

# **КРІОГЕННА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЯ**

## **Лекція 3**

# Термодинамічні засади кріогенної техніки

- Поняття мінімальної роботи
- Визначення мінімальної роботи для різних типових процесів кріогеніки
- Втрати у кріогенних системах
- Показники ефективності кріогенних систем

# Поняття мінімальної роботи

Загальна витрата енергії у криогенній установці:

$$L = L_{\min} + \Delta L$$

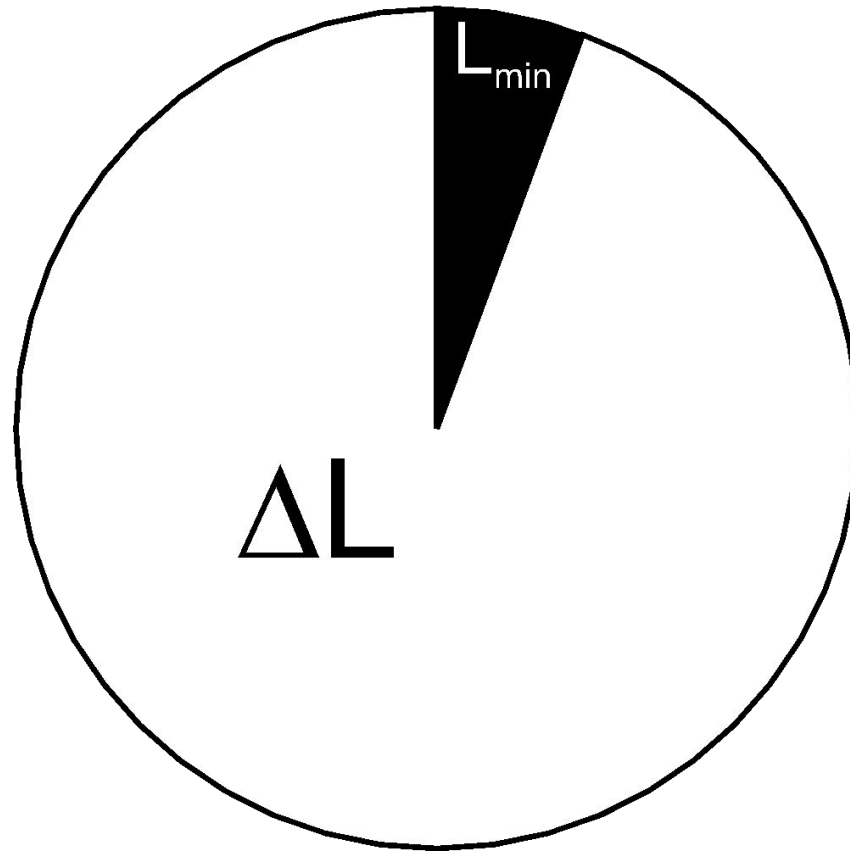
$L_{\min}$  – мінімальна витрата енергії, необхідна для здійснення ідеальних (оборотних) процесів, тобто роботи термодинамічно ідеальної системи;

$\Delta L$  – витрати енергії на компенсацію втрат у реальних процесах

# Поняття мінімальної роботи

У криогенних системах

$$\Delta L \gg L_{\min}$$



# Поняття мінімальної роботи

Питомі витрати роботи – на 1 кг робочого тіла:

$$I = L/G = I_{\min} + \Delta I$$

$I_{\min}$  – мінімальна питома робота для термодинамічно ідеальної системи;

$\Delta I$  – питомі витрати роботи на компенсацію втрат у реальних процесах

# Поняття мінімальної роботи

Мінімальна робота визначається у різний спосіб для типових процесів кріогеніки:

