

Skraplanie gazów metodą Joule-Thomsona. Wyznaczenie podstawowych parametrów procesu.

Podstawy Kriotechniki

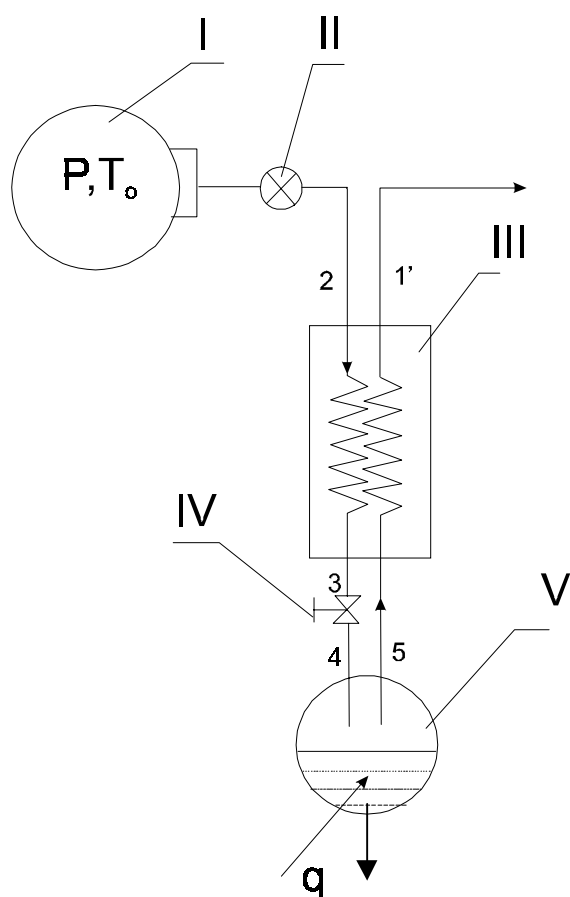
Laboratorium

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów

Zakład Chłodnictwa i Kriotechniki

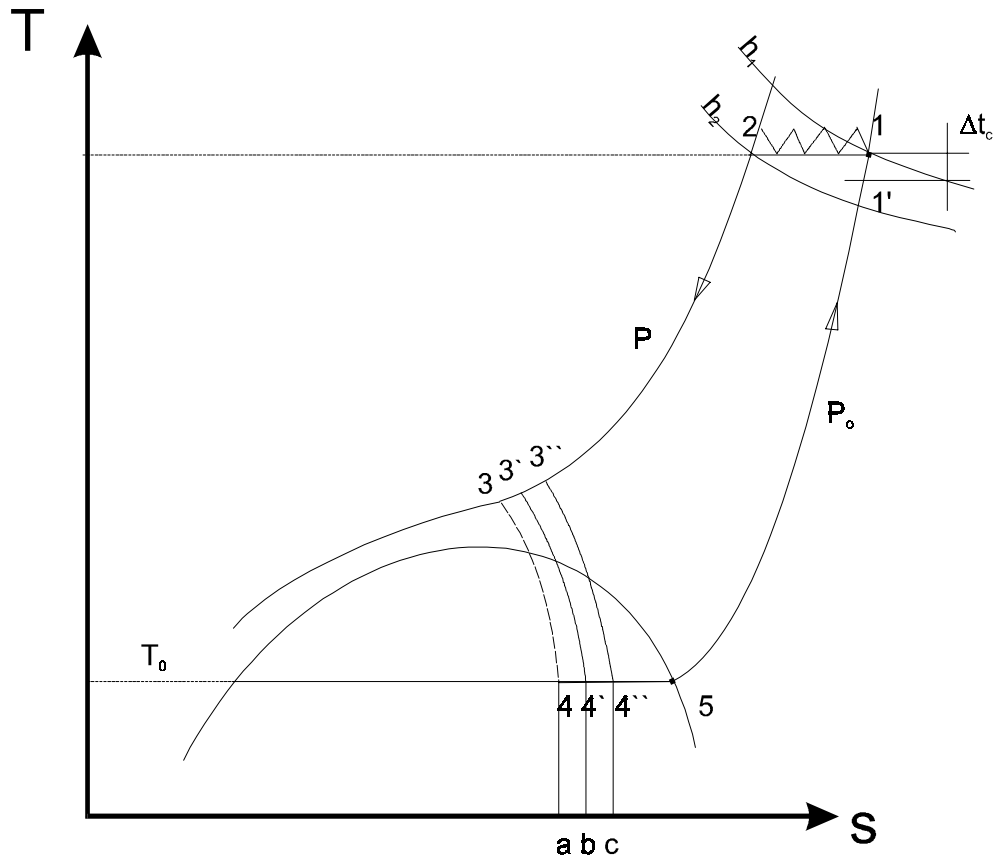
1. Skraplarki (chłodziarki) Joule'a-Thomsona.

