

**Katedra Silników Spalinowych  
i Pojazdów ATH  
ZAKŁAD TERMODYNAMIKI**

**Wyznaczanie całkowego współczynnika  
efektu Joule'a-Thomsona dla gazów  
rzeczywistych**

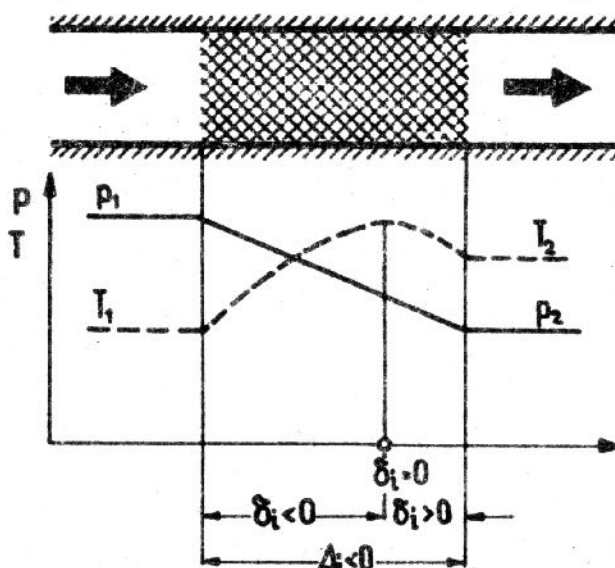
---

## Wprowadzenie teoretyczne

Całkowity współczynnik efektu Joule'a-Thomsona dotyczy procesu izentalpowego dławienia. Dławieniem nazywamy przemianę, podczas której czynnik rozpręża się nie wykonując pracy. Dławienie przebiegające bez wymiany ciepła jest dławieniem adiabatycznym.

Dławienie izentalpowe zachodzi w zaizolowanym urządzeniu przepływowym (rys. 1). Efekt dławienia, wyrażający się spadkiem ciśnienia, jest tym większy, im większy opór napotyka gaz przy przepływie. Z pierwszej zasady termodynamiki wynika, że przy niewielkich prędkościach przepływu  $h_1=h_2$  dla całego układu dławiącego, a również na każdym odcinku  $h=\text{idem}$ , stąd nazwa przemiany.

Dla gazu doskonałego i półdoskonałego ze stałości entalpii wynika stałość temperatury  $T=\text{idem}$ .



Rys.1. Dławienie izentalpowe.

Dla wyznaczenia zmiany temperatury dowolnego czynnika rzeczywistego oblicza się tzw. współczynnik efektu Joule'a-Thomsona.

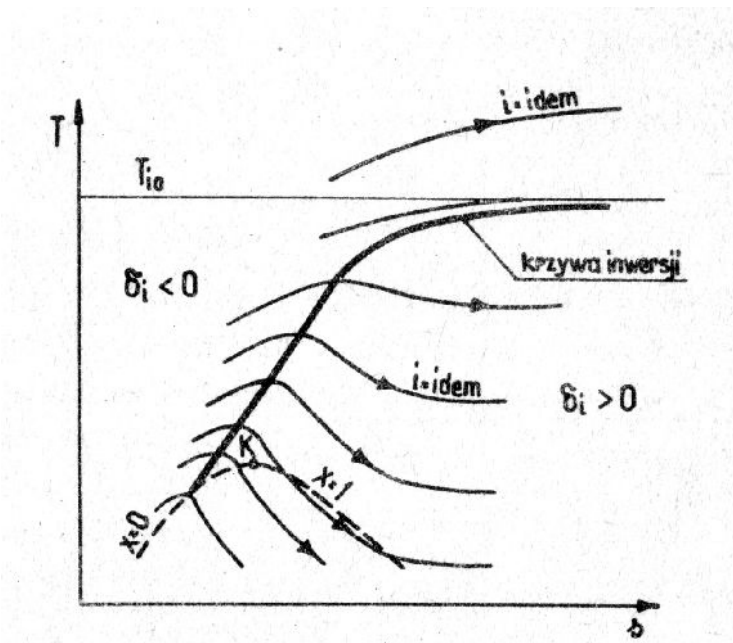
$$\text{Różniczkowy: } \delta_i = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_i$$

$$\text{Całkowy: } \Delta i = \left( \frac{\Delta T}{\Delta p} \right)_i = \frac{1}{\Delta p} \int_{p_1}^{p_2} \delta_i dp$$

Na podstawie znajomości termicznego równania otrzymujemy:

$$\delta i = \frac{T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p}$$

Ponieważ ciśnienie przy dławieniu zawsze spada ( $dp < 0$ ) więc współczynnik efektu Joule'a-Thomsona jest dodatni, gdy temperatura przy dławieniu maleje i na odwrót. Takie stany gazu rzeczywistego, przy których lokalnie współczynnik różniczkowy jest równy zero nazywamy punktami inwersji, a zbiór tych punktów – krzywą inwersji.