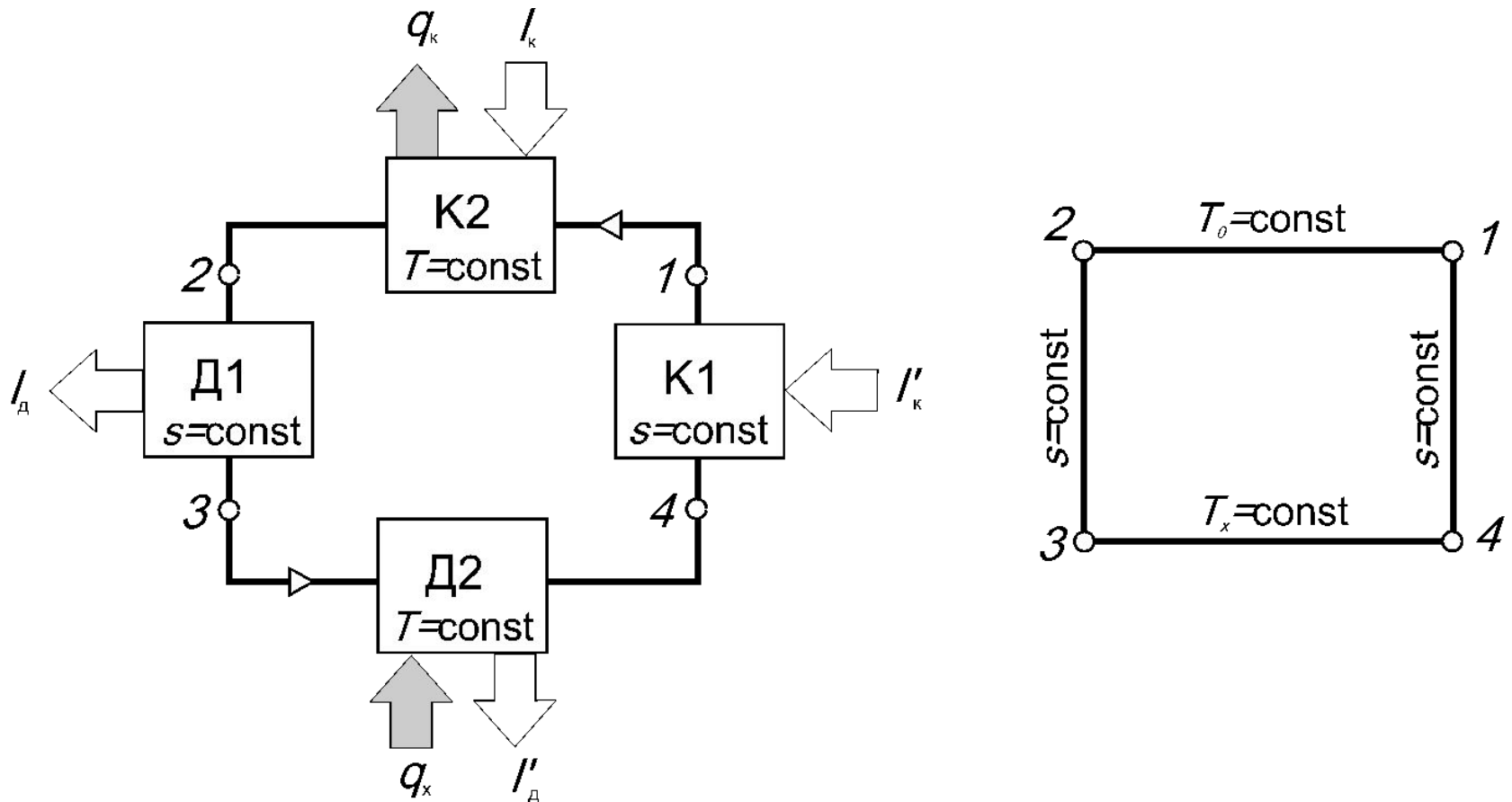
- Термостатування
- Охолодження
- Зрідження та кристалізація
- Розділення газової суміші

# Термостатування

**Мета** – підтримувати температуру об'єкта чи речовини на сталому рівні ( $< 120 \text{ K}$ )

**Засіб** – відведення теплоти від теплонадходжень на вищий температурний рівень, як правило, у довкілля (близько  $300 \text{ K}$ )

