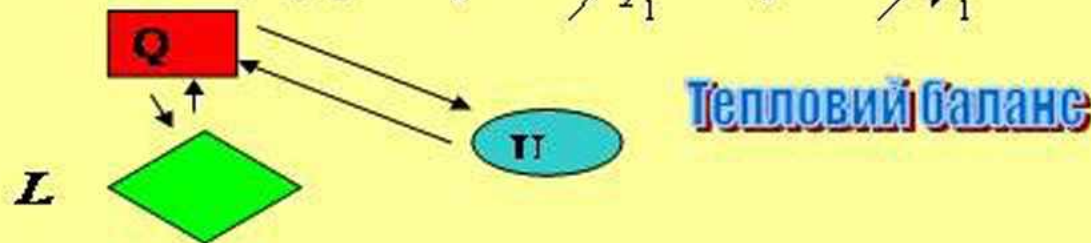
Рівняння 1-го закону ТД $\partial q = dh = c_p dT$

Робота процесу $l_{1-2} = P(V_2 - V_1) = R(T_2 - T_1)$

Наявна робота $l_n = 0$

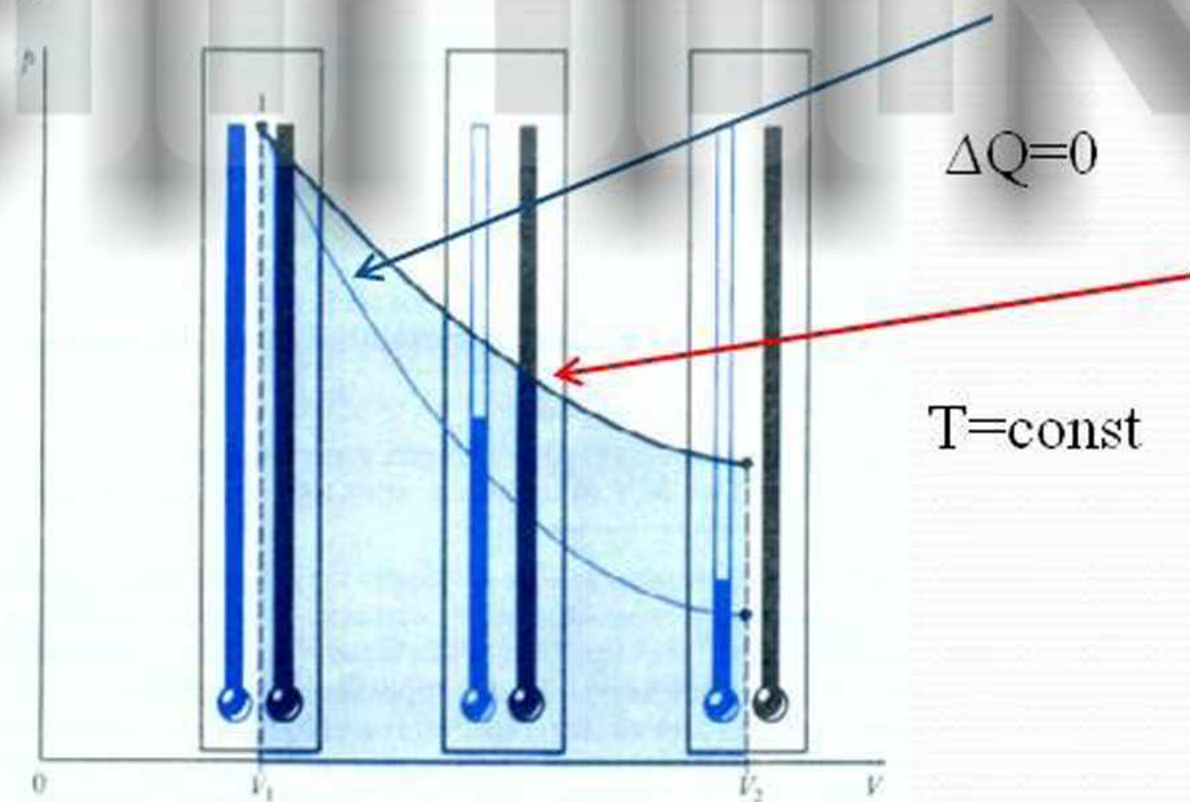
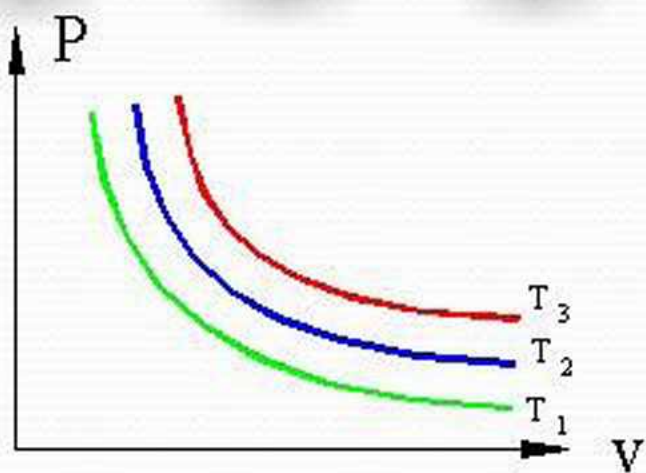
Теплота процесу $q_{1-2} = h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = c_p (T_2 - T_1)$

