

Лекція 6. Визначення термодинамічних параметрів води і водяної пари. Таблиці та діаграми термодинамічних властивостей води і водяної пари. Основні термодинамічні процеси водяної пари, їх дослідження.

Процес утворення перегрітої пари складається з трьох стадій:

- 1.-підігрівання води до температури кипіння (насичення);
- 2.-пароутворення;
- 3.-перегрівання пари.

•В задачу аналізу цих трьох стадій отримання перегрітої пари входить визначення для кожної із стадій особливостей початкового і кінцевого станів, зміни їх внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії і обчислення затраченої теплоти. Така задача вирішується як аналітично, так і графічним способом.

•В промислових умовах кожний з цих процесів відбувається у спеціальному обладнанні: 1-підігрівання води – водяний економайзер; 2-пароутворення – котел; 3 – перегрівання пари – пароперегрівники. Спільним між ними є те, що процеси в них відбуваються за постійного тиску (ізобарні процеси).

1). Підігрівання води.

- В ізобарному процесі теплоту на нагрівання води до температури кипіння визначають як: $q' = \int_{t_n}^{\bar{t}_n} \bar{c}_p^e dt_n$, так як теплоємність води при помірному тиску практично не залежить від тиску і становить:

$\bar{c}_p^e \approx 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ то $q' = \int_{t_n}^{\bar{t}_n} \bar{c}_p^e dt_n = \bar{c}_p^e \cdot t_n$ (не залежить від процесу).

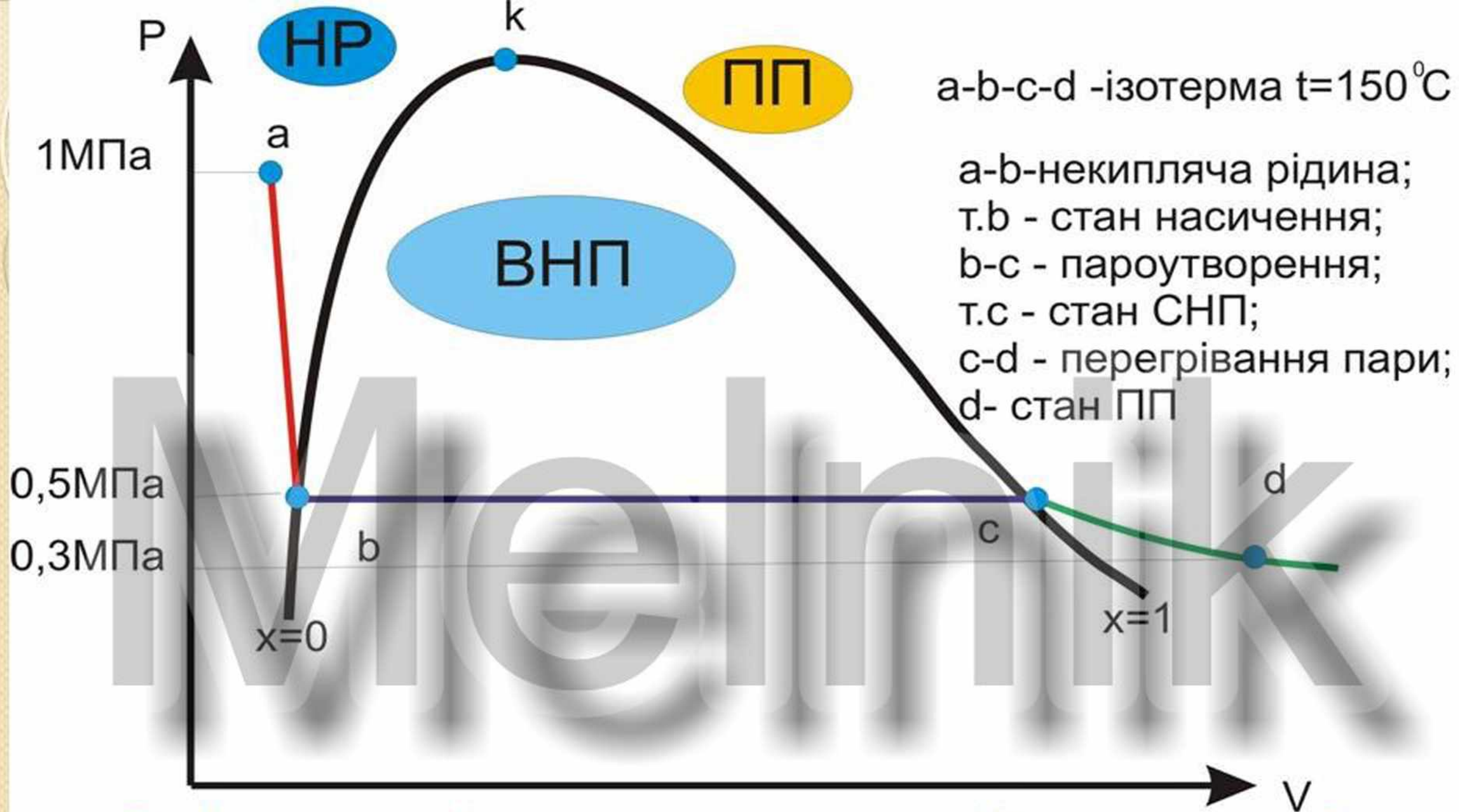
- Згідно 1 з-ну ТД $q' = u' - u_0 + \int_{v_1}^{v_2} p dv$ але так як $dv \approx 0$ і приймається, що $u_0 = 0$, то $q' \approx u'$