# Термостатування

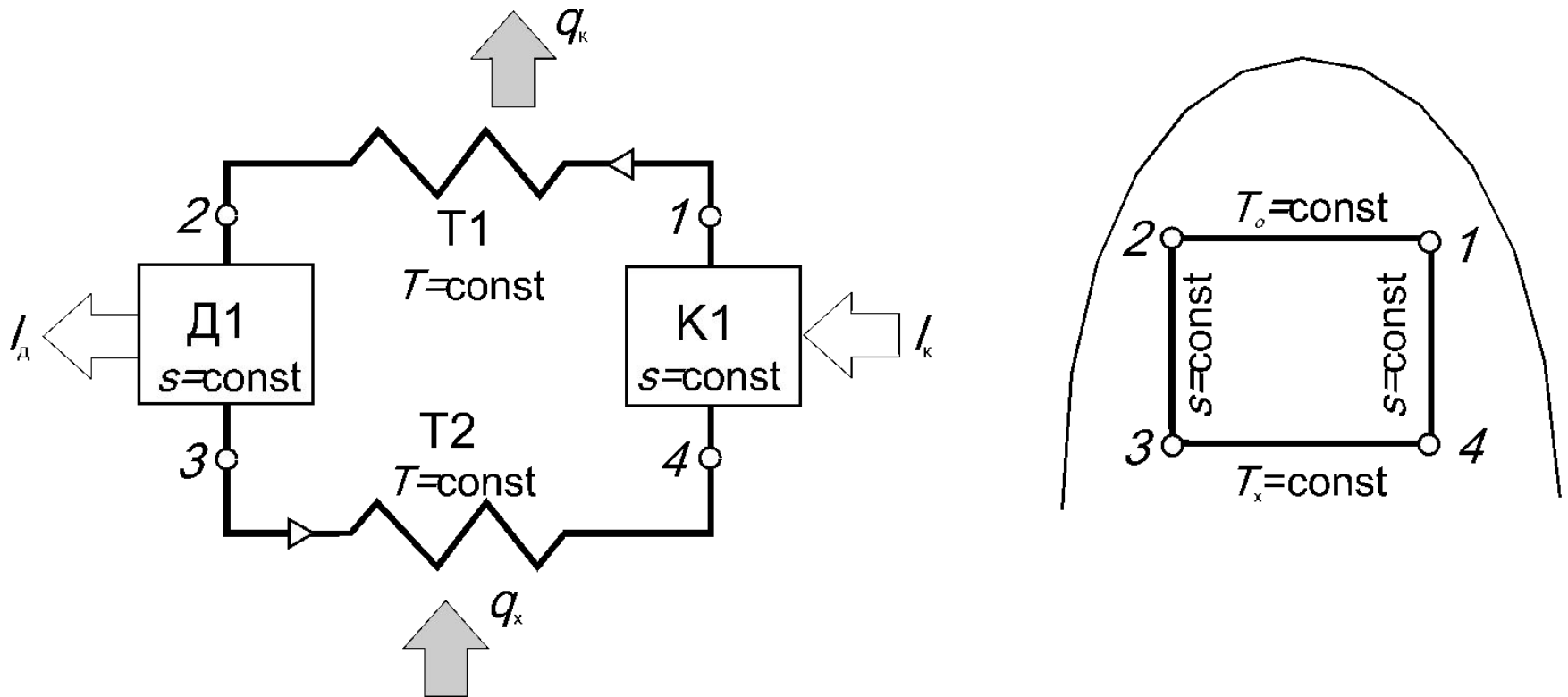


**Ідеальна система термостатування**

**K1, K2 – компресори; Д1, Д2 – детандери**



# Термостатування



Ідеальна система термостатування  
у області вологої пари (ізобари = ізотерми)  
К1, К2 – компресори; Т1, Т2 – теплообмінники ( $P, T = \text{const}$ )

# Термостатування

Мінімальна робота циклу

$$I_{\min} = (I_{\text{к}} + I'_{\text{к}}) - (I_{\text{д}} + I'_{\text{д}})$$

$$I_{\min} = q_{\text{к}} - q_{\text{х}}$$

$$q_{\text{к}} = T_{\text{o}}(s_1 - s_2), \quad q_{\text{х}} = T_{\text{x}}(s_4 - s_3)$$

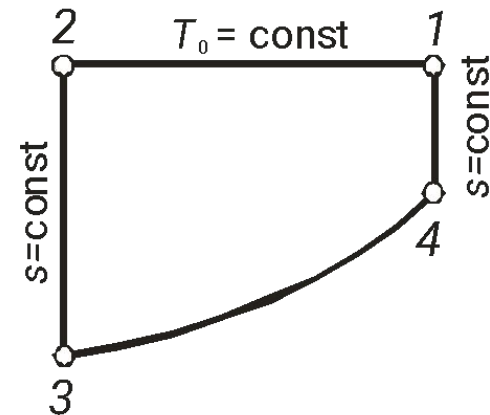
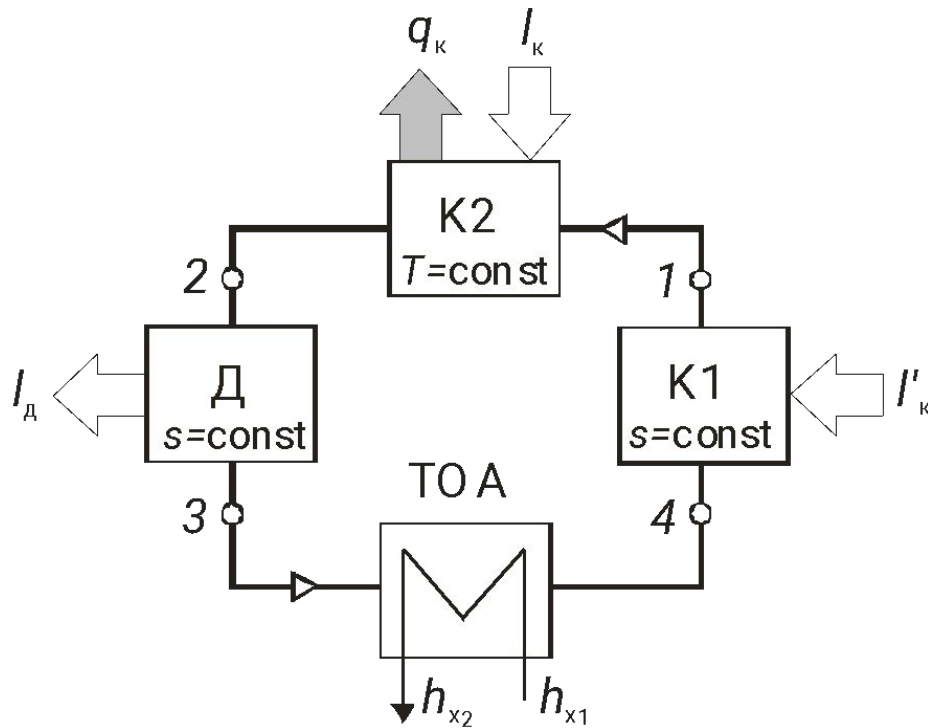
З урахуванням того, що  $(s_4 - s_3) = (s_1 - s_2)$ :