Зміна ентальпії $S_{1-2} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{V_2}{V_1}$

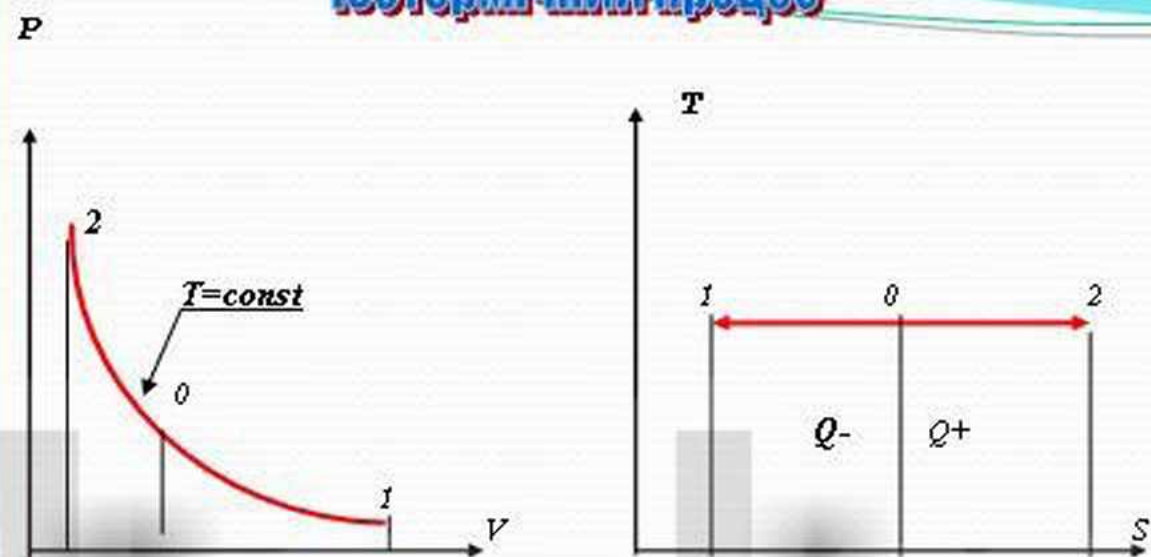


- **Ізотермічний процес (Закон Бойля-Маріота)** – це процес, який проходить при постійній температурі, тобто при незмінній внутрішній енергії. Приклад: процес, який відбувається з газом, який знаходиться в циліндрі з рухомим поршнем, коли об'єм газу збільшується рівно настільки, щоб його температура залишалася незмінною. Для отримання постійної температури при розширенні газу необхідно підвести теплоту, а при стисненні відвести, так як при розширенні газ виконує роботу, а при стисненні – робота виконується над газом. Ще приклад: танення льоду, пароутворення та інші процеси фазових переходів.

- В ізотермічному процесі ідеальних газів вся підведена теплота іде тільки на виконання роботи (є зміна об'єму).



