

КРІОГЕННА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Лекція 2

Основні способи отримання низьких та наднизьких температур

- Дроселювання
- Адіабатне розширення
- Адіабатне відкачування пари
- Рефрижератори розчинення
- Адіабатне розмагнічування
- Інші способи

Мета

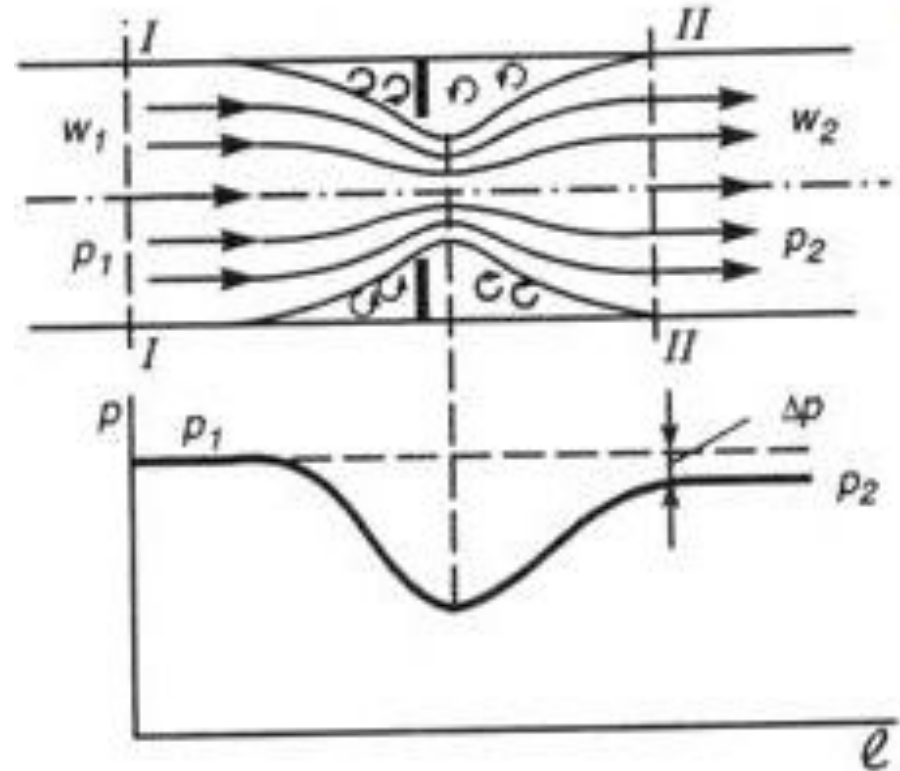
Отримати потрібну температуру, що лежить у кріогенній області, та відвести потрібну теплоту від об'єкта, бажано з мінімальними витратами енергії та КОШТІВ

Дроселювання

Ефект Джоуля - Томсона

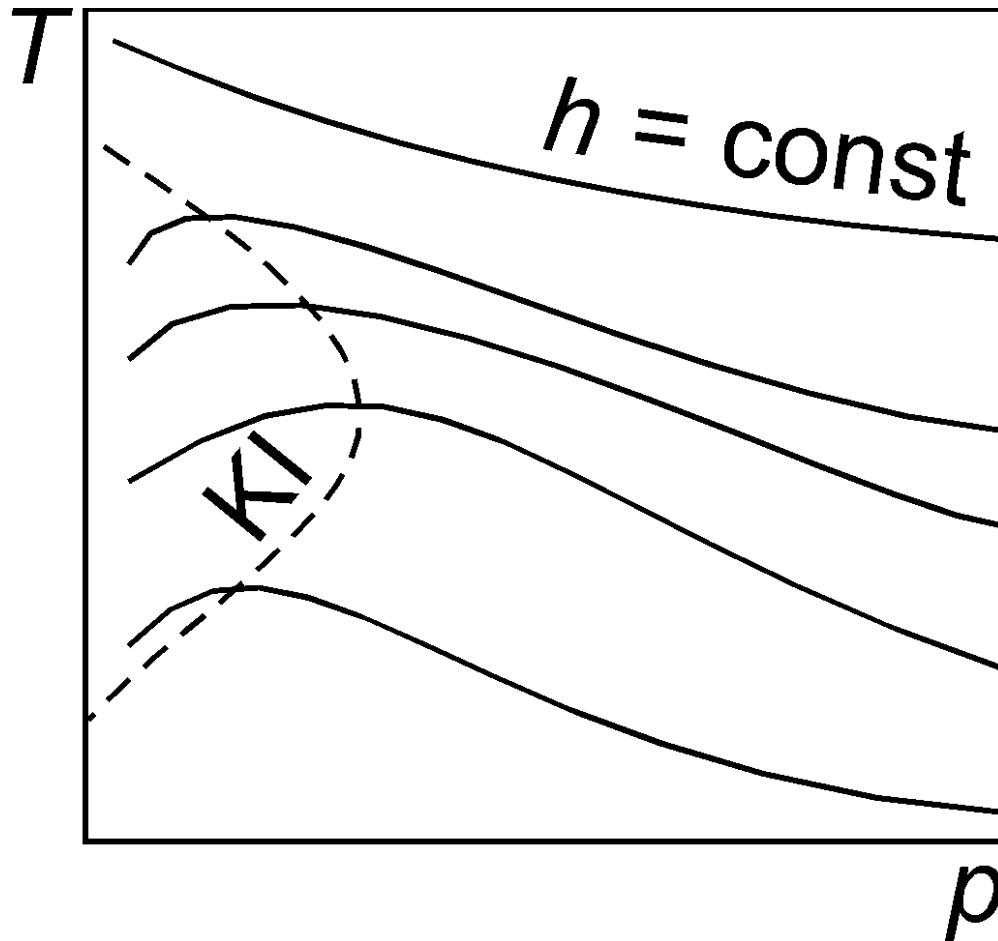
Дроселювання – ізоентальпійний процес.

Для ідеального газу проходить без теплового ефекту.