$$I_{\min} = (T_{\text{o}} - T_{\text{x}})(s_1 - s_2)$$

# Охолодження

**Мета** – знизити температуру речовини (найчастіше газу) від  $T_{x1}$  до  $T_{x2}$  ( $< 120$  K)

**Засіб** – відведення теплоти від газу у ізобарному теплообміннику ТОА



# Охолодження

Якщо вважати теплообмінник ТООА ідеальним, то

$$q_x = h_{x1} - h_{x2} = h_4 - h_3$$

З рівняння теплового балансу системи:

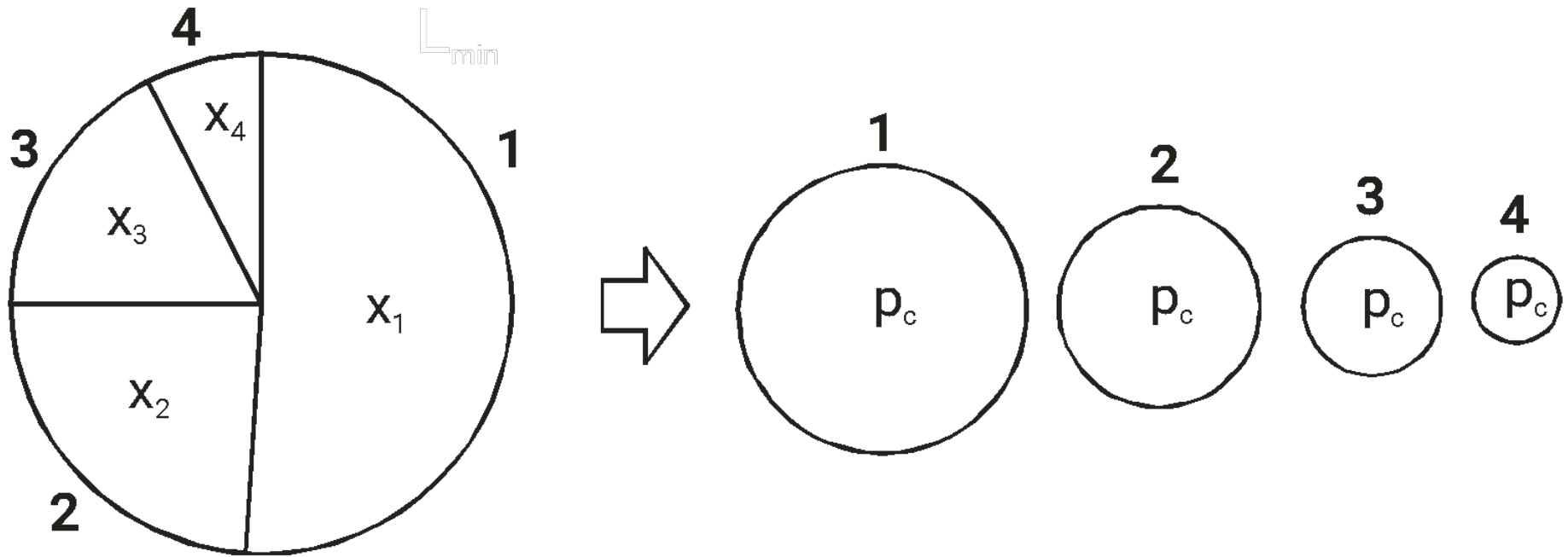
$$I_k + I'_k - I_d = I_{\min} = q_k - q_x$$

звідки мінімальна робота охолодження:

$$I_{\min} = T_o(s_1 - s_2) - (h_4 - h_3)$$

# Розділення газової суміші

З термодинамічної точки зору розділення аналогічне стисненню кожного компонента суміші від парціального тиску  $p_i$  (пропорційний молярній частці цього компонента  $x_i$ ) до загального тиску суміші  $p_c$



$$p_c = p_1 + p_2 + p_3 + p_4$$

# Розділення газової суміші

Мінімальна робота розділення суміші  
(на 1 моль):

$$I_{p_{min}} = -R_{\mu} T_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln(x_i)$$

де  $R_{\mu} = 8,31$  Дж/(моль·К) — універсальна газова стала;  $T_0$  — початкова температура суміші, К;  
 $x_i$  — молярна частка у суміші  $i$ -го компонента