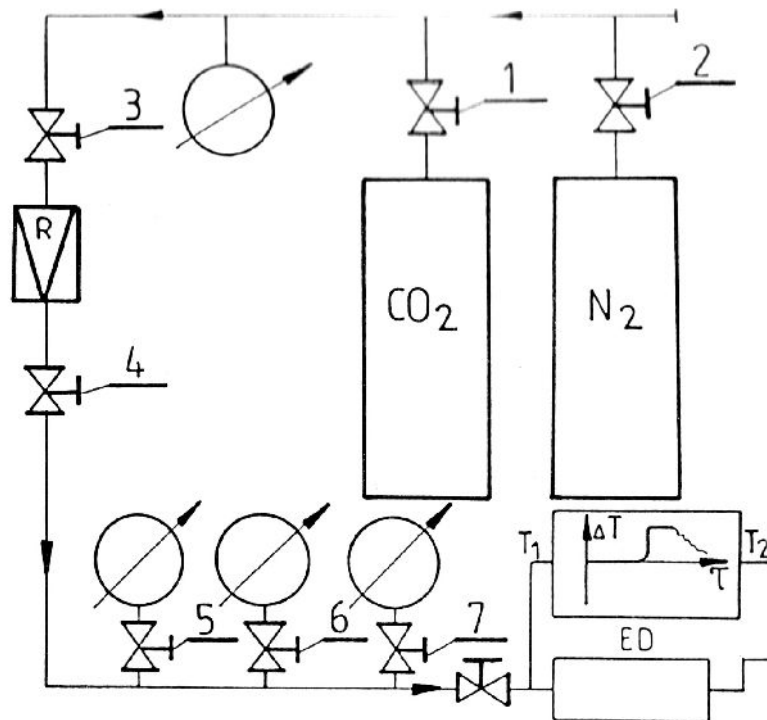


Rys.2. Krzywa inwersji.

Na rys.2 pokazano przebieg krzywej inwersji na wykresie  $T$ - $s$ . Spadek temperatury przy dławieniu gazu występujący dla stanów znajdujących się poniżej krzywej inwersji, jest wykorzystywany do uzyskiwania niskich temperatur i skraplania gazów.

### Zasada pomiaru

Ćwiczenie laboratoryjne realizowane jest tą samą metodą, jaką zaproponowali w XIX w. Joule i Thomson. Jest to metoda stacjonarna i polega na rozprężaniu się ciągłego strumienia gazu na porowatej przeszkodzie. Zasadniczym elementem stanowiska laboratoryjnego jest zaizolowany cieplnie element dławiący. Izolacja cieplna pozwala na zbliżenie się do izentalpowego przebiegu przemiany gazu przepływającego przez element dławiący. Różnicę temperatur gazu  $\Delta T = T_2 - T_1$  za i przed elementem dławiącym mierzy się za pomocą dwóch termopar Fe-Ko połączonych różnicowo.



Rys.3. Schemat stanowiska pomiarowego,

Instalacja doświadczalna przystosowana jest do pomiaru całkowitego współczynnika efektu Joule'a-Thomsona dla CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>. Badane gazy przepływają z butli przewodami połączonymi z elementem dławiącym. Na przewodach znajdują się zawory odcinające i reduktor ciśnienia, który służy do stabilizacji ciśnienia  $p$  w instalacji.

Pomiar polega na odczytaniu różnicy temperatury  $\Delta T$ , oraz nadciśnienia  $p_{m1}$  (przed elementem dławiącym) i ciśnienia otoczenia  $p_{or}$ .

W czasie ćwiczeń laboratoryjnych należy wykonać po dwie serie (dla dwóch różnych wartości  $p_{m1}$ ) procesów dławienia izentalpowego dla CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>. By wyniki można było opracować statystycznie, w każdej serii powinny być zrealizowane co najmniej 3 próby. Obliczone na podstawie wyników pomiarów wartości całkowitego współczynnika efektu Joule'a-Thomsona należy porównać z analogicznymi wartościami  $\Delta_i$  odczytanymi z tabeli 1.

AZOT N <sub>2</sub>					
Temp. $t$ °C	Ciśnienie $p$ , MPa				
	0,10	2,0	3,5	6,0	10
100	1,25	1,14	1,07	0,96	0,76
75	1,51	1,38	1,30	1,17	0,93
60	1,80	1,66	1,58	1,42	1,15
25	2,15	2,00	1,91	1,69	1,38
0	2,57	2,42	2,31	2,04	1,66
-25	3,12	2,93	2,78	2,48	1,98

<b>DWUTLENEK WĘGLA CO<sub>2</sub></b>					
<b>Temp. t °C</b>	<b>Ciśnienie p, MPa</b>				
	<b>0,10</b>	<b>2,0</b>	<b>6,0</b>	<b>7,5</b>	<b>10,0</b>
<b>60</b>	<b>8,375</b>	<b>8,325</b>	<b>8,060</b>	<b>7,675</b>	<b>6,250</b>
<b>50</b>	<b>8,950</b>	<b>8,950</b>	<b>8,800</b>	<b>8,225</b>	<b>5,570</b>
<b>40</b>	<b>9,575</b>	<b>9,655</b>	<b>9,705</b>	<b>8,760</b>	<b>2,620</b>
<b>30</b>	<b>10,27</b>	<b>10,43</b>	<b>10,84</b>	<b>2,870</b>	<b>1,215</b>
<b>20</b>	<b>11,05</b>	<b>11,36</b>	<b>14,35</b>	<b>1,075</b>	<b>0,700</b>
<b>10</b>	<b>11,91</b>	<b>12,52</b>	<b>0,720</b>	<b>0,578</b>	<b>0,407</b>
<b>0</b>	<b>11,90</b>	<b>14,02</b>	<b>0,370</b>	<b>0,310</b>	<b>0,215</b>
<b>-25</b>	<b>16,50</b>	<b>0,0</b>	<b>-0,028</b>	<b>-0,030</b>	<b>-0,050</b>

*Tablica 1. Różniczkowy współczynnik Joule'a-Thomsona*