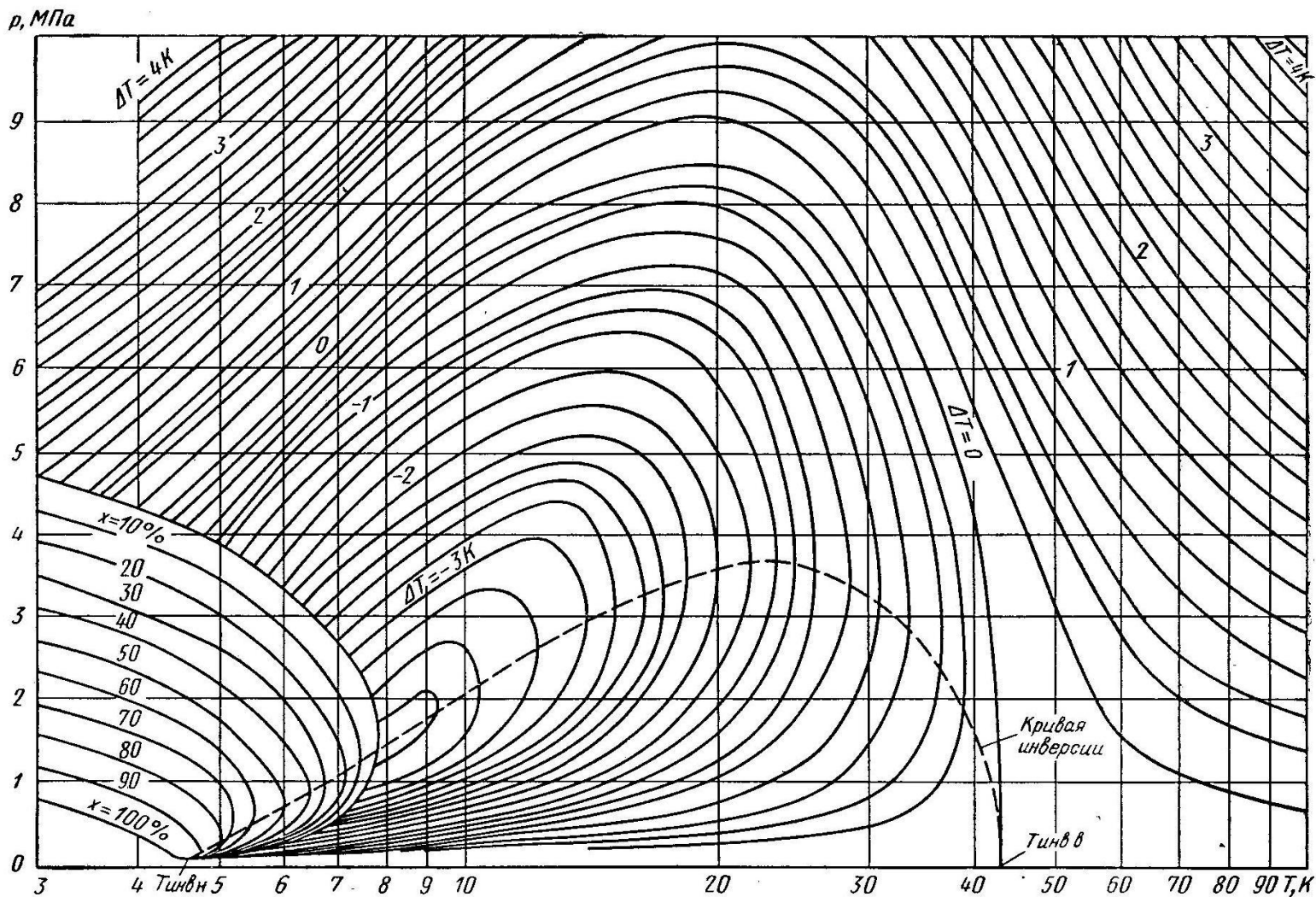
Дроселювання

Вигляд ізоентальп для реального газу



KI – крива інверсії
проходить через
максимуми
ізоентальп,
 $\partial T / \partial p = 0$

Дроселювання



Крива інверсії та зміни температури для He-4 при дроселюванні від стану (p, T) до $0,1$ МПа та максимальна (верхня) температура інверсії $(p=0,1\text{МПа})$

Дроселювання

Криві
інверсії
для газів:

а – неон

б – гелій

в – азот

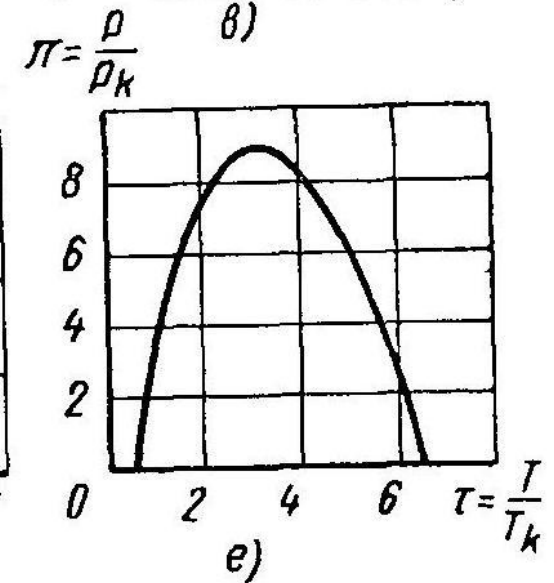
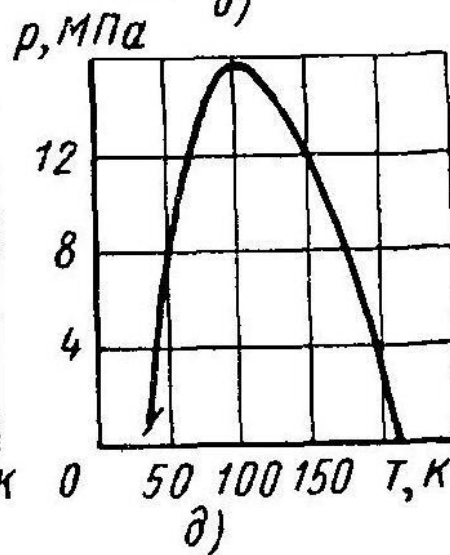
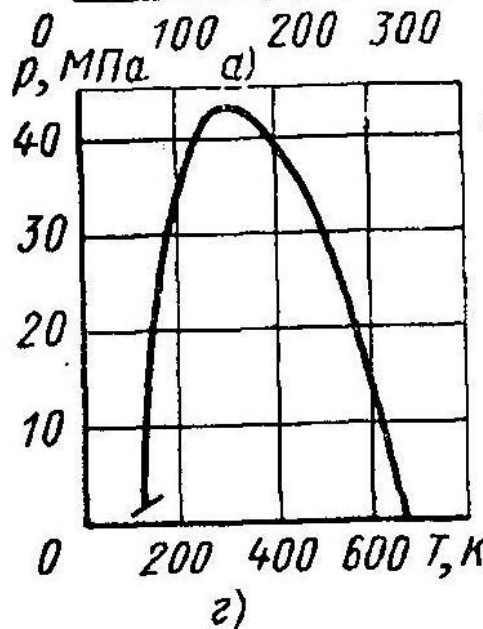
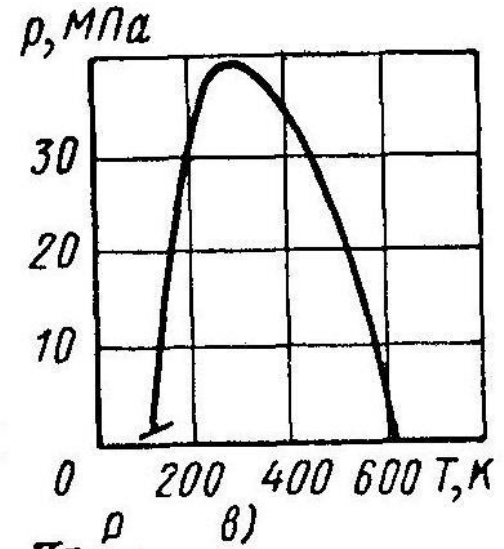
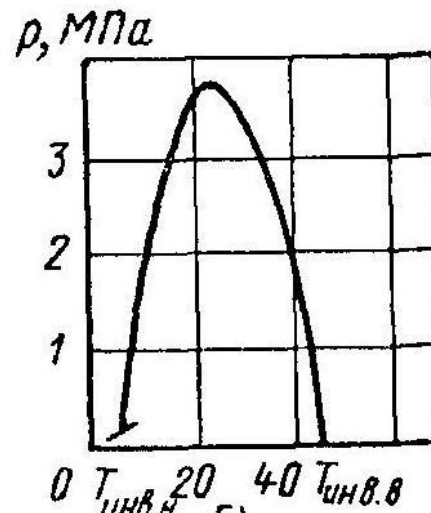
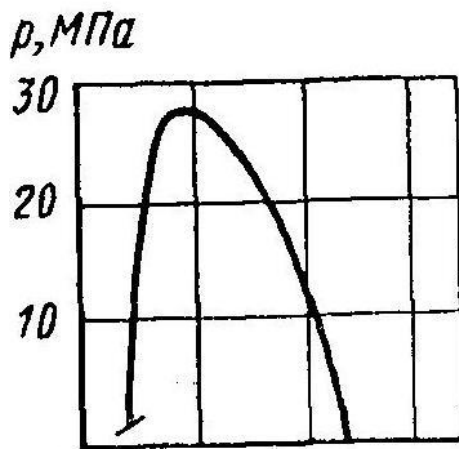
г – повітря