- Аналогічно отримуємо з $h' = u' + pv'$, що $h' \approx u'$

- Зміну ентропії при незмінному тиску вираховують як:

$$s' = \bar{c}_p^e \int_{273,15}^T \frac{dT}{T} = \bar{c}_p^e \ln\left(\frac{T}{273,15}\right)$$

- P.S. Незалежність теплоємності від тиску та температури справедлива тільки для невеликих діапазонів їх зміни. Тому, при великих значеннях цих параметрів, потрібно враховувати залежність теплоємності від них – від тиску ця залежність менше виражена ніж від температури. Причому, приблизно до 240 град.С теплоємність води зростає із ростом температури, а при більших значеннях температури – падає.

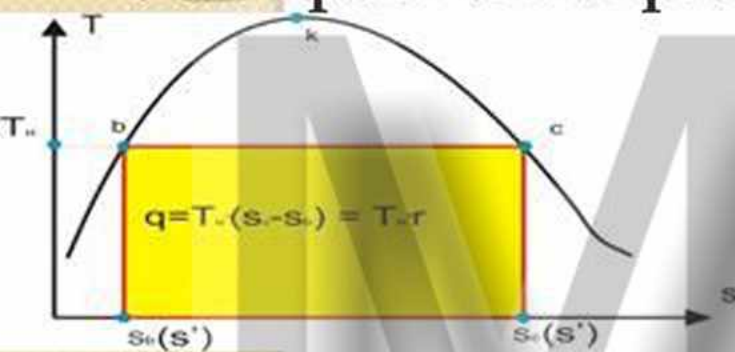


Зміна станів води та водяної пари при ізо-термічному процесі при змінному тиску

P.S. Якщо тиск води при будь-якій температурі вищий за тиск насичення, що відповідає даній температурі, то процес кипіння не почнеться за даної температури. І навпаки, рідина не може існувати при даній температурі, якщо її тиск менший тиску насичення.

2. Пароутворення

- Підігрівання води не відбувається безмежно – для кожного тиску існує своя певна конкретна температура, при досягненні якої вона перестав змінюватися і процес з ізобарного переходить в ізобарно-ізотермічний. Це температура насичення.



Любий стан пари в такому процесі однозначно визначається Р або Т і степенню сухості.

Теплота, що підводиться в такому процесі, витрачається не на підвищення температури, а тільки на подолання міжмолекулярних сил і на роботу розширення пари.

