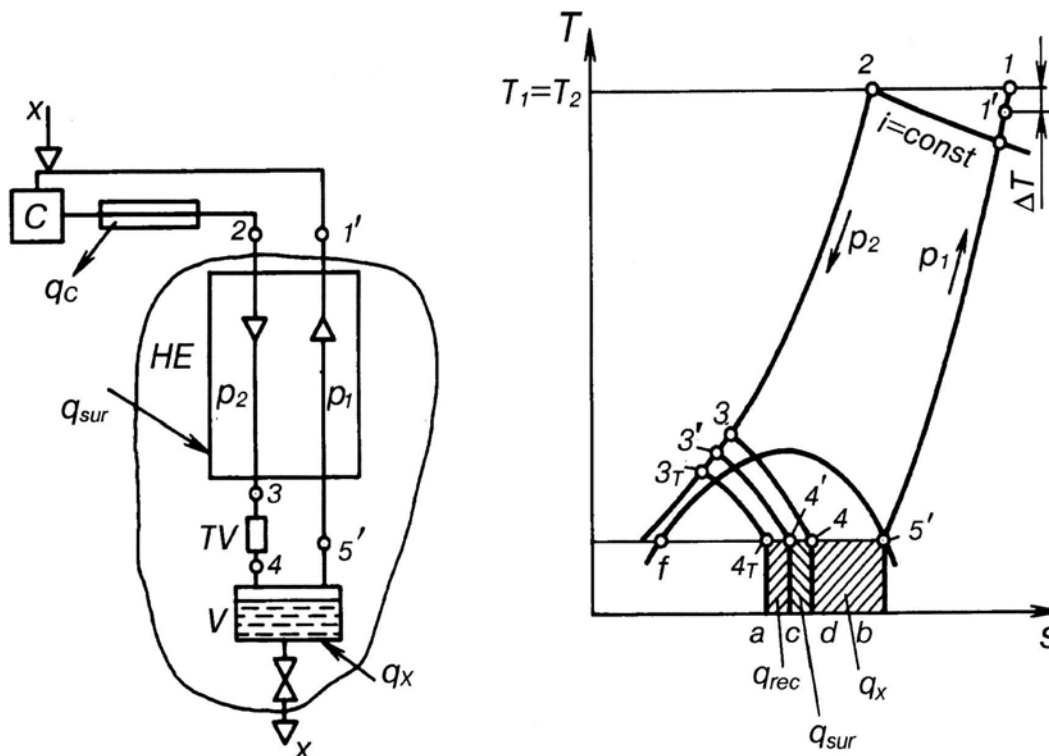


## 6. Chłodziarki z rekuperacyjnymi wymiennikami ciepła.

### 6.1. Chłodziarki Joule-Thomsona.

Chłodziarki i skraplarki wykorzystujące dławienie gazu (efekt Joule-Thomsona) należą do najbardziej rozpowszechnionych w kriogenice. Dławienie gazu jest procesem łatwym do przeprowadzenia technicznie, a urządzenia dławiące charakteryzują się dużą niezawodnością. Korzyści techniczne kompensują niską efektywność nieodwracalnego procesu dławienia i związane z tym wysokie koszty uzyskiwania temperatur kriogenicznych.



Rysunek 6.1. Jednostopniowa chłodziarka Joule-Thomsona, C - sprężarka, HE - wymiennik ciepła, TV - zawór dławiaczy (zawór Joule-Thomsona), V - parowacz.

Chłodziarka Joule-Thomsona została przedstawiona na rysunku 6.1. Urządzenie może pracować jako chłodziarka i wtedy  $x = 0$ ,  $q_x > 0$ , lub też jako skraplarka i wtedy  $x > 0$ ,  $q_x = 0$ .

