

M. Chorowski
Podstawy Kriogeniki, wykład 3.

3. Metody uzyskiwania niskich temperatur.

Uzyskiwanie niskich temperatur może odbywać się poprzez realizację wielu procesów, z których tylko niektóre są wykorzystywane w praktyce. Jeżeli czynnikiem roboczym chłodziarki jest gaz, to najważniejszymi procesami prowadzącymi do obniżenia temperatury są: ekspansja (rozprężanie) izentropowa z wykonaniem pracy zewnętrznej, ekspansja izentalpowa (dławienie) oraz wypływ swobodny gazu.

3.1. Rozprężanie izentropowe z wykonaniem pracy zewnętrznej.

Adiabatyczne i izentropowe rozprężenie gazu jest możliwe pod warunkiem, że w gazie nie mają miejsca zjawiska nieodwracalne, np. wewnętrznego tarcia. Aby spełnić warunek $s = const$ należy całą osiągalną energię sprężonego gazu odebrać w postaci pracy zewnętrznej. Praca musi zostać w całości wykonana nad obiektem odizolowanym termodynamicznie od rozprężanego gazu. W efekcie następują największe z możliwych spadki energii wewnętrznej gazu oraz jego entalpii. Również spadek temperatury jest maksymalny i większy niż obserwowany w innych procesach.

Rzeczywistym procesom rozprężania adiabatycznego towarzyszy zawsze zjawisko tarcia w efekcie następuje wzrost entropii czynnika. Z tego powodu zarówno spadek entalpii gazu jak i spadek temperatury są niższe od maksymalnych.

Na rysunku 3.1 pokazano idealny i rzeczywisty procesy rozprężania gazu. W obu przypadkach stan początkowy gazu został oznaczony przez punkt A. W procesie odwracalnym gaz osiągnął ciśnienie p_1 w punkcie B, natomiast w przykładowym procesie rzeczywistym - w punkcie B'.

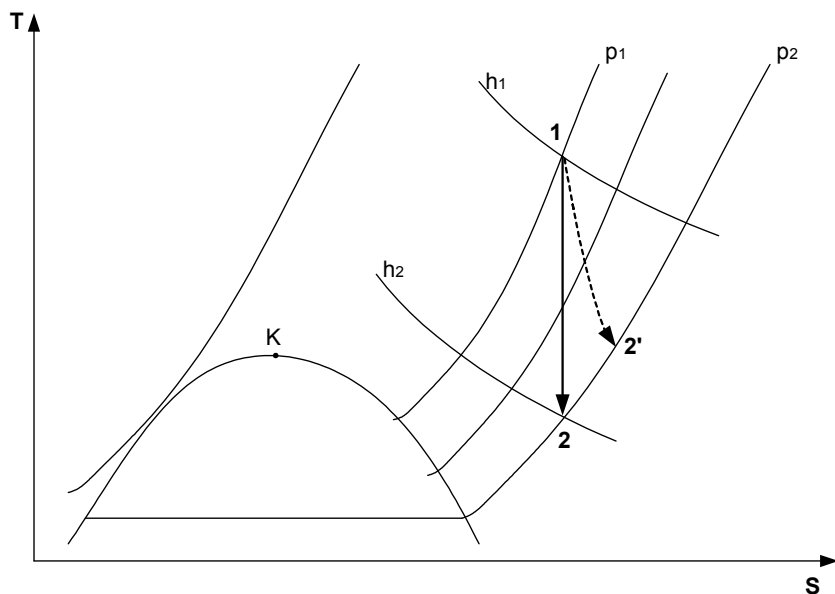
Proces izentropowej ekspansji gazu jest realizowany w rozprężarkach tłokowych lub turbinowych. W maszynach rzeczywistych na skutek tarcia, dopływów ciepła i innych strat następuje wzrost entropii gazu i w efekcie spadek temperatury jest mniejszy niż w maszynie idealnej. Rzeczywiste rozprężarki opisuje współczynnik sprawności rozprężania izentropowego równy stosunkowi spadku entalpii gazu w rozprężarce rzeczywistej do spadku entalpii w rozprężarce idealnej:

$$\eta = \frac{\Delta h_{A-B'}}{\Delta h_{A-B}} \quad (3.1)$$

gdzie $\Delta h_{A-B'}$ oznacza spadek entalpii w procesie rzeczywistym, natomiast Δh_{A-B} oznacza spadek entalpii w procesie idealnym.