- Теплота пароутворення – це теплота, яку необхідно підвести до 1 кг води при температурі насичення , щоб повністю перетворити її в суху насичену пару тієї ж температури. Деколи її називають прихованою (скритою) теплотою, бо в цьому процесі при значному підведенні теплоти не відбувається зміна температури – ізобарно-ізотермічний процес.

Теплота
пароутворення
 $q=r=u''-u'-p(v''-v')=h''-h'$

Робота дисгрегації
 $l_{\text{дисг}}=u''-u'$

Робота розширення
 $l_{\text{розш}}=p(v''-v')$

- Для ідеальних газів $l_{\text{дисг}}=0$, так як відсутня взаємодія між молекулами. В той же час для насиченої пари вона є суттєвою і значно перевищує роботу розширення. З ростом температури або тиску r -зменшується ($l_{\text{дисг}}$ падає, а $l_{\text{розш}}$ змінюється мало) і в т.к теплота пароутворення $r=0$, тобто, процес пароутворення припиняється.
- Для водяної пари більша частина теплоти пароутворення витрачається на роботу дисгрегації.

- Ентальпія сухої насиченої пари $h'' = h' + r$. З цієї залежності і з аналізу діаграми пароутворення, видно, що із збільшенням тиску h' зростає (тобто, зростає теплове навантаження тієї частини котла, де відбувається підігрів рідини і зменшується для тієї частини, де відбувається пароутворення).
- Внутрішню енергію сухої насиченої пари визначають за відомою формулою: $u'' = h'' - pv''$.
- Ентропія в сухої насиченої пари: $s'' = s' + r/T_x$.
- Параметри для пари зі ступенем сухості x визначають як:

$$v_x = v' + x(v'' - v') = v'(1 - x) + xv''$$

$$s_x = s' + x(s'' - s') = s'(1 - x) + xs'',$$

$$h_x = h' + x(h'' - h') = h'(1 - x) + xh'',$$

$$u_x = u' + x(u'' - u') = u'(1 - x) + xu''.$$

- Виходячи з цих формул, ступінь сухості можна визначити за одним з співвідношень:

$$x = \frac{h_x - h'}{h'' - h'} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'}.$$

• 3. Перегрівання пари.