# Зрідження та кристалізація

**Мета** – знизити температуру речовини до температури фазового переходу та здійснити фазовий перехід, відводячи теплоту

Для *чистої речовини* фазовий перехід за сталого тиску проходить при сталій температурі, отже це – аналог термостатування

Для *суміші* зниження парціального тиску компонента призводить до зниження температури фазового переходу

# Зрідження та кристалізація

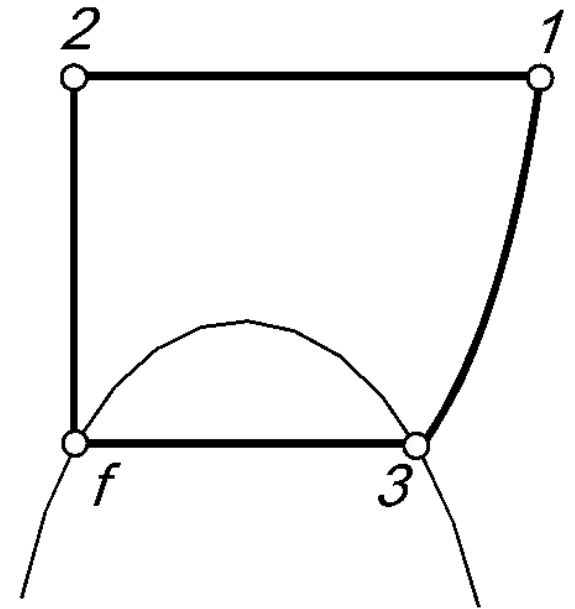
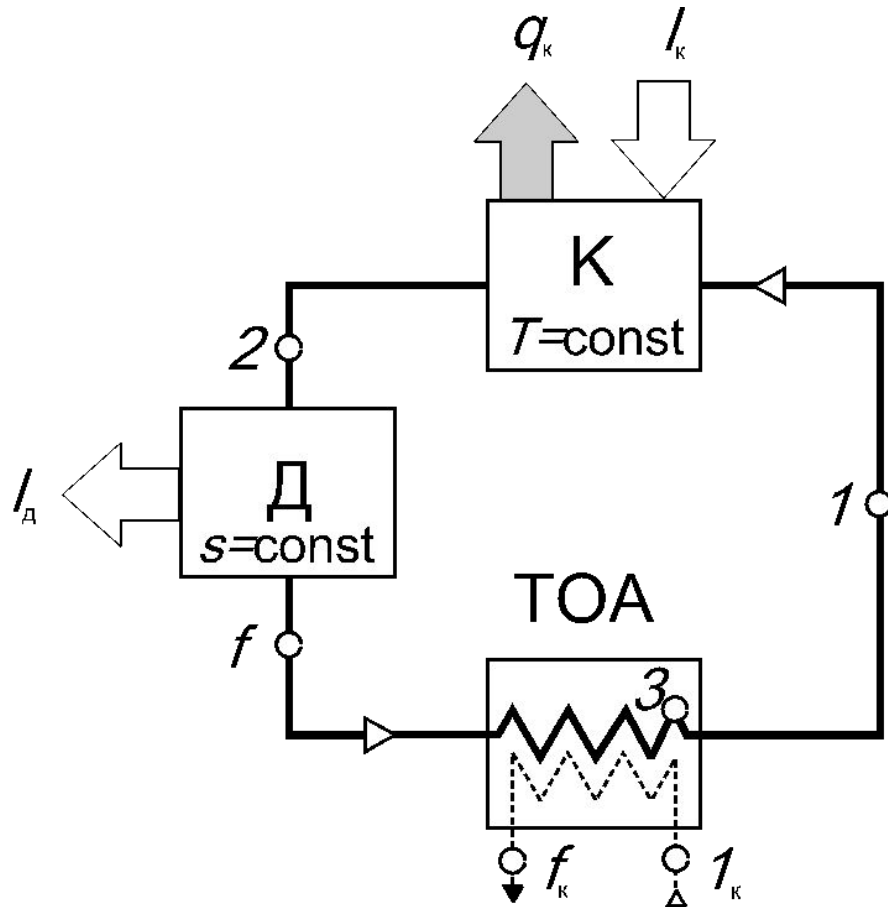
Для **чистої речовини** фазовий перехід за сталого тиску проходить при сталій температурі – аналог термостатування