Skraplarki Joule-Thomsona nie posiadają części ruchomych i łatwo dają się miniaturyzować. Są one przede wszystkim używane do chłodzenia detektorów podczerwieni, elementów elektroniki oraz niewielkich próbek w badaniach materiałowych. Mogą być również stosowane w kriochirurgii. Ze względu na wysokie ciśnienie pracy, które powinno być możliwie bliskie ciśnieniu inwersji, skraplarki takie są przede wszystkim używane w obiegach otwartych. Schemat ideowy skraplarki (chłodziarki) J-T pracującej w układzie otwartym pokazano na rys. 1, natomiast na rys. 2 odwzorowano obieg skraplarki we



współrzędnych: $T-s$. Zasada działania skraplarki (chłodziarki) pracującej w obiegu otwartym jest następująca: źródłem gazu o wysokim ciśnieniu jest butla z gazem I (najczęściej jest to azot lub argon - w Polsce butle napełnia się do ciśnienia 15 MPa), następnie poprzez zawór II gaz trafia do rekuperacyjnego wymiennika ciepła III gdzie zostaje wstępnie oziębiony przez powracający z parowacza V gaz będący pod niskim ciśnieniem. Za wymiennikiem ciepła strumień czynnika o wysokim ciśnieniu zostaje zdławiony izentalpowo w zaworze Joule-Thomsona IV, gdzie następuje obniżenie jego temperatury i częściowe skroplenie (skropleniu ulega do kilku procent gazu). Następnie strumień skroplonego gazu trafia do parowacza V, gdzie wrze przy stałej temperaturze, a reszta nie skroplonego gazu trafia do wymiennika ciepła III. Z wymiennika ciepła gaz wydostaje się do atmosfery.

Rys. 1. Skraplarka Joule-Thomsona (schemat), I - butla, II - zawór regulacyjny, III - wymiennik ciepła, IV - zawór dławiący, V - parowacz, p - ciśnienie, T - temperatura, q - strumień ciepła.

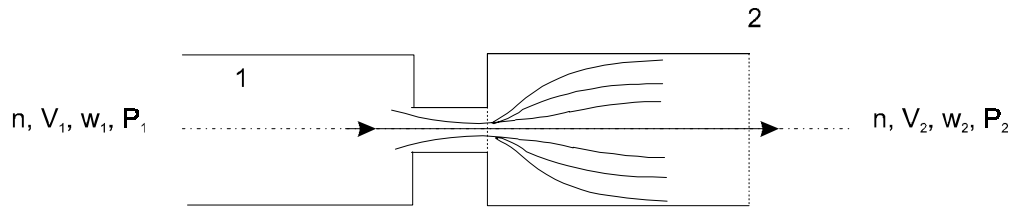


Rys. 3. Odwzorowanie obiegu J-T na wykresie T-s, 1-2 sprężanie (odbywające się poza układem), 2-3 obniżanie temperatury przy stałym ciśnieniu w wymienniku ciepła, 3-4 dławienie w zaworze J-T, 4-5 parowanie cieczy w parowaczu przy stałym ciśnieniu i temperaturze, 5-1' ogrzewanie czynnika przy stałym ciśnieniu w wymienniku ciepła, 1'-1 dogrzanie czynnika przy ciśnieniu atmosferycznym.

2. Proces dławienia.

Procesem, dzięki któremu uzyskuje się obniżenie temperatury czynnika w chłodzarnie Joule'a-Thomsona jest dławienie.