#### Skraplarka Joula-Thomsona.

Celem pracy skraplarki jest uzyskanie gazu w postaci ciekłej i odprowadzenie go na zewnątrz urządzenia. Skraplarka nie wytwarza mocy chłodniczej, stąd  $q_x = 0$ , ale nie można uniknąć dopływów ciepła z otoczenia przez izolację, więc:  $q_{sur} > 0$ . Dla jednego mola gazu cyrkulującego w skraplarce jej bilans energetyczny ma postać:

$$h_2 - xh_f - (1-x)h_1 + q_{sur} = 0 \quad (1)$$

Stąd wydajność skraplania skraplarki wynosi:

$$x = \frac{h_1 - h_2 - c_p \Delta T - q_{sur}}{h_1 - h_f} = \frac{\Delta h_T - c_p \Delta T - q_{sur}}{h_1 - h_f} \quad (2)$$

Zwróćmy uwagę, że teoretycznie największa moc chłodnicza chłodziarki jest równa izotermicznemu efektowi dławienia  $\Delta h_T$ , natomiast w analizowanym urządzeniu jest ona pomniejszona o straty wynikające z niepełnej wymiany ciepła w rekuperacyjnym wymienniku (straty niedorekuperacji) równe  $c_p \Delta T$  oraz o dopływy ciepła z otoczenia  $q_{sur}$ .

### Chłodziarka Joule-Thomsona.

Celem działania chłodziarki jest wytwarzanie mocy chłodniczej, więc cały skroplony gaz zostaje odparowany w parowaczu przez ciepło  $q_x$ .

Bilans energetyczny chłodziarki ma postać:

$$h_2 - h_1 + q_x + q_{sur} = 0 \quad (3)$$

Stąd moc chłodnicza chłodziarki jest równa

$$q_x = h_1 - h_2 - q_{sur} = \Delta h_T - c_p \Delta T - q_{sur} \quad (4)$$

Podobnie jak w przypadku skraplarki na obniżenie mocy chłodniczej wpływają straty niedorekuperacji oraz dopływy ciepła z otoczenia.

Wydajności skraplania skraplarek Joule-Thomsona są niewielkie i nie przekraczają kilku procent. Podobnie moce chłodnicze chłodziarek nie przekraczają kilku procent wydajności obiegów Carnota. Stąd skraplarki Joule-Thomsona nie są stosowane tam, gdzie istotne jest skraplanie dużych ilości gazu oraz rozwijanie dużych mocy chłodniczych, a więc np. w procesach skraplania gazów na skalę przemysłową. Chłodziarki Joule-Thomsona są natomiast wykorzystywane tam, gdzie rozwijane moce chłodnicze są niewielkie (często poniżej 1 W), a istotna jest miniaturyzacja urządzenia, niezawodność wynikająca z braku jakichkolwiek części ruchomych, brak szumów i krótki czas rozruchu. Takie wymagania stawiane są chłodziarkom wykorzystywanym w elektronice, technice wojskowej (chłodzenie detektorów podczerwieni) czy też astronomii.