Ізотермічний процес



Рівняння процесу $PV = const$ $du = c_v dT = 0$

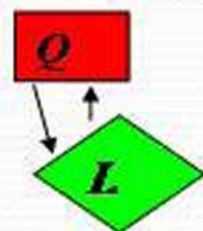
Рівняння 1-го закону ТД $\partial q = dl$

Робота процесу $q_{1-2} = l_{1-2} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$

Наявна робота $q_{1-2} = l_{1-2} = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$

Теплота процесу $q_{1-2} = l_{1-2} = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = T [S_2 - S_1]$

Зміна ентальпії $S_{1-2} = R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2}$

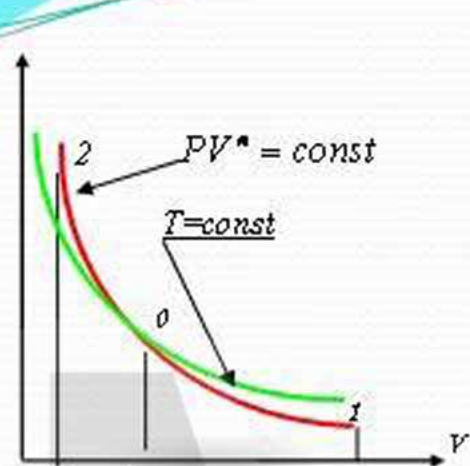


Тепловий баланс

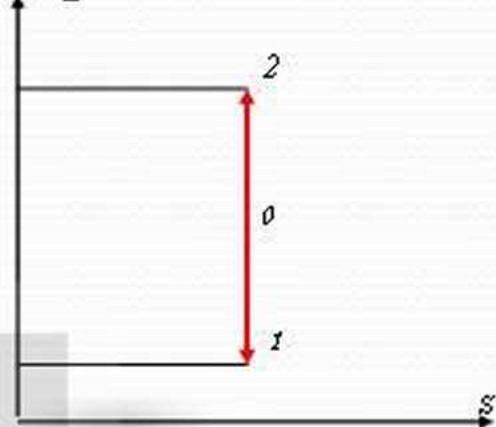
- **Адіабатний процес** - процес, який відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем. Приклад: процес стискання чи розширення газу в циліндрі, який покритий теплонепроможною ізоляцією. В реальних умовах цей процес нездійснений, так як не існує ідеальної теплоізоляції. Однак, якщо процес відбувається дуже швидко, то теплообмін між робочим тілом та навколишнім середовищем незначний і такий процес з достатньою степенню ймовірності можна вважати адіабатним. Слід відмітити, що на відміну від попередніх процесів, у яких один з параметрів стану був постійним, в адіабатному процесі – усі три параметри стану змінні.
- При адіабатному розширенні здійснюється корисна робота, однак, так як теплота до газу не підводиться, то робота здійснюється за рахунок зменшення внутрішньої енергії, тобто, температура падає, що приводить до більш швидкого падіння тиску, чим при ізотермічному процесі. Таким чином, адіабатне розширення газу відбувається із збільшенням об'єму і зменшенням тиску і температури.
- Єдиним джерелом здійснення роботи у цьому процесі є внутрішня енергія робочого тіла.

Адіабатний процес

P



T



Рівняння процесу

$$PV^k = \text{const}, T \cdot V^{k-1} = \text{const}, T / P^{\frac{k-1}{k}} = \text{const}$$

Рівняння 1-го закону ТД

$$\delta q = 0, du = -\delta l$$

Робота процесу

$$l_{1-2} = -\frac{R(T_2 - T_1)}{k-1} = \frac{1}{k-1}(P_1V_1 - P_2V_2)$$

Наявна робота

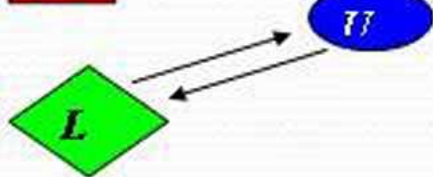
$$l_x = k \cdot l_{1-2} = \frac{k}{k-1}(P_1V_1 - P_2V_2)$$