# Зрідження та кристалізація

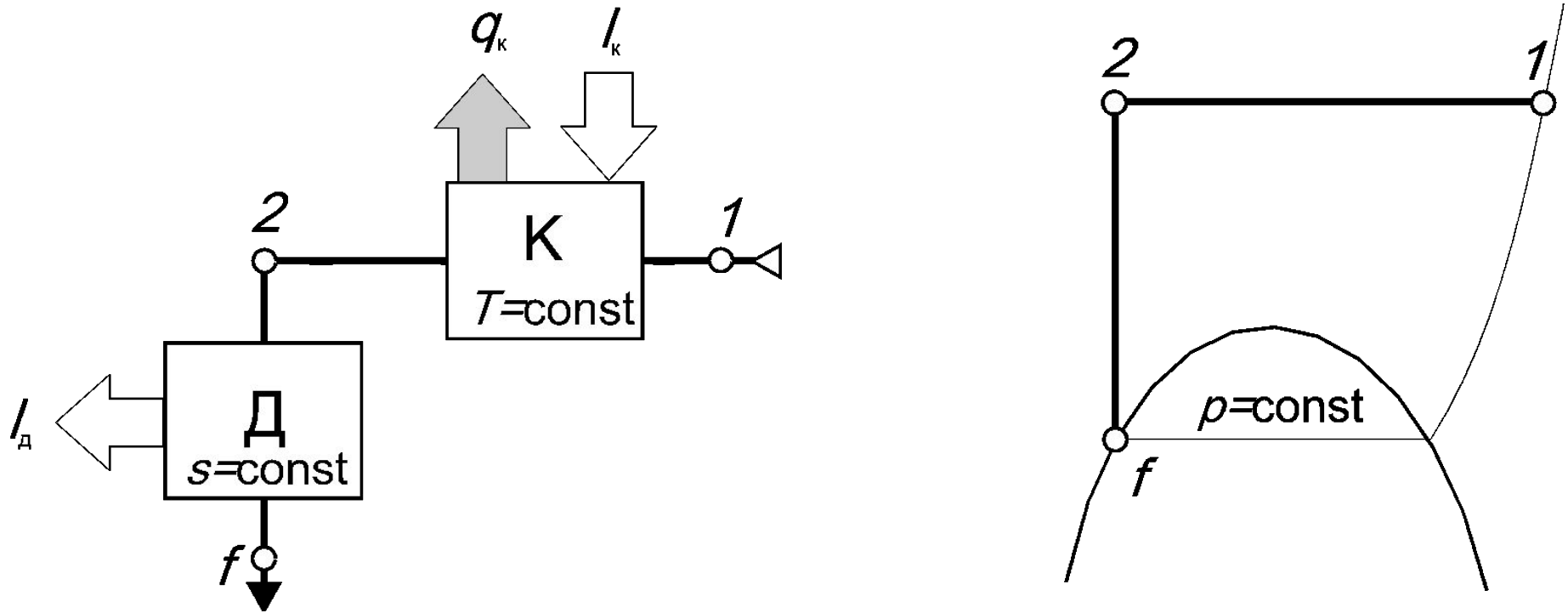
Для **суміші** зниження парціального тиску компонента під час зрідження чи кристалізації призводить до зниження температури цього фазового переходу

# Зрідження та кристалізація



Ідеальна система зрідження з окремим робочим тілом

# Зрідження та кристалізація



Ідеальна система зрідження без окремого робочого тіла (розімкнений цикл)

# Зрідження та кристалізація

Мінімальна робота зрідження газу виконана у процесі **1 – 2 – f** становить:

$$l_{\min} = l_{\text{к}} - l_{\text{д}} = T_o(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) - (h_2 - h_f)$$
$$l_{\min} = T_o(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

З іншого боку, для ізобарного процесу **f – 3 – 1** :

$$l_{\min} = q_{\text{к}} - q_{\text{х}} = T_o(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

# Зрідження та кристалізація

Мінімальна робота зрідження газу:

$$l_{\min} = T_o(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

Мінімальна робота зрідження  
**не залежить від тиску стиснення,**  
а залежить лише від початкових  
параметрів і виду газу

# Зрідження та кристалізація

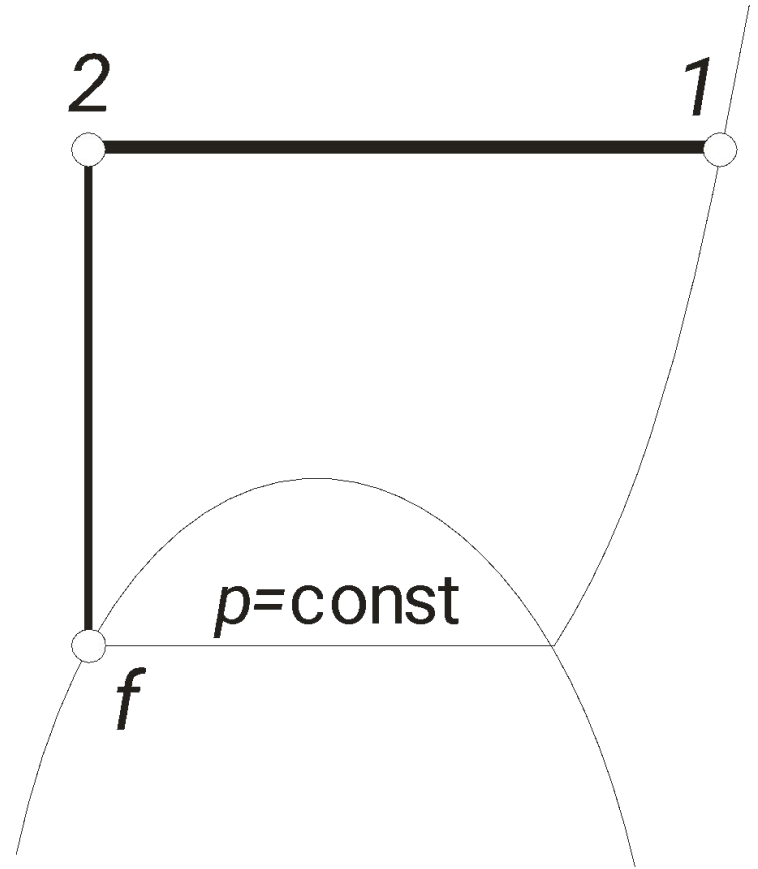
Стискання слід вести до  
ентропії  $s_2 = s_f$