д – водень

е – газ

Ван-дер-

Ваальса



Дроселювання

Максимальна температура інверсії, $T_{i \max}$, К

Гелій – 4	45
Водень	205
Неон	250
Повітря	603
Азот	621
Кисень	939
Аміак	1994

Дроселювання

Залежно від початкових параметрів газу температура під час дроселювання може:

збільшуватися

зменшуватися

не змінюватися

Якщо $T_{\text{поч}} > T_{i \text{ max}}$, то незалежно від початкового тиску газ буде **нагріватися**.

Дроселювання

Коефіцієнт Джоуля-Томсона

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T$$

або

$$\mu_{JT} = -\frac{1}{c_p} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + \left(\frac{\partial(pv)}{\partial p} \right)_T \right]$$

Дроселювання

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_T < 0$$

бо зменшується відстань між молекулами

$$\left(\frac{\partial(pv)}{\partial p} \right)_T$$

Знак залежить від тиску і температури газу

Дроселювання

Рівняння Ван дер Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

де a – враховує сили міжмолекулярної взаємодії, b – враховує розмір молекул

Дроселювання

З рівняння Ван дер Ваальса

$$\mu_{JT} = \frac{(2a / RT)(1 - b / v)^2 - b}{c_p \left\{ 1 - (2a / vRT)(1 - b / v)^2 \right\}}$$

Для великих об'ємів $v \rightarrow \infty$. Тоді:

$$\mu_{JT} = \frac{1}{c_p} \left(\frac{2a}{RT} - b \right)$$

Дроселювання

Для точок на кривій інверсії $\mu_{JT} = 0$, тобто

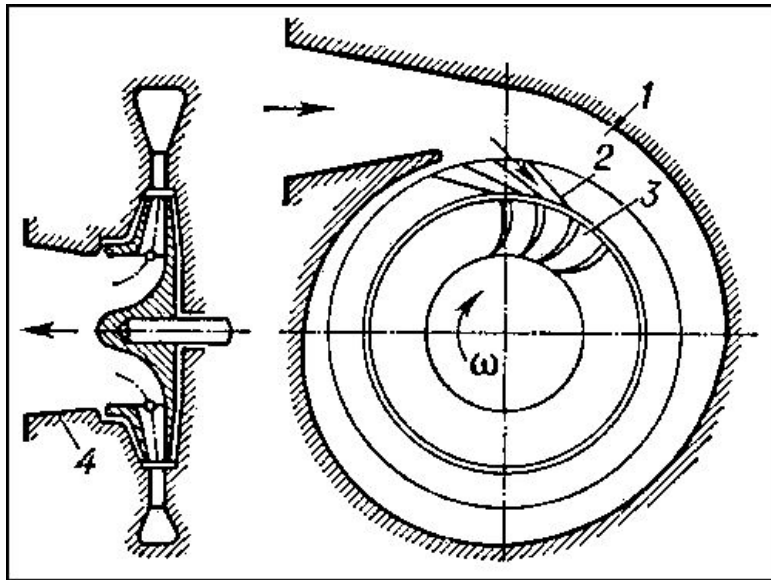
$$T_i = \frac{2a}{bR} \left(1 - \frac{b}{v} \right)^2$$

Максимальна температура інверсії коли $b/v = 0$, тобто

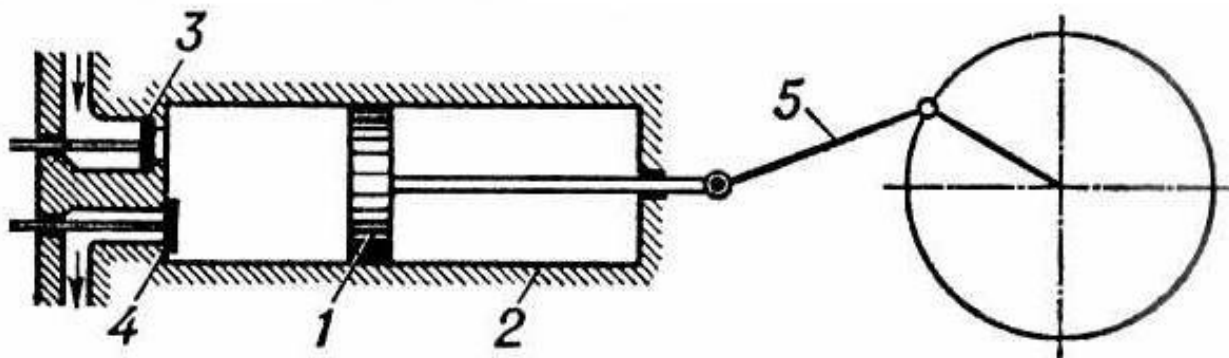
$$T_{i \max} = \frac{2a}{bR}$$

Розширення у детандері

Газ розширюється, виконуючи зовнішню роботу



Турбодетандер



Поршневий детандер

Розширення у детандері

Коефіцієнт ізоентропійного розширення

$$\mu_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = - \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_p \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p > 0$$