Теплота процесу

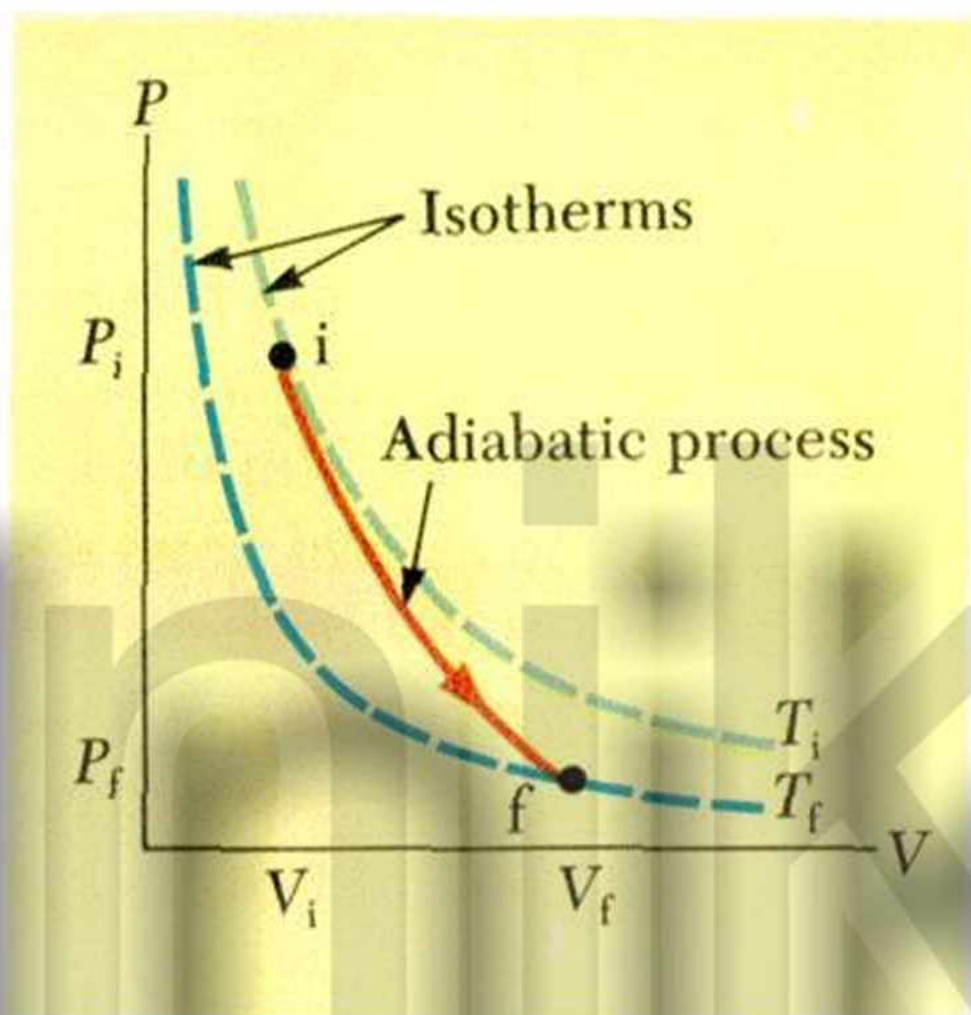
$$q_{1-2} = 0$$

Зміна ентальпії

$$S_{1-2} = 0$$



Тепловий баланс



● **Політропний процес.** В техніці часто приходить ся аналізувати процеси розширення і стиснення робочих тіл у двигунах і компресорах і ці складні процеси не можна віднести до ніяких процесів, які ми розглядали вище. Вони займають особливе місце. Будь-яка сукупність довільних процесів, які відбуваються в термодинамічних системах, дістали назву політропних. В політропному процесі, як і в адіабатному процесі, змінюються усі параметри, однак в той же час можливе підведення чи відведення теплоти, згідно деякому (певному) закону.

● Якщо ізохорний, ізобарний, ізотермічний та адіабатний процеси відбуваються при сталій теплоємності, то вони являються окремими випадками політропного процесу.

● Теплоємність при політропному процесі може приймати довільне значення – від $-\infty$ до $+\infty$.