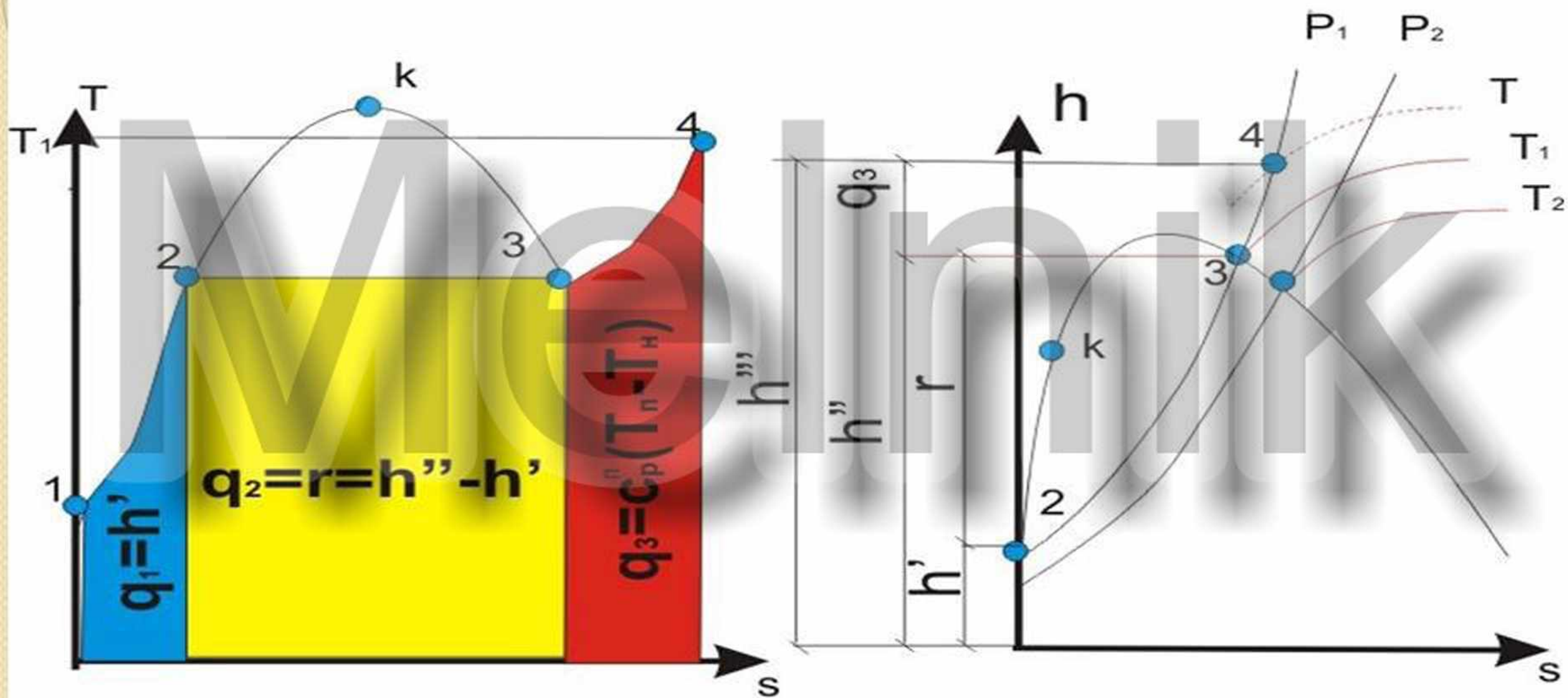
- Перегріта пара, являючись реальним газом, по своїм властивостям наближається до ідеального газу, причому, чим більший перегрів, тим менша різниця у їх поведінці, та й стан перегрітої пари, як і стан ідеального газу, однозначно визначається, якщо задані два параметри, наприклад: тиск і температура.
- Кількість теплоти, що підводиться до 1 кг пари на стадії перегрівання, називають теплотою перегріву і вона може бути визначена за формулою:

$$q_x = \int_{t_x}^{t'''} c_p^{'''} \cdot dt = \bar{c}_p^{'''} (t''' - t_x)$$

де $\bar{c}_p^{'''}$ - середня теплоємність ПП пари (в загальному – величина змінна: залежить від P і T).

- За невеликих тисків ПП по своїм властивостям наближається до ІГ, тому:
- Внутрішня енергія: $u''' = h''' - pv'''$.
- Ентальпія: $h''' = h'' + q_x = h' + \bar{c}_p^{'''} (t''' - t_x)$.
- Ентропія: $s''' = c_p^{'''} \ln(\bar{T}'''/T_x)$