- Розширення у детандері газу **завжди** призводить до **зниження** його температури
- Розширення у детандері для того ж діапазону тисків дає **нижчу** температуру ніж дроселювання
- Виконану газом роботу можна корисно використати

Розширення у детандері

Проблеми при роботі з вологою парою:

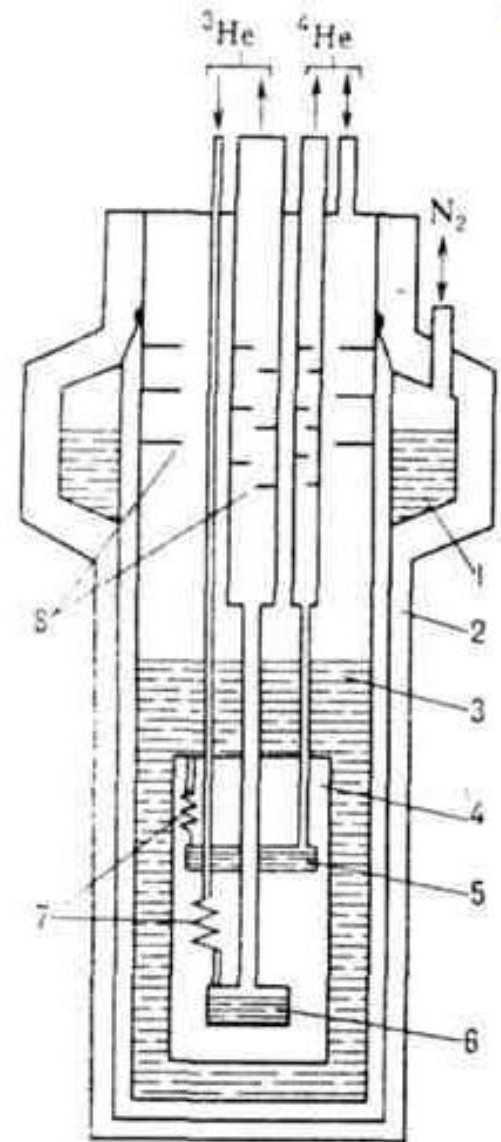
- Нестискуваність рідини
- Ерозія лопаток турбодетандера
- Ускладнення змащування

Вирішення: зрідження газу проводити не у детандері, а у дроселі, охолоджений детандерний потік використовувати для охолодження дросельного потоку

Адіабатне відкачування пари

У ванні з ^4He , що є тепловим екраном, міститься вакуумна камера, у якій підвішені на тонкостінних металевих трубках одноградусна камера і камера відкачування ^3He . До одноградусної камери через дросель постійно надходить рідкий ^4He з ванни, і відкачується, підтримуючи температуру (1,2-1,4К).

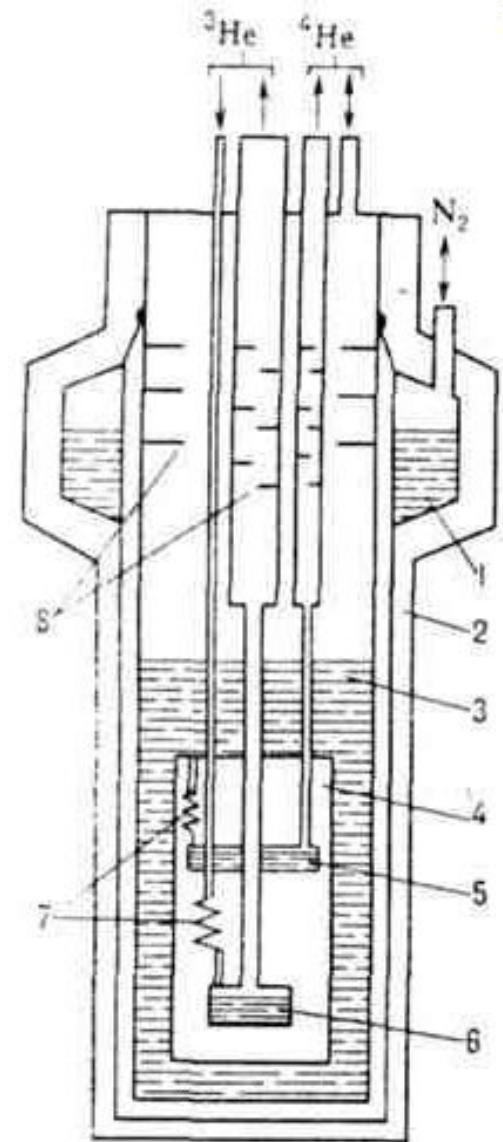
Схема кріостата безперервного відкачування пари ^3He :
1 - азотна ванна, 2 - мідний екран, 3 - гелієва ванна, 4 - вакуумна камера, 5 - одноградусна камера (камера безперервного відкачування ^4He), 6 - камера відкачування ^3He , 7 - дроселі на линиях повернення ^3He и ^4He , 8 - екрани теплового випромінення.



Адіабатне відкачування пари

Одноградусна камера потрібна для конденсації та охолодження ${}^3\text{He}$, що йде до камери відкачування ${}^3\text{He}$. Після одноградусної камери потік рідкого ${}^3\text{He}$ дроселюється і йде у камеру відкачування ${}^3\text{He}$. При цьому близько 10% рідини йде на те, щоб охолодити її від 1,2К до 0,3К.

Схема кріостата безперервного відкачування пари ${}^3\text{He}$:
1 - азотна ванна, 2 - мідний екран, 3 - гелієва ванна, 4 - вакуумна камера, 5 - одноградусна камера (камера безперервного відкачування ${}^4\text{He}$), 6 - камера відкачування ${}^3\text{He}$, 7 - дросселі на линиях повернення ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, 8 - екрани теплового випромінення.