W procesie izentropowego rozprężania gazu zewnętrzna praca użyteczna równa jest różnicy entalpii gazy na wlocie i na wylocie z rozprężarki: Czynniki o objętości V_1 wpływają do rozprężarki z energią wewnętrzną U_1 , jednocześnie wykonuje pracę napełniania układu równą $p_1 V_1$. Wypływając z rozprężarki energia wewnętrzna czynnika wynosi U_2 , a praca opróżniania układu jest równa $p_2 V_2$. Pomijając różnicę energii kinetycznej i potencjalnej czynnika na wlocie i wylocie z rozprężarki otrzymuje się zewnętrzną pracę użyteczną równą różnicy entalpii na wlocie i wylocie z rozprężarki:

$$w = h_1 - h_2 \quad (3.2)$$



Rysunek 3.1. Izentropowe rozprężanie z wykonaniem pracy zewnętrznej.

Spadek temperatury gazu w procesie izentropowego rozprężania może zostać wyznaczony przez wyrażenie entropii jako funkcji ciśnienia i temperatury $S = S(p, T)$, a następnie przyrównanie do zera jej różniczki zupełnej.

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T dp = 0 \quad (3.3)$$

Po przekształceniu zależności (3.3) otrzymuje się różniczkowy efekt procesu rozprężania izentropowego μ_s , który pozwala na określenie zmiany temperatury gazu w efekcie zmiany jego ciśnienia.

$$\mu_s = \left(\frac{dT}{dp} \right)_s = - \frac{\left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T}{\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p} \quad (3.4)$$

Wykorzystując znane zależności termodynamiczne uzyskuje się

$$\left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad \text{oraz} \quad \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p = \frac{c_p}{T} \quad (3.5)$$

Podstawiając (3.5) do (3.4) otrzymuje się wyrażenie pozwalające na obliczenie współczynnika μ_s , jeżeli znane jest równanie stanu gazu:

$$\mu_s = \left(\frac{dT}{dp} \right)_s = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{c_p} = \frac{T v \beta}{c_p} \quad (3.6)$$

gdzie $\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ jest współczynnikiem rozszerzalności objętościowej. Z równania (3.6)

wynika, że zarówno dla gazu doskonałego jak i dla gazów rzeczywistych współczynnik μ_s ma wartość dodatnią, co oznacza, że spadkowi ciśnienia gazy w procesie izentropowego rozprężania towarzyszy zawsze spadek temperatury.

Po podstawieniu do (3.6) równania stanu gazu doskonałego otrzymuje się

$$\mu_s = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{T}{p} \quad (3.7)$$