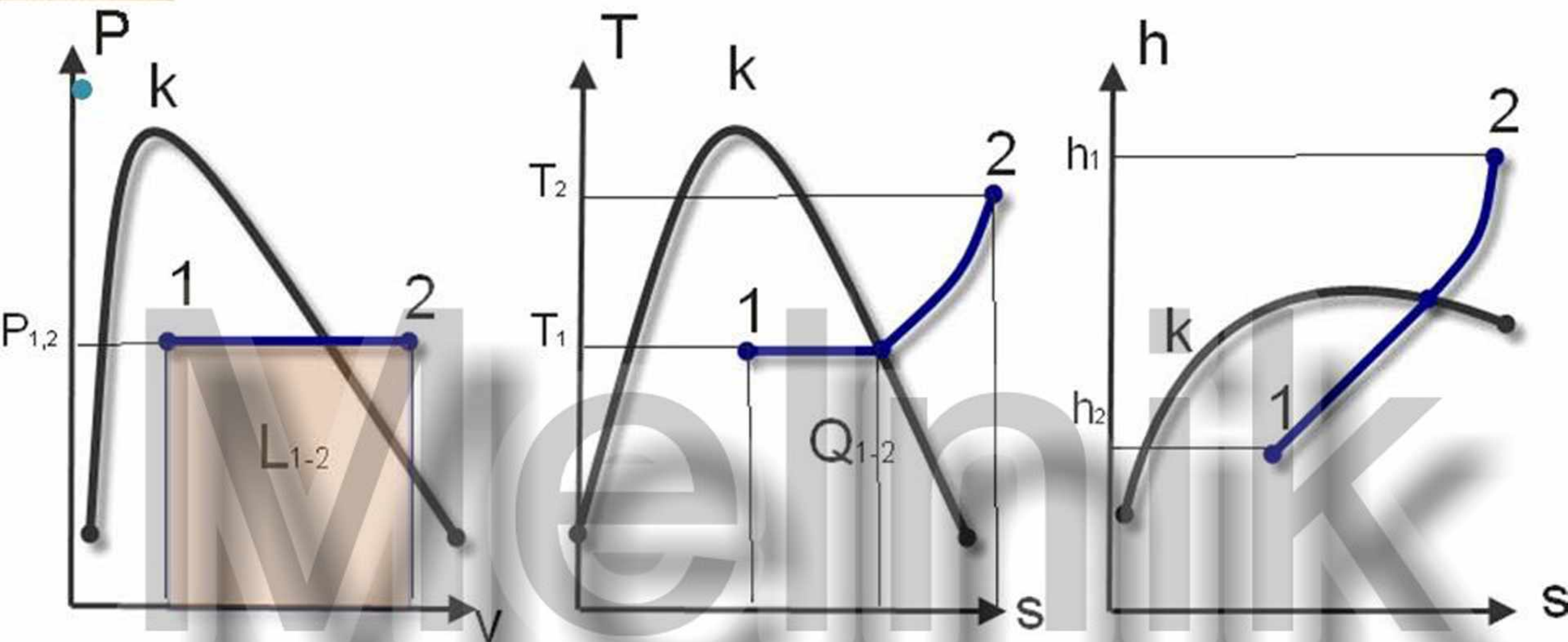
Стадії пароутворення на $T-s$ та $h-s$ діаграмах



Основні термодинамічні процеси водяної пари.

- Теплотехнічні розрахунки можна здійснити за допомогою термодинамічних таблиць води і водяної пари та відповідних формул (розрахунковий метод) або за допомогою термодинамічних діаграм (графічний метод). Перший спосіб є достатньо громіздким, так як при переході пари з одного стану в інший (волога насичена пара, суха насичена пара, перегріта пара) необхідно користуватися різними формулами. Останній метод є менш точним ніж перший, але наочніший та простіший, так як дозволяє легко визначити перехід пари з одного стану в інший через пограничну криву. Насправді, на практиці використовують обидва, так як це дозволяє більш точно та наглядно проводити відповідні розрахунки. Досліджуючи термодинамічні процеси водяної пари треба пам'ятати, що пара це не ідеальний газ, а типовий представник реального газу, до якого застосування законів ідеальних газів не завжди є можливим. Крім того, дуже часто приходиться мати справу з процесами, що проходять в області як дво- так і однофазних станів пари, де її поведінка і властивості будуть різними. В загальному випадку для здійснення таких розрахунків треба знати початкові параметри стану (не менше двох), характер процесу і хоча б один кінцевий параметр. Усі ці параметри можуть бути визначені за відповідними таблицями або діаграмами.