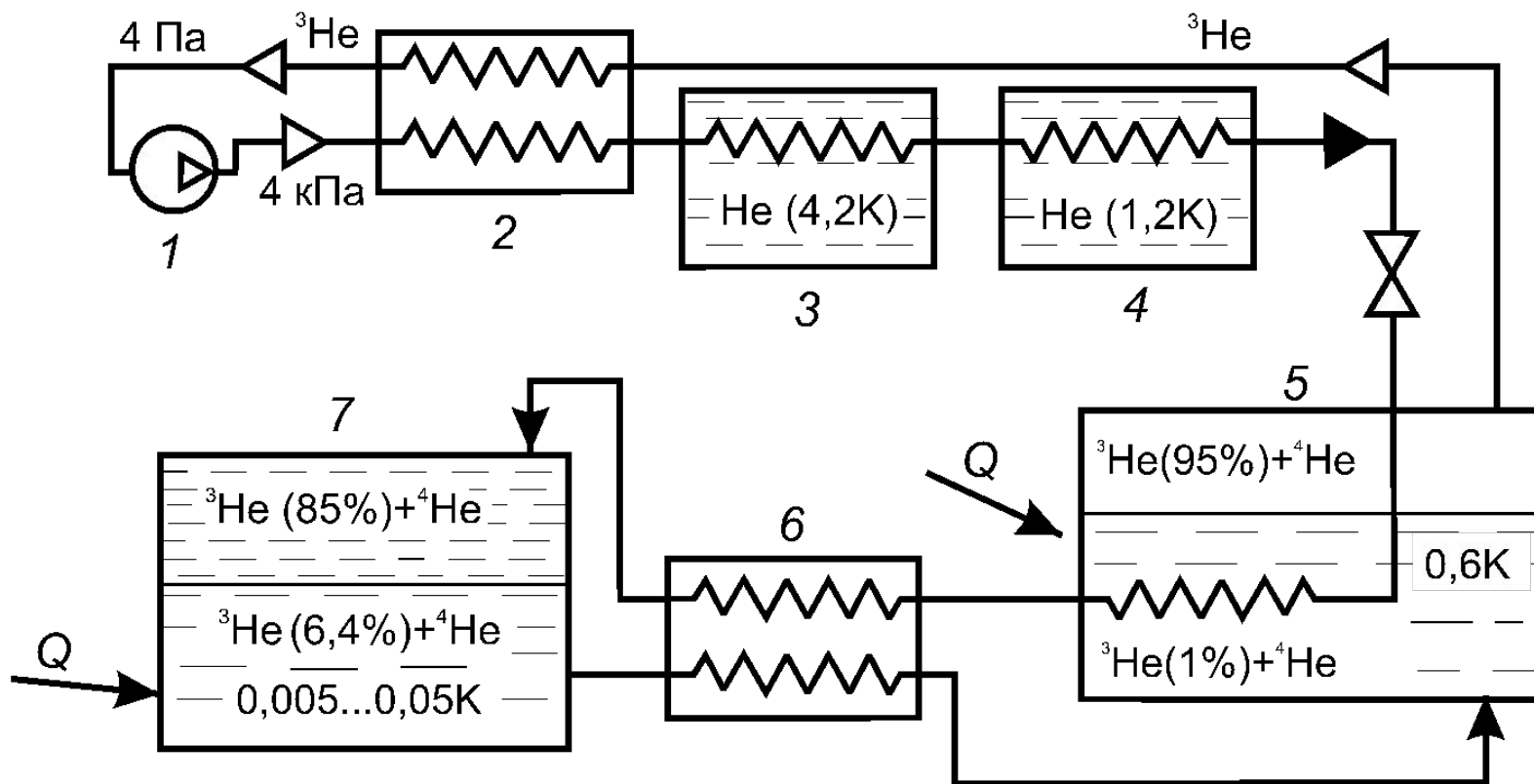
Адіабатне відкачування пари

Температури, одержувані за допомогою адіабатичного відкачування пари різних кріорідин

Речовина	Нормальна температура кипіння при $p = 0,1$ МПа, К	Гранична температура, одержувана методом відкачування, К
Гелій-3	3,2	0,25
Гелій-4	4,2	0,7
Водень	20,4	13,9
Неон	27,2	24,5
Азот	77,3	63,2
Аргон	87,4	83,8
Кисень	90,1	54,4

Рефрижератори розчинення

^3He розчиняється у ^4He , а при $T < 0,827\text{ K}$ ця суміш сама сепарується на 2 фази. При переході ^3He до нижньої фази поглинається теплота.



Адіабатне розмагнічування

Використовують
парамагнітні солі
(церієво-магнієвий
нітрат та інші)

Магнітні диполі при
намагнічуванні
орієнтуються за
силовими лініями,
при цьому
виділяється
теплота і навпаки