a po scałkowaniu

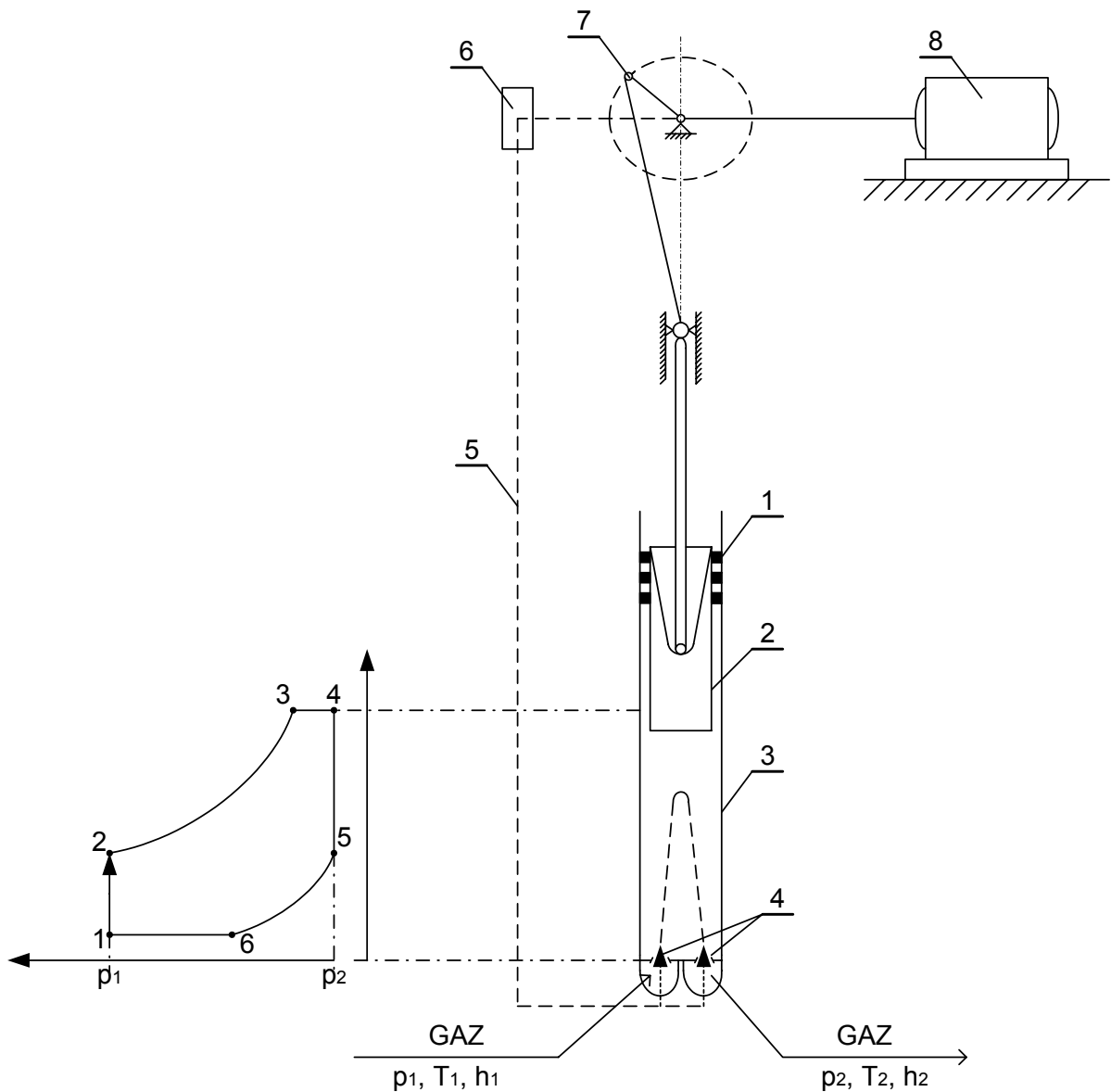
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (3.8)$$

W przypadku gazów stosowanych do osiągnięcia temperatur kriogenicznych (z wyjątkiem wodoru) temperatura T_2 obliczona na podstawie równania gazu doskonałego z zależności (3.8) odpowiada z dokładnością kilku procent temperaturze wyznaczonej w sposób dokładny z tablic termodynamicznych lub wykresu T-S gazu. W przypadku wodoru zastosowanie wzoru (3.8) prowadzi do dużych błędów (dochodzących do 30%) w określeniu końcowej temperatury gazu, co wynika ze zmienności wraz z temperaturą wykładnika adiabaty wodoru w temperaturach niższych od 130 K.

Jak już powiedzieliśmy realizacja procesu rozprężania z wykonaniem zewnętrznej pracy użytecznej zachodzi w maszynach zwanych rozprężarkami. Rozprężarki mogą być maszynami objętościowymi - rozprężarki tłokowe, lub maszynami przepływowymi - turbiny.