Для більшості газів  
відповідне значення  
тиску  $p_2 = 100 \dots 200$  ГПа

Сучасні системи працюють  
з

$p_2 = 10 \dots 20$  МПа

Далі ентропію знижують  
охолоджуючи газ



# Зрідження та кристалізація

Питомі роботи зрідження деяких газів від стану  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ,

Газ	Питома робота зрідження, $\text{кВт} \cdot \text{год/кг}$	
	Мінімальна, $l_{\min}$	Дійсна, $l$
Азот $\text{N}_2$	0,213	1,2–1,8
Кисень $\text{O}_2$	0,177	1,0–1,5
Водень $\text{H}_2$	3,31	22,0–42,0

# Втрати у кріогенних системах

Дійсна робота **значно** перевищує мінімальну

Причина – різноманітні **втрати**:

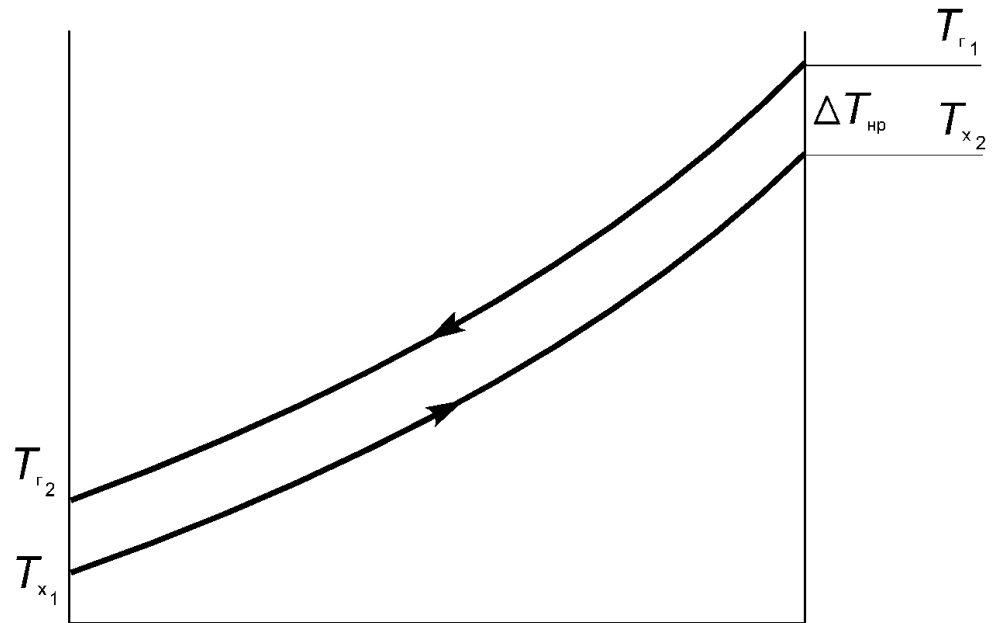
- через недорекуперацію
- через теплонадходження з довкілля
- гідравлічні
- у компресорах, детандерах, насосах
- інші