Температурний рівень
– 10^{-3} К

Намагнічування при 1 К
з відведенням теплоти,
орієнтація диполів

Теплоізоляція
парамагнетика

Зняття магнітного поля,
дезорієнтація диполів,
охолодження

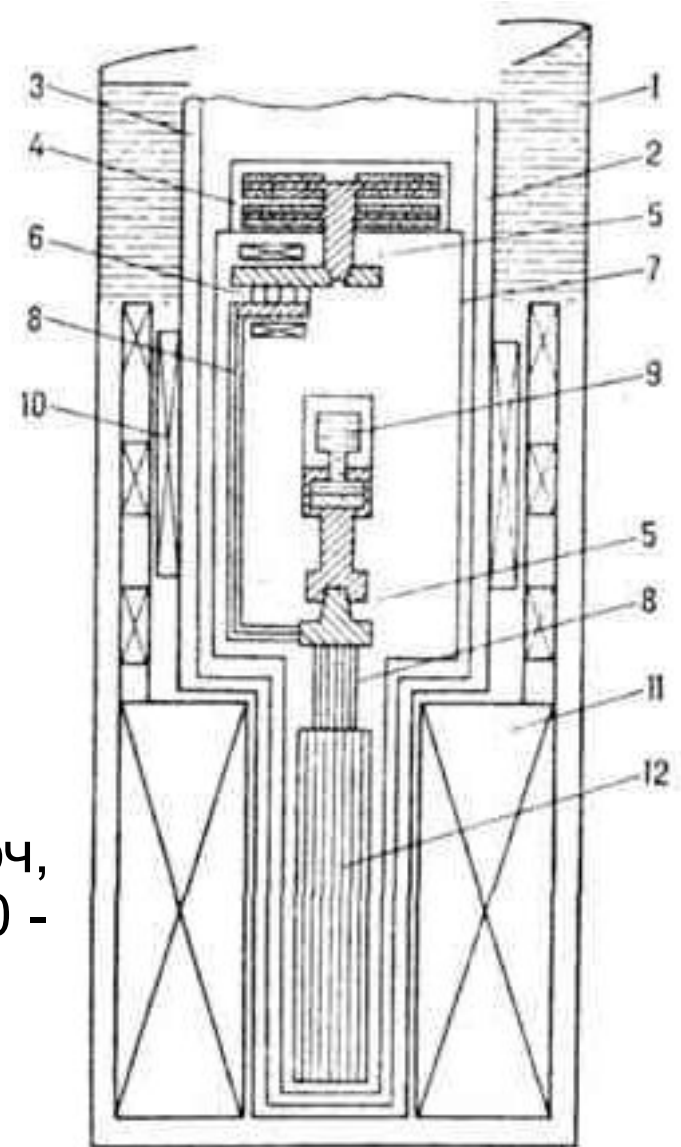
Адіабатне розмагнічування

Для отримання температур
 $10^{-6} \dots 10^{-9} \text{ K}$

використовують адіабатне
розмагнічування ядер міді,
кобальту, попередньо
охолоджених до $0,01 \text{ K}$

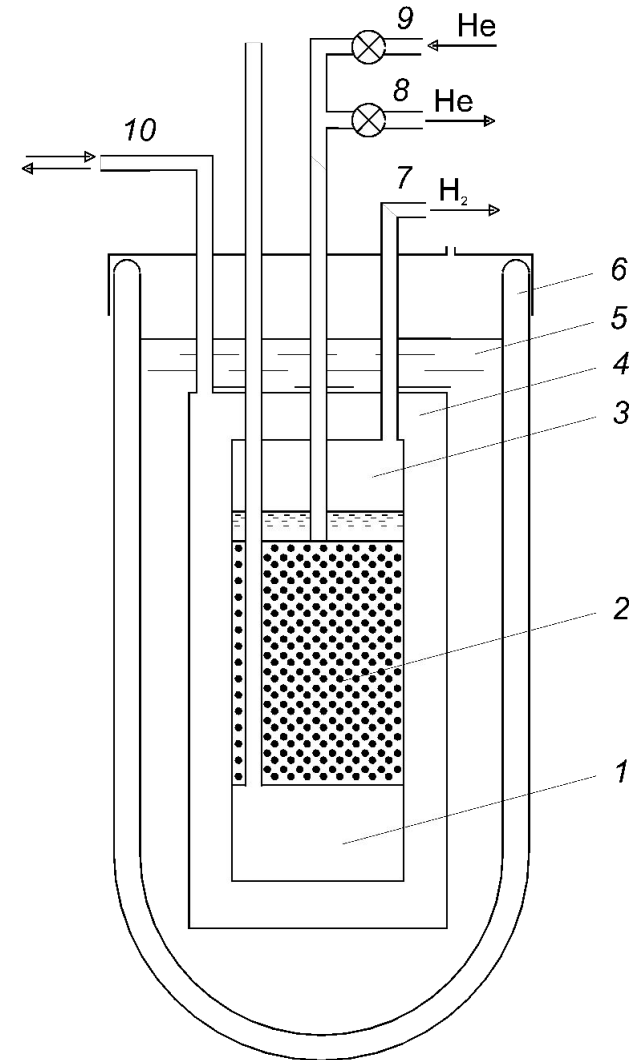
Принципова схема кріостата ядерного
розмагнічування міді (ІФП АН СРСР):

1 - ванна з гелієм, 2 - вакуумна камера,
3,7 - тепловий екран, 4 - камера
розчинення ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, 5 - конічні теплові
контакти, 6 - надпровідний тепловий ключ,
8 - холодопровід, 9 - дослідна камера, 10 -
дослідний соленоїд, 11 - основний
надпровідний соленоїд, 12 - ступінь
ядерного розмагнічування.



Десорбційне охолодження

- Використовують твердий адсорбент
- Під час сорбції він отримує енергію молекул і нагрівається, цю теплоту відводять
- Адсорбент теплоізолюють та вакуумують
- За рахунок десорбції адсорбент охолоджується до 4...10 К



Компресійне охолодження ^3He

- Розробники І.Я.Померанчук (1950, теорія), Ю.Д.Ануфрієв (1965, дослід)
- Під час адіабатичного стискання при температурах нижче $0,3\text{ K}$ ^3He охолоджується доки рідка фаза не затвердне (до $29,3\text{ бар}$ – через лінію заповнення, далі – пресом)
- Причина – значний внесок ядерного магнетизму у ентальпію ^3He
- Отримують температури до $0,003\text{ K}$