ІЗОБАРНИЙ ПРОЦЕС ВОДЯНОЇ ПАРИ

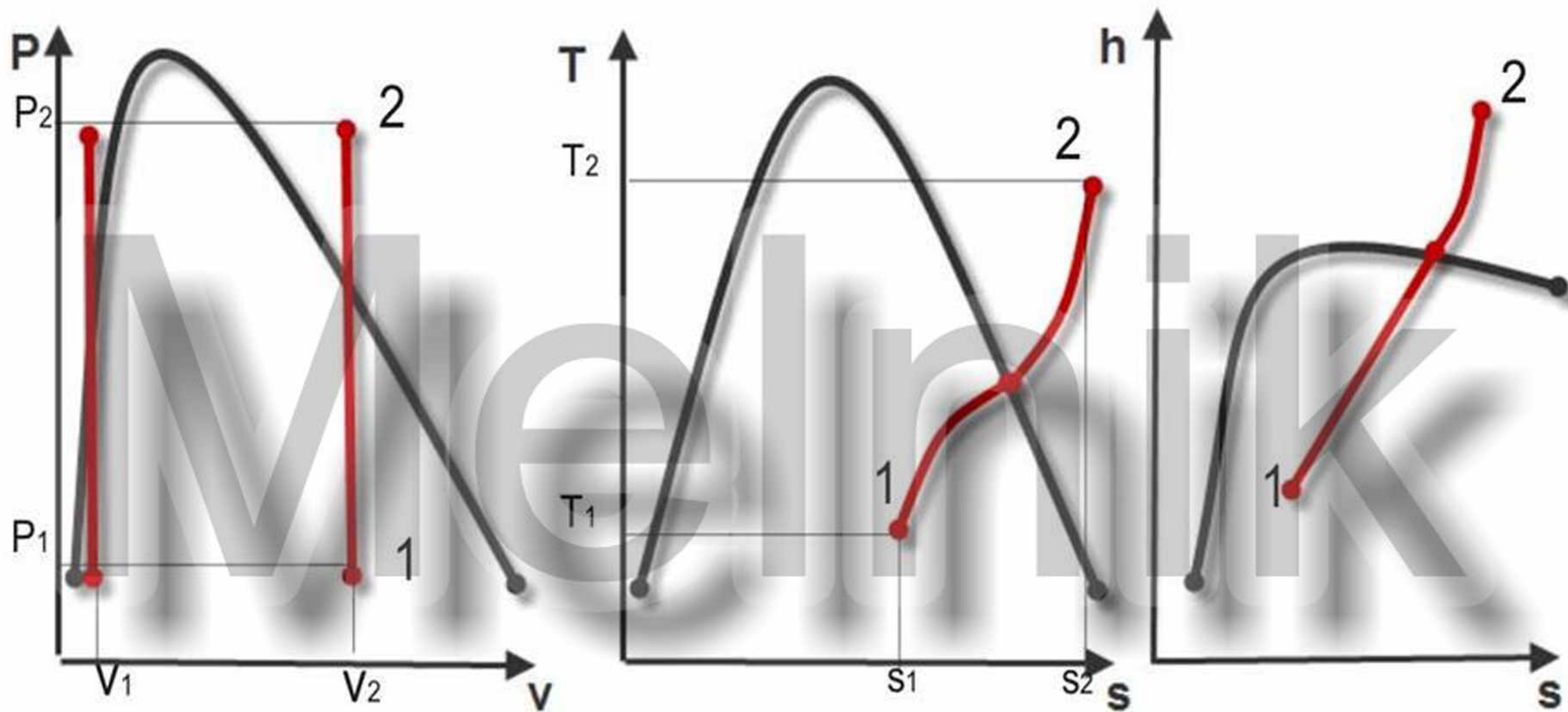


Теплота процесу: $q_{1-2} = h_2 - h_1$

Робота процесу $l_{1-2} = p(v_2 - v_1)$

Зміна внутрішньої енергії: $u_{1-2} = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1)$