Rozprężarki tłokowe

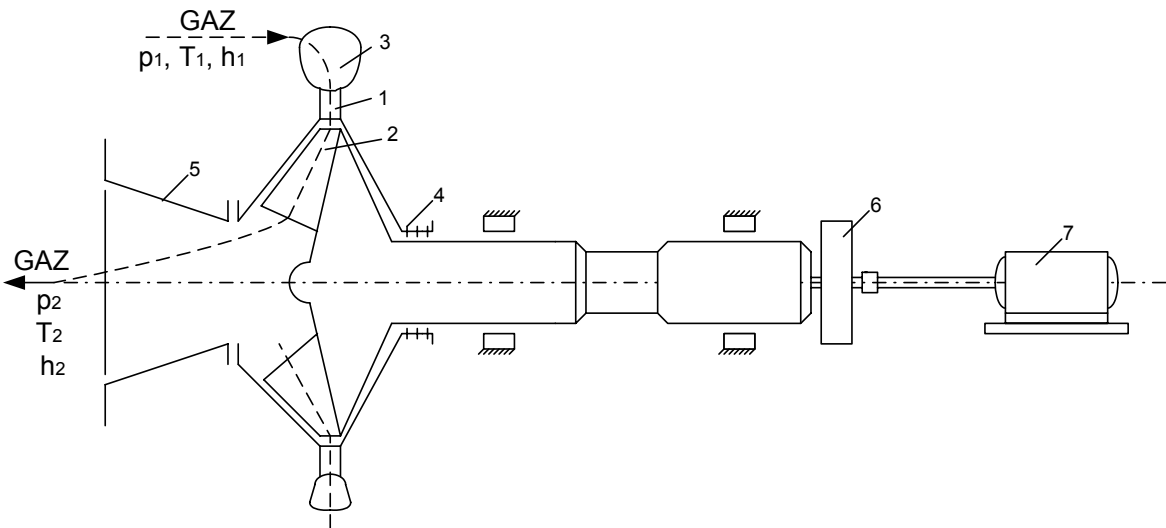
Schemat rozprężarki tłokowej przedstawia rysunek 3.2. Ciśnienie gazu działa na tłok 3, a praca jest wykonywana nad urządzeniem hamującym 8. Dzięki zastosowaniu hamulca 8 utrzymywana jest niewielka różnica ciśnień nad i pod tłokiem, i proces rozprężania może być uważany za równowagowy. Rozprężarka pracuje cyklicznie, każdy cykl składa się z procesów zobrazowanych na przykładowym wykresie indykatorowym: napełniania 6-1 oraz 1-2, rozprężania 2-3, wydmuchu 3-4, wydechu 4-5 i podsprężania 5-6. Punkt 6 oznacza początek otwarcia zaworu wlotowego natomiast zawór ten zamyka się w punkcie 2. Zawór wylotowy otwiera się w punkcie 3 i zamyka w punkcie 5.



Rysunek 3.2. Schemat kriogenicznej rozprężarki tłokowej z wykresem indykatorowym. 1- uszczelnienie, 2 - tłok, 3 - cylinder, 4 - zawory, 5 - popychacz zaworów, 6 - układ sterowania zaworami, 7 - mechanizm korbowy, 8 - hamulec (układ pochłaniający energię mechaniczną)

Rozprężarki turbinowe.

Rozprężarki turbinowe są maszynami przepływowymi w których proces rozprężania zachodzi w sposób ciągły. Schemat kriogenicznej rozprężarki turbinowej przedstawia rysunek 3.3.



Rysunek 3.3. Kriogeniczna rozprężarka turbinowa, 1 - dysze wlotowe, 2 - wirnik z łopatkami, 3 - kolektor wlotowy, 4 - uszczelnienie, 5 - dyfuzor wylotowy, 6 - przekładnia, 7 - hamulec (rozpraszanie energii mechanicznej)