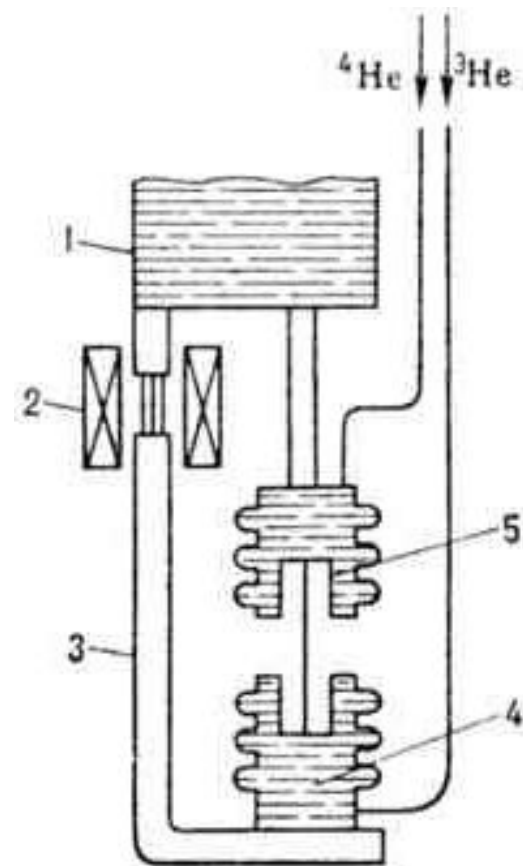


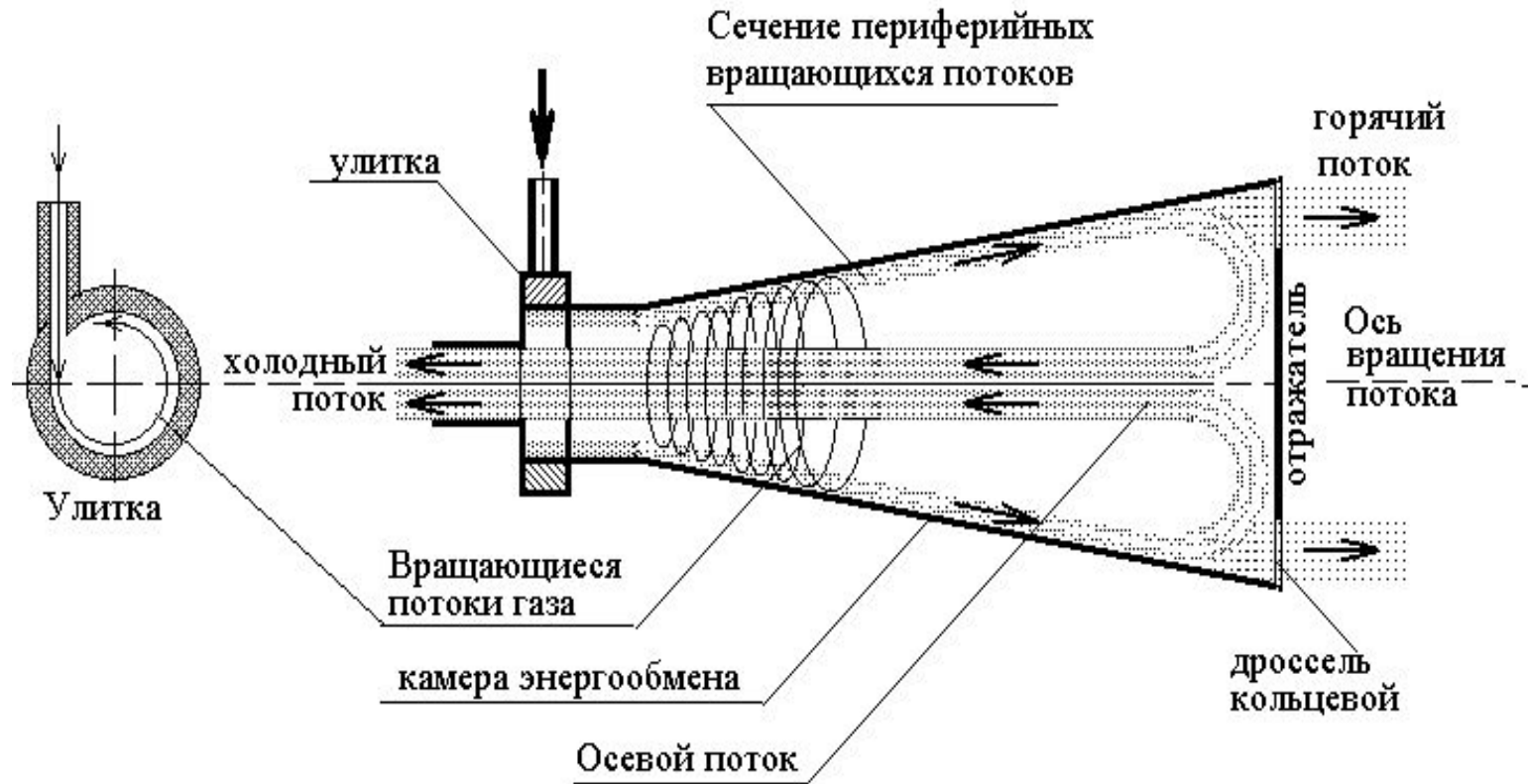
Схема кристалізаційного кріостата ^3He : 1 - рефрижератор розчинення для попереднього охолодження, 2 - тепловий ключ, 3 - холодопровід, 4 - компресійна камера, 5 - прес із ^4He .

Інші способи

Способи малоефективні, але прості і надійні, використовуються у каскадних системах та для попереднього охолодження:

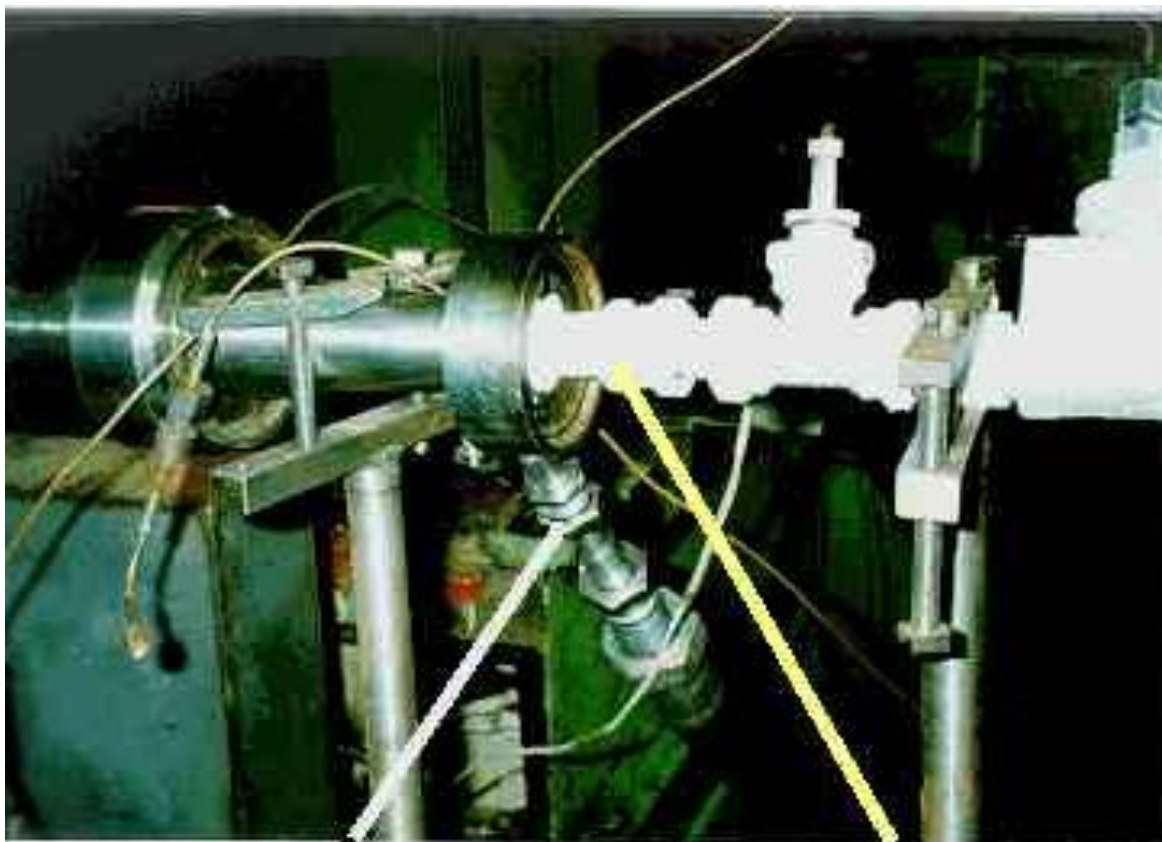
- Вихорова труба
- Термоелектричне охолодження