# Втрати через недорекуперацію

$$q_{\text{нр}} = c_p \Delta T_{\text{нр}}$$

Теплий потік газу  
не в повній мірі  
охолоджується  
ХОЛОДНИМ ПОТОКОМ



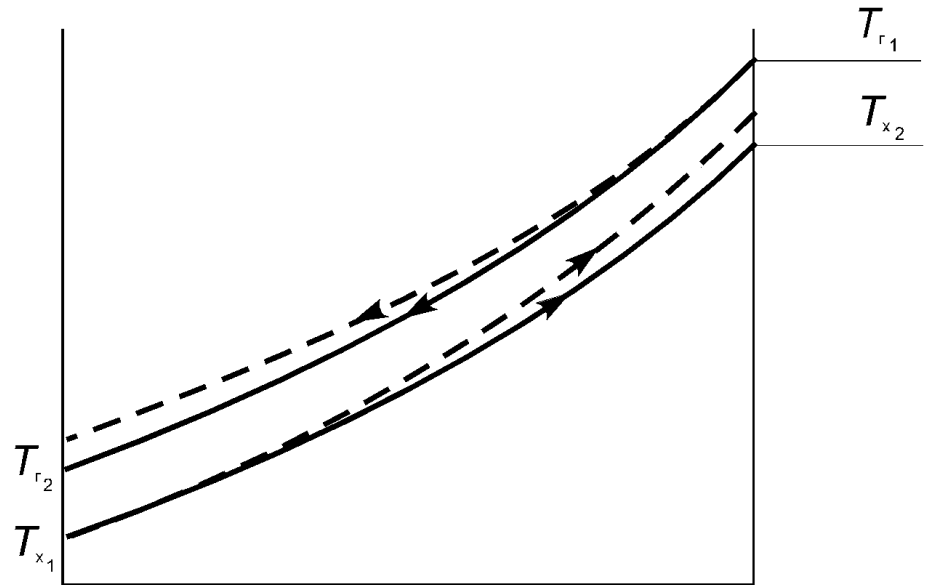
**Причина** – неідеальність процесів у теплообмінниках, потреба у хоч якомусь температурному напорі.

**Шляхи зменшення** – збільшувати площу поверхні теплообміну та коефіцієнт теплопередачі ТОВА

# Втрати через теплонадходження

$$q_{\text{ТН}} = \sum kF_{\text{зовн}} (T_{\text{зовн}} - T_{\text{вн}})$$

Підвищують  
ентальпію газу та його  
температуру



**Причина** – неідеальність теплоізоляції апаратів,  
різниця температур у апараті і довкілля

**Шляхи зменшення** – вдосконалювати  
теплоізоляцію, зменшувати площу контакту з  
довкіллям, знижувати температуру довкілля

# Гідравлічні втрати

Втрати тиску у трубопроводах, каналах, зменшують різницю тисків ( $p_1 - p_2$ ), знижують фактичну холодопродуктивність

**Причина** – тертя рідин та газів у каналах

**Шляхи зменшення** – оптимізація гідравлічних схем установок, так, щоб втрати тиску не перевищували :

*для потоку низького тиску* –  $\Delta p_1 = 20 \dots 40$  кПа,

*для потоку високого тиску* –  $\Delta p_2 = 100 \dots 300$  кПа

$(p_2 > 1$  МПа) або  $\Delta p_2 = 30 \dots 60$  кПа ( $p_2 < 1$  МПа)

# **Втрати у компресорах, детандерах, насосах**

Зростання ентропії газу, додаткові тепловиділення, недоохолодження

**Причина** – необоротність процесів у компресорах, детандерах, насосах (міра необоротності визначається ККД машини)

**Шляхи зменшення** – вибір якомога ефективнішого обладнання

# Інші втрати

**Причина** – витікання газу через нещільності, тепловиділення під час деяких процесів у низькотемпературній зоні (конверсія, відігрівання, адсорбція тощо)

**Шляхи зменшення** – оптимізація конструкцій установок та способів їх експлуатації

# Показники ефективності

За їх допомогою оцінюють міру досконалості реальної кріогенної системи

1. Реальна затрата роботи на одиницю маси стиснутого газу,  $I_p$
2. Реальна затрата роботи на одиницю маси зрідженого газу,  $I_{0p}$

$$I_{0p} = I_p / y$$

$y$  – вихід зрідженого газу

# Показники ефективності

## 3. Холодильний коефіцієнт циклу

$$\varepsilon = \frac{q_x}{l_p}$$

$q_x$  – питома холодопродуктивність даного циклу

$l_p$  – дійсна питома робота для даного циклу

# Показники ефективності

## 4. Термодинамічний (ексергетичний) ККД циклу

$$\eta_t = \eta_e = \frac{l_{\min}}{l_p} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{ід}}}$$

$l_{\min}$  – мінімальна питома робота для даного процесу

$l_p$  – дійсна питома робота для даного циклу

$\varepsilon_{\text{ід}}$  – холодильний коефіцієнт ідеального циклу



# Показники ефективності

Холодильний коефіцієнт ідеального циклу

для систем зрідження:

$$\varepsilon_{\text{ід}} = \frac{h_1 - h_f}{l_{\text{min}}}$$

для рефрижераторних систем  
(зворотний цикл Карно):

$$\varepsilon_{\text{ід}} = \frac{T_x}{T_0 - T_x}$$

$T_x$ ,  $T_0$  – відповідно нижній та верхній температурні рівні циклу, К (зазвичай верхній рівень відповідає температурі довкілля, а нижній – температурі об'єкта).

**Дякую за увагу!**