ІЗОХОРНИЙ ПРОЦЕС ВОДЯНОЇ ПАРИ

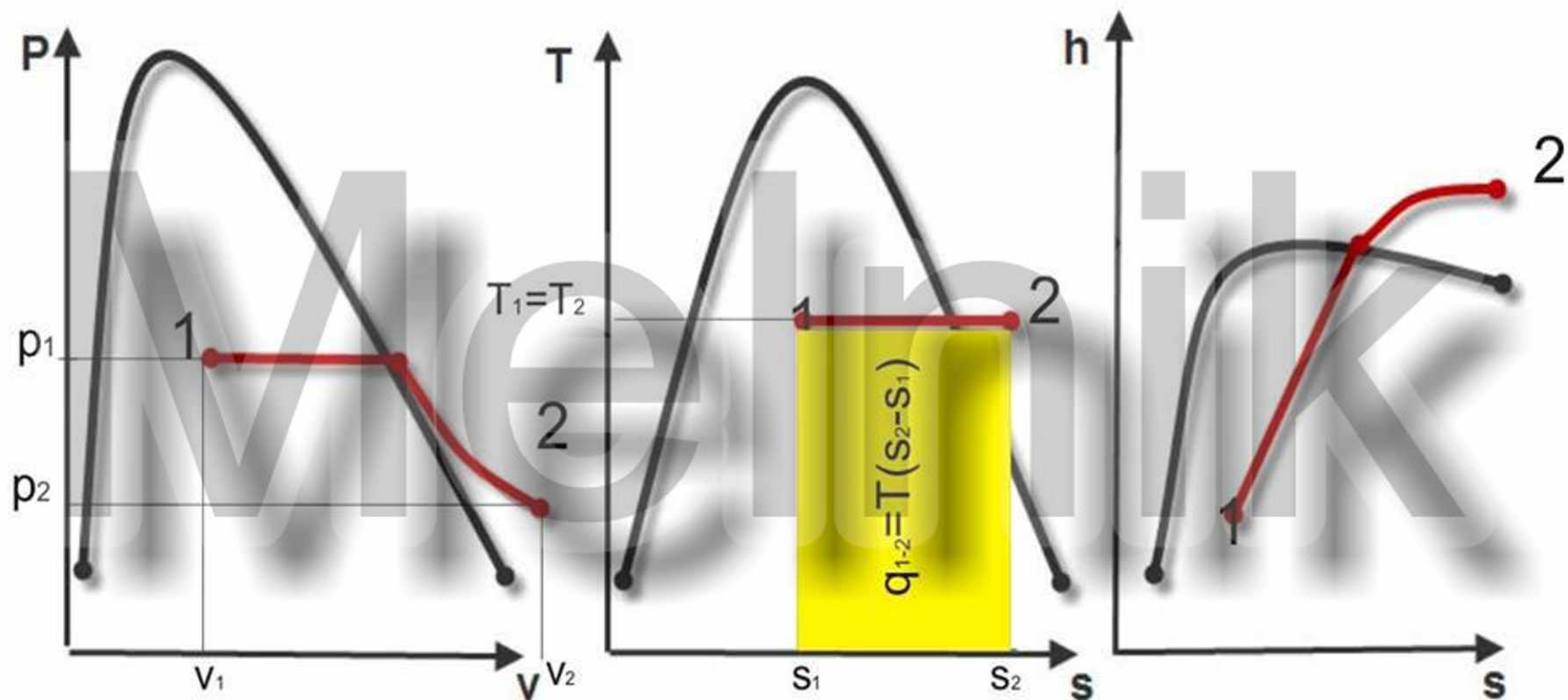


Теплота процесу: $q_{1-2} = (h_2 - p_2 v) - (h_1 - p_1 v) = (h_2 - h_1) - (p_2 - p_1)v$;

Робота процесу: $l_{1-2} = 0 (v = const)$;

Зміна внутрішньої енергії: $u_{1-2} = u_2 - u_1 = q_{1-2} = h_2 - h_1 - (p_2 - p_1)v$;