Dławieniem nazywa się taki proces, który realizuje się w przepływającym płynie wskutek nagłej zmiany przekroju przewodu. Zaburzenie jakie powstaje w płynie w miejscu przewężenia przekroju powoduje niestatyczność procesu i tym samym nieokreśloność parametrów i funkcji stanu przepływającego płynu. Jeśli przewód, w którym zachodzi dławienie jest adiabatycznie izolowany wtedy proces jest izoenergetyczny.



Rys. 3. Realizacja procesu dławienia, $\dot{n}, \dot{V}, \dot{m}$ odpowiednio strumień czynnika wyrażony w kmol/s, m³/s i kg/s, u – energia wewnętrzna, p – ciśnienie.

Procesu dławienia nie można przedstawić graficznie w żadnym układzie współrzędnych, gdyż nie jest on ciągłym zbiorem stanów równowagi. W pewnym przybliżeniu można jedynie ustalić stan początkowy i końcowy procesu. Zgodnie z bilansem energetycznym dla adiabatycznego przepływu ustalonego można napisać:

$$\left(\dot{n} \cdot u_2 - \dot{n} \cdot u_1 \right) + \left(p_2 \cdot \dot{V}_2 - p_1 \cdot \dot{V}_1 \right) + \left(\frac{\dot{m} \cdot w_2^2}{2} - \frac{\dot{m} \cdot w_1^2}{2} \right) = 0 \quad (1)$$

gdzie $\dot{n}, \dot{V}, \dot{m}$ odpowiednio strumień czynnika wyrażony w kmol/s, m³/s i kg/s, u – energia wewnętrzna. Pomijając zanedbywalnie mały przyrost strumienia energii kinetycznej można napisać:

$$\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = 0 \quad (2)$$

lub

$$\dot{h}_2 = \dot{h}_1 \quad (3)$$

Równości (2) i (3) wykazują, że przy powyższych założeniach, proces dławienia charakteryzuje się takimi samymi wartościami początkowymi i końcowymi entalpii. W przypadku gazu doskonałego, którego entalpia jest funkcją tylko temperatury otrzymuje się:

$$T_2 = T_1 \quad (4)$$

Traktując w ogólnym przypadku entalpię jako funkcję T i p równanie izentalpy ma postać:

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp = 0. \quad (5)$$

Z równania (5) można wyznaczyć różniczkowy izentalpowy efekt Joule-Thomsona μ_h :

$$\mu_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = - \frac{(\partial h / \partial p)_T}{(\partial h / \partial T)_p} \quad (7)$$

Dla gazu doskonałego $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = 0$, stąd $\mu_h = 0$.

Dla gazu rzeczywistego μ_h może przyjmować wartości zarówno ujemne jak i dodatnie.

Po podstawieniu do równania (7) znanych z termodynamiki zależności:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = c_p \quad \text{oraz} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (8)$$

można przedstawić różniczkowy izentalpowy efekt Joule'a-Thomsona jako funkcję jedynie temperatury i objętości.

$$\mu_h = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h = \frac{1}{c_p} \left(T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right) \quad (8)$$

Równanie (8) zostało wyprowadzone przez W. Thomsona i nazywane jest jego imieniem.

Z równania (8) wynika, że

$$\begin{aligned} T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p > v \quad \text{to} \quad \mu_h > 0, \\ T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = v \quad \text{to} \quad \mu_h = 0, \\ T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p < v \quad \text{to} \quad \mu_h < 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Dodatni efekt Joule'a-Thomsona oznacza oziębianie się płynu w czasie dławienia, ujemny ogrzewanie się, zaś zerowy niezmiennosc temperatury. Który z tych trzech przypadków występuje, rozstrzyga równanie stanu dla danego stanu początkowego. Zbiór punktów spełniających równanie $\mu_h = 0$ tworzy krzywą w przestrzeni stanów zwaną krzywą inwersji.