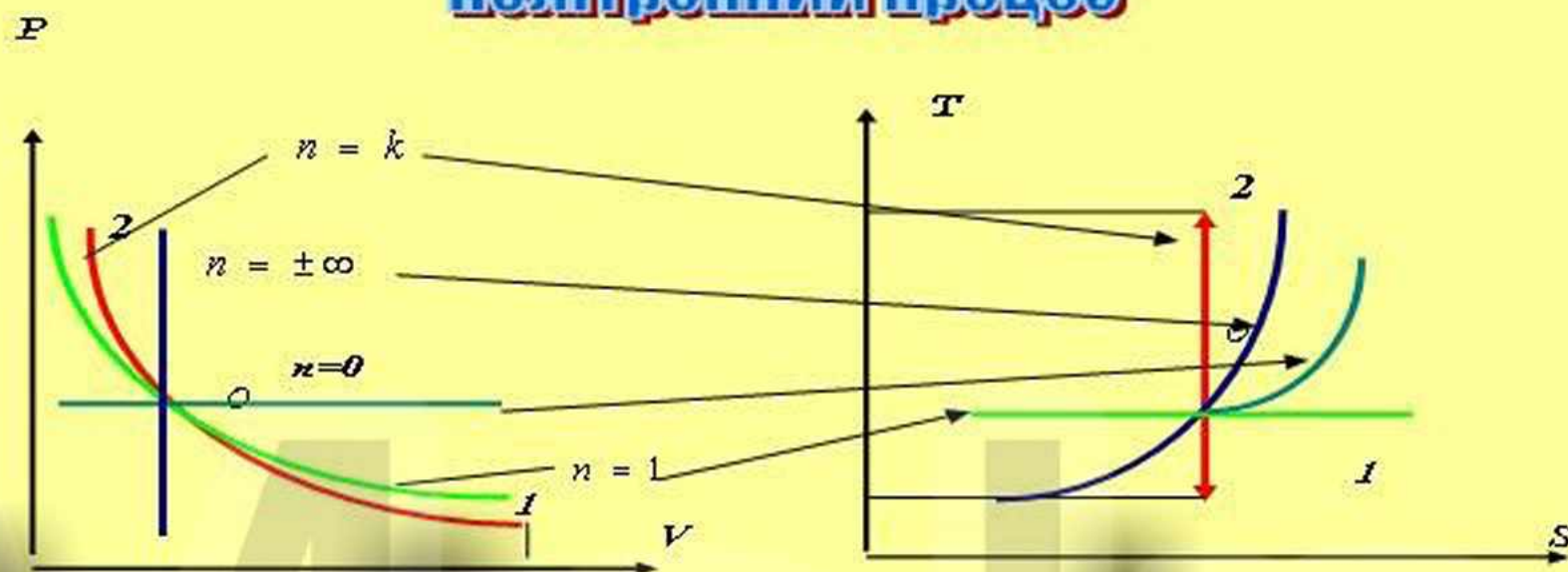
●

- Тут слід відмітити, що показник адіабати в загальному випадку є величина змінна, тоді як показник політропи є постійною величиною для конкретного процесу і залежно від нього може приймати значення від $-\infty$ до $+\infty$. Так, для ізобарного процесу $n=0$ і $pV^0 = \text{const} = p$, для адіабатного $n=k$ і $pV^k = pV^n$, а для ізохорного $n = +\infty$ і рівняння ізохори можна записати:

$$pV^\infty = p^{\frac{1}{\infty}} V = V = \text{const}$$

- Отже, політропний процес є узагальнюючим процесом і містить усі часткові процеси (при умові, що ці часткові процеси відбуваються при постійній теплоємності.)
- Зв'язок між параметрами стану і вираз для роботи у політропному процесі такий же як і у адіабатному і відрізняється лише показником n .

Політропний процес



Рівняння процесу $PV^n = const$, $T \cdot v^{n-1} = const$, $T / P^{\frac{n-1}{n}} = const$

$$n = \frac{c_p - c_v}{c_p - c_v} - \text{показник політропи}$$

Робота процесу

$$l_{1-2} = - \frac{R (T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{1}{n - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

Наявна робота $l_x = k \cdot l_{1-2} = \frac{k}{k - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$

Теплота процесу $q_{1-2} = c_n (T_2 - T_1)$, де c_n

Зміна ентальпії $S_{1-2} = 0$