ІЗОТЕРМІЧНИЙ ПРОЦЕС ВОД'ЯНОЇ ПАРИ

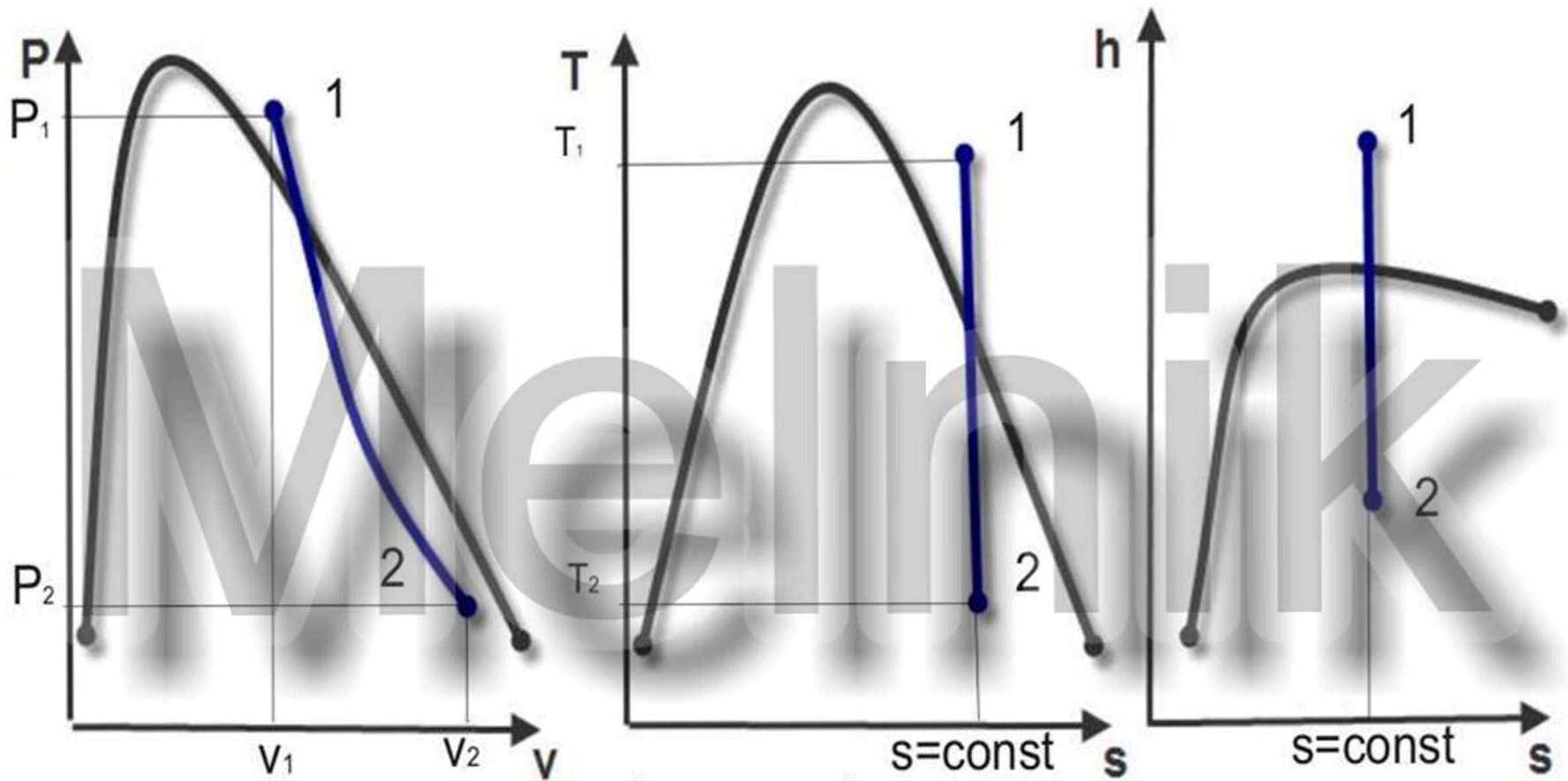


Теплота процесу: $q_{1-2} = T(s_2 - s_1)$,

Робота процесу: $l_{1-2} = T(s_2 - s_1) - [(h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)]$;

Зміна внутрішньої енергії: $u_{1-2} = [(h_2 - h_1) - (p_2 v_2 - p_1 v_1)]$

АДІАБАТНИЙ ПРОЦЕС ВОД'ЯНОЇ ПАРИ



Теплота процесу: $q_{1-2} = 0 (s = const)$,

Робота процесу: $l_{1-2} = -u_{1-2} = (h_1 - p_1 v_1) - (h_2 - p_2 v_2)$;

Зміна внутрішньої енергії: $u_{1-2} = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1)$.