Ponieważ gazy rzeczywiste podczas dławienia oziębiają się lub ogrzewają, zatem zbiory tych stanów podzielone są krzywą inwersji o równaniu:

$$V = T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (10)$$

Miarą całkowitego efektu dławienia jest przyrost entalpii Δh_T , który następuje podczas dławienia gazu przy stałej temperaturze. Dla utrzymania stałej temperatury należy

dopuszczając do przekazywania ciepła pomiędzy elementem dławiącym a otoczeniem. Ciepło gazu dławionego spowoduje przyrost entalpii Δh_T , który jest uwarunkowany spadkiem ciśnienia Δp .

Stosunek $\left(\frac{\Delta h}{\Delta p}\right)_T$ daje w granicy pochodną $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T$ będącą izotermicznym efektem dławienia i wynoszącym:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -\mu_h c_p \quad (11)$$

Przyrost entalpii Δh_T jest równy:

$$\Delta h_T = \int_{p_1}^{p_2} \mu_h c_p dp \quad (12)$$

Równanie (12) określa różnicę entalpii gazu pomiędzy punktami 1 i 2 (rys. 3) i określa jednocześnie jednostkową ilość ciepła, jaką można uzyskać podczas dławienia gazu. W technice niskich temperatur Δh_T jest ważną wielkością, umożliwiającą obliczenie wydajności chłodniczej procesu dławienia.

3. Bilans skraplarki Joule-Thomsona

Ogólny bilans urządzenia kriogenicznego będącego w stanie stacjonarnym ma postać:

$$\sum \dot{W}_i + \sum \dot{M}_i h_i + \sum \dot{Q}_i = 0 \quad , \quad (13)$$

gdzie: \dot{W} – moc, \dot{M} – strumień masy, \dot{Q} – strumień ciepła.

W przypadku skraplarki Joule-Thomsona ogólne równanie (13) przyjmie postać:

$$\dot{M} h_2 - \dot{m} h_0 - (\dot{M} - \dot{m}) h_1 + \dot{Q} = 0 \quad (14)$$

Gdzie \dot{M} - strumień gazu dopływającego do skraplarki, \dot{m} - strumień gazu skroplonego, h_0 – entalpia właściwa skroplonego gazu, \dot{Q} - całkowite dopływy ciepła do skraplarki.

Wprowadzając pojęcie względnej wydajności skraplania $x = \dot{m} / \dot{M}$ (potocznie zwanej wydajnością skraplania) po przekształceniu równania (14) otrzymuje się:

$$x(h_1 - h_0) = h_1 - h_2 - q \quad (15)$$

gdzie $q = \dot{Q} / \dot{M}$ i oznacza dopływy ciepła przypadające na jednostkowy strumień gazu dopływającego do skraplarki.

Po wprowadzeniu $h_{1'} = h_1 - c_p \Delta T_c$, $\Delta T_c = T_1 - T_{1'}$ oraz $\Delta h_T = h_1 - h_2$ otrzymuje się:

$$x = \frac{\Delta h_T - c_p \Delta T_c - q}{h_1 - c_p \Delta T - h_0} \quad (16)$$

4. Wykonanie ćwiczenia.

Uruchomić skraplarkę przez odkręcenie zaworu II (rys. 1).

Rejestrować ciśnienie oraz temperaturę w punktach 1, 1', 4 w odstępach 30 – sekundowych aż do zaobserwowania skroplenia.

Określić czas potrzebny do zgromadzenia się 1 cm³ cieczy.

Odwzorować obieg skraplarki na wykresie T-s.

Wyznaczyć wydajność skraplania i moc chłodniczą badanej skraplarki (chłodziarki).

5. Pytania kontrolne.

1. Omówić budowę i zasadę działania skraplarki (chłodziarki) Joule-Thomsona.
2. Podać przykładowe zastosowania skraplarek J-T. Dlaczego te skraplarki można miniaturyzować.
3. Odwzorować obieg skraplarki Joule-Thomsona na wykresie T-s, opisać poszczególne procesy.
4. Omówić proces dławienia.
5. Czy czynnikiem roboczym chłodziarki Joule-Thomsona może być gaz doskonały? Odpowiedź uzasadnić.
6. Napisać bilans skraplarki (chłodziarki) Joule-Thomsona. Określić wydajność skraplania.