Вихорова труба



Малоефективна, але проста та надійна
Температури від 160 (каскад) до 270 К

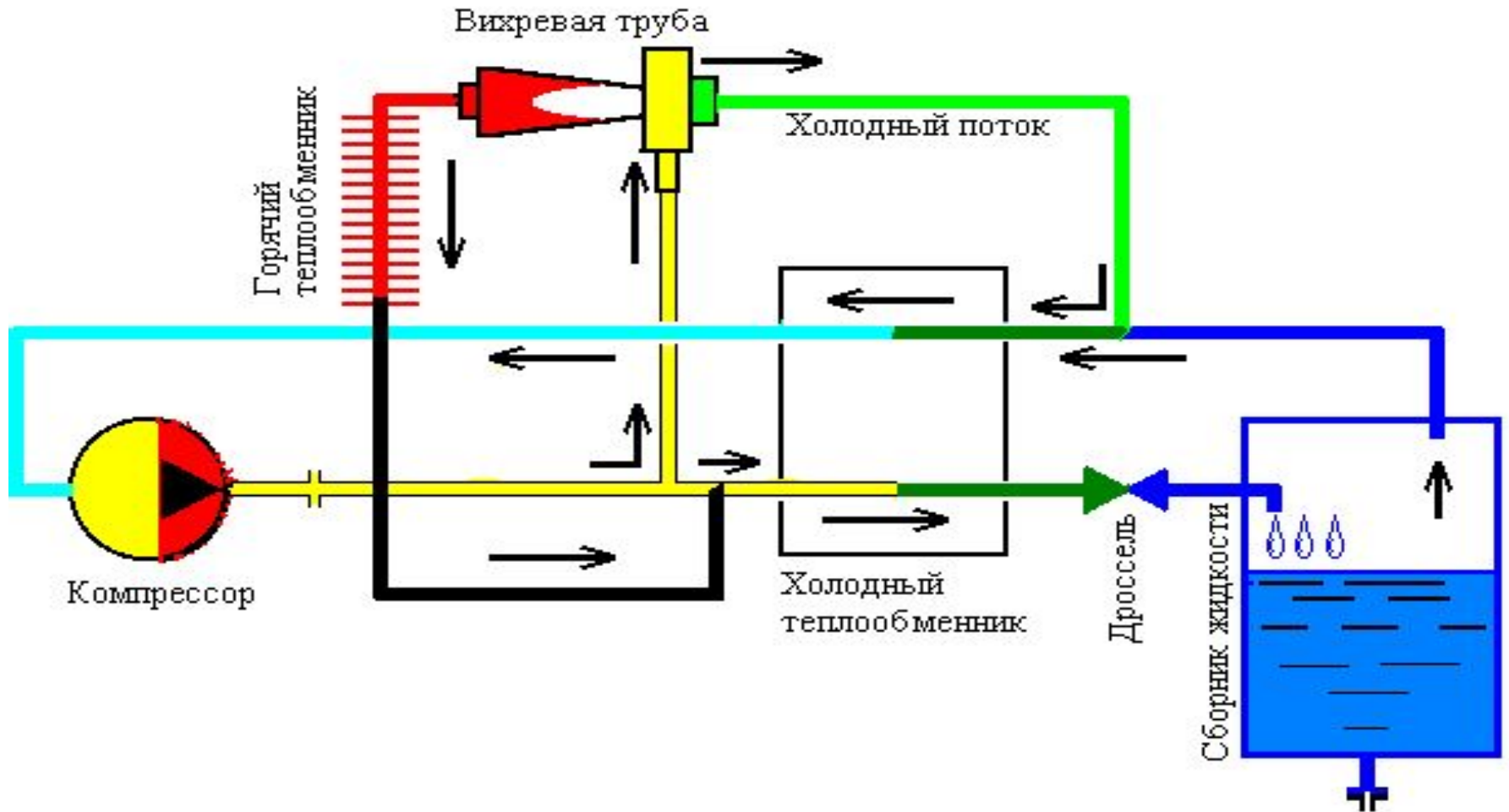
Вихорова труба



Входной патрубок

Холодный патрубок

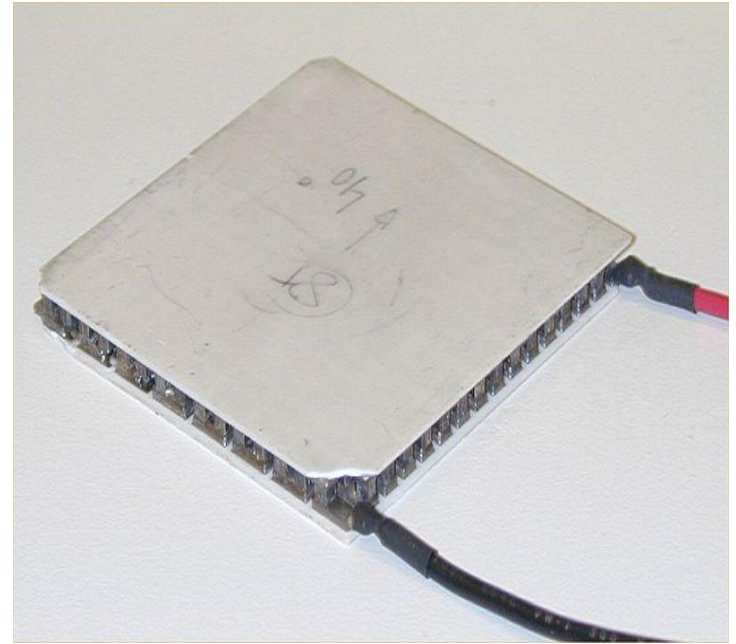
Вихорова труба



Зріджувач метану з вихоровою трубою

Термоелектричний охолоджувач

Принцип дії ґрунтується
на ефекті Пельтьє.
Змінюються
температури спаїв
різномірних провідників
при пропусканні
електричного струму.



Малоефективний, але надійний,
не має рухомих частин.

Температури від 150К (каскад) до 270 К

Дякую за увагу!