## **6.2 Chłodziarki Claude'a.**

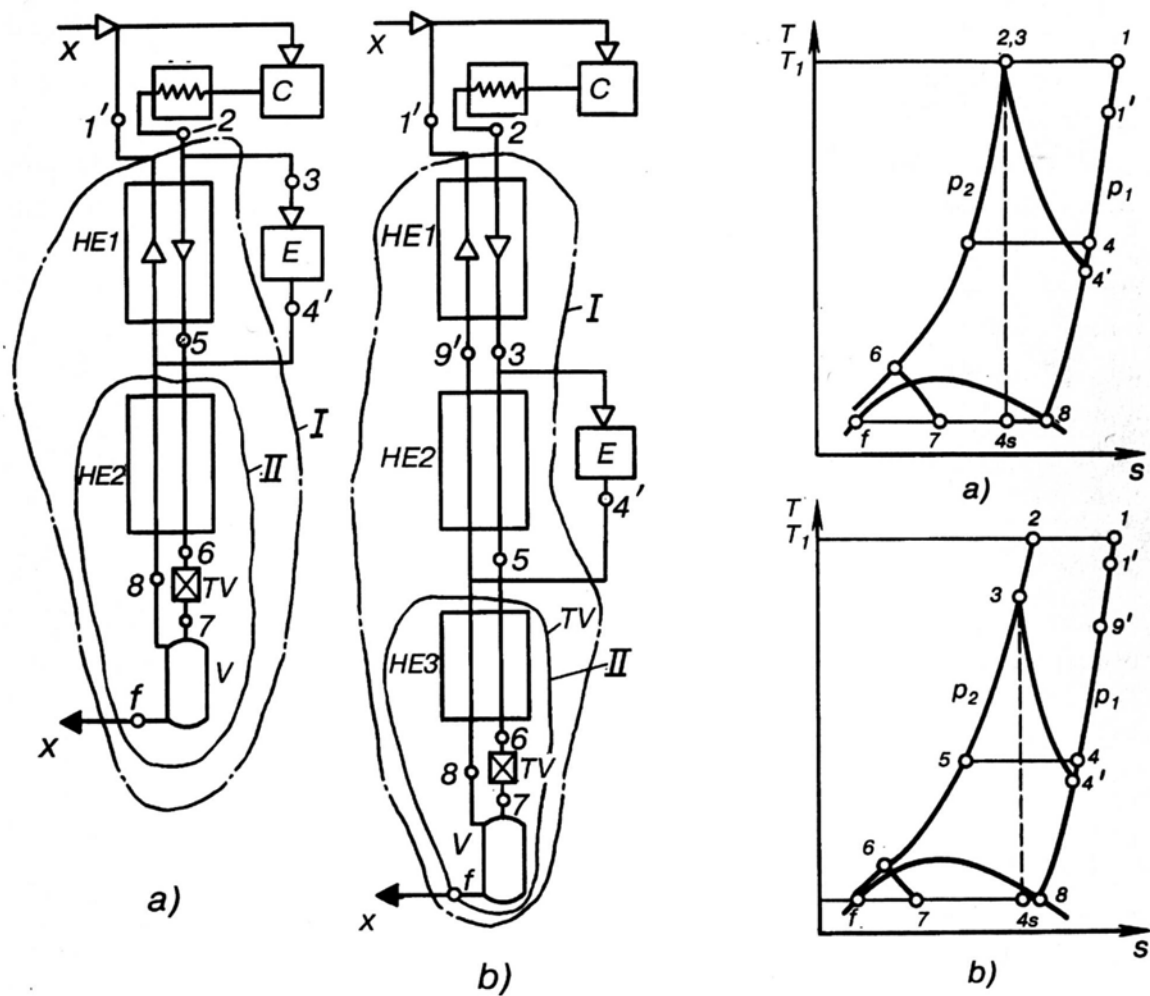
Schemat chłodziarki Claude'a pokazano na rysunku 2. Chłodziarka składa się ze stopnia z rozprężarką oraz stopnia Joule-Thomsona. Stopień z rozprężarką może zawierać jeden (rysunek 2 a) lub dwa (rysunek 2 b) wymienniki ciepła. Rozważmy chłodziarkę Claude'a pracującą jako skraplarka, tzn. odprowadzającą na zewnątrz część  $x$  skroplonego gazu i nie wytwarzającą mocy chłodniczej.

Bilans skraplarki, w której cyркуluje jednostkowa ilość gazu ma postać:

$$h_2 - xh_f - (1-x)h_{1'} + q_{sur} - D(h_3 - h_{4'}) = 0 \quad (5)$$

Stąd wydajność skraplania  $x$  jest równa:

$$x = \frac{\Delta h_T + D(h_3 - h_{4'}) - c_p \Delta T_1 - q_{sur}}{h_{1'} - h_f} \quad (6)$$



Rysunek 6.2. Chłodziarka Claude'a. A - rozprężarka wysokotemperayrowa, cykl wysokociśnieniowy, b- rozprężarka niskotemperaturowa.

Zwróćmy uwagę, że wydajność skraplania skraplarki Claude'a jest większa od wydajności skraplarki Joule-Thomsona o składnik  $D(h_3 - h_{4'})$  będący pracą zewnętrzną wykonaną przez rozprężarkę. Obecnie cykle Claude'a i ich modyfikacje są podstawowymi cyklami skraplarek i chłodziarek kriogenicznych o dużych wydajnościach (rzędu setek lub tysięcy watów).