

Určenie Joule-Thompsonovho koeficientu

Peter Kašuba¹ a Pavel Peterka¹

Determination of Joule-Thompson factor

Report gives the comprehensive information about the calculation of the fundamental physical property of gases and liquids Joule-Thompson effect. The Joule-Thompson effect deals with the behaviour of fluids flowing through a jet. A knowledge about this property is used in the exploration practice in the area of separation of crude oil and natural gas.

Key words: Fluid mechanics, Joule-Thompson effect, oil, gas

Pri prúdení plynno-kvapalných zmesí (PKZ) v kolektoroch na ropných a plynárenských prevádzkach, v podzemných zariadeniach pri ťažbe ropy a plynu, ako aj pri pretekaní PKZ cez úpravarenské zariadenia sa často prehliada vplyv prúdiaceho média na teplotné zmeny, ktoré prechádzajú v zúžených alebo škrtiacich prírezoch.

Škrtenie zapríčiňuje rozpínanie tekutín po prechode cez škrtiaci prvok (ventil, zúženie potrubia), pričom je tento proces sprevádzaný zmenou teploty. Škrtenie je teda termodynamický proces charakterizovaný konštantnou entalpiou ($i = \text{konš}$). Zmena teploty pri izoentalpii rozpínania sa nazýva Joule-Thompsonovým efektom a hodnota ε_i sa nazýva Joule-Thompsonov koeficient. Pre výpočet ε_i sa uvádza vzťah:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = \frac{T \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) - V}{C_p}, \quad (1.1)$$

kde:

T - teplota v systéme [°K];

V - objem pretekajúcej kvapaliny [m³];

C_p - molárna tepelná kapacita pri izobarickom procese [kJ.kmol⁻¹.K⁻¹];

$$C_p = 3,15 + 0,02203 \cdot T - 0,149 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + \frac{0,238 \cdot M_{zm} \cdot p^{1,124}}{\left(\frac{T}{100} \right)^{5,08}},$$

kde:

M_{zm} - celková molekulová hmotnosť [kg. Kmol⁻¹];

p - tlak v systéme [MPa];

$$M_{zm} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i,$$

kde:

y_i - objemové zloženie i-tej kvapaliny [%];

M_i - molekulová hmotnosť i-tej kvapaliny [kg.kmol⁻¹].

¹ Katedra mechanizácie, dopravy a vrtania F BERG Technickej univerzity, 043 84 Košice, Park Komenského 14 (Doručené 16.9.1996, revidovaná verzia doručená 6.11.1996)

Rozdielový objem plynu V_0 je rozdiel medzi objemom ideálneho plynu V_{ideal} a reálneho plynu V .

$$V_{ideal} = \frac{R \cdot T}{p},$$

$$V_0 = \frac{R \cdot T}{p} - V, \quad (1.2)$$

kde:

R - univerzálna plynová konštanta [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

$$V_0 = f(p, T),$$

Deriváciou rovnice (1.2) podľa T pri $p = \text{konšt.}$ a dosadením výsledku do rovnice (1.1) dostaneme:

$$\varepsilon_i = \frac{\left[V_0 - T \cdot \left(\frac{\partial V_0}{\partial T} \right)_p \right]}{C_p},$$

(1.3)

alebo

$$\varepsilon_i = \frac{T_{kr} \cdot f(p_{red}, T_{red})}{p_{red} \cdot C_p}, \quad (1.4)$$

kde:

$$f(p_{red}, T_{red}) = 1,44 \cdot \left[V_{0,red} - T_{red} \cdot \left(\frac{\partial V_{0,red}}{\partial T_{red}} \right)_{p_{red}} \right],$$

kde:

$$V_{0,red} = \frac{V_0}{V_{0,kr}},$$

$V_{0,kr}$ - kritický molárny objem zmesi [m^3];

$$V_{krit} = \sum_{i=1}^n \frac{z_{kriti} \cdot R \cdot T_{kriti}}{p_{kriti}},$$

kde:

T_{kriti} - kritická teplota i -tej zložky [$^{\circ}K$];

p_{kriti} - kritický tlak i -tej zložky [MPa];

z_{kriti} - kritický koeficient stlačiteľnosti i -tej zložky ^(A)

^(A) - bezrozmerné číslo

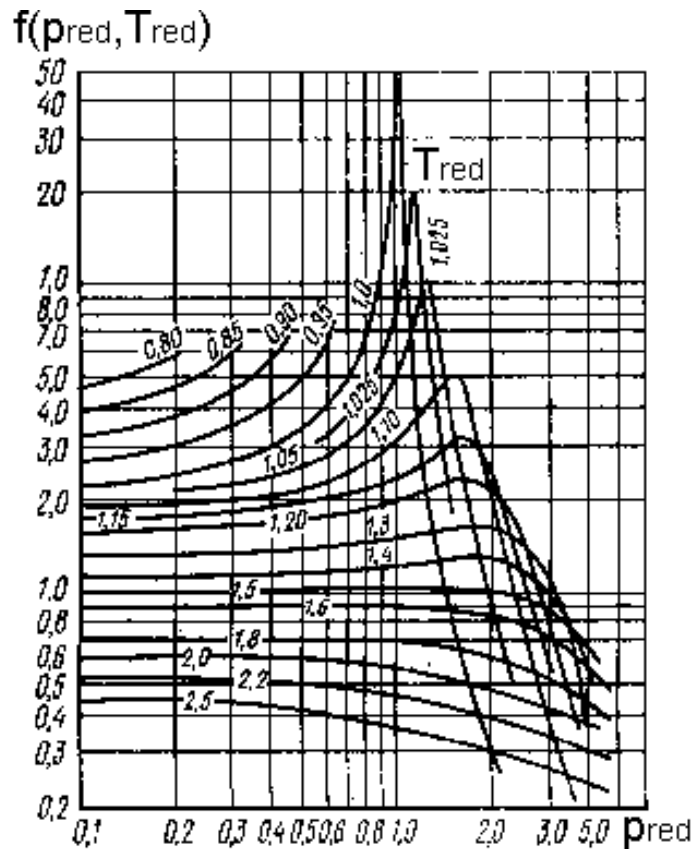
$$z_{kriti} = 0,2918 - 0,0928 \cdot \omega_i,$$

kde:

$$\omega_i = \frac{3}{7} \cdot \left[\frac{\log \frac{P_{krit}}{P_{at}}}{\left(\frac{T_{krit}}{T_{var i}} - 1 \right)} \right] - 1,$$

- ω_i - koeficient acentricity i-tej zložky ^(A);
 p_{at} - atmosférický tlak [Pa];
 $T_{var i}$ - teplota varu i-tej zložky [°K];

Hodnotu funkcie $f(p_{red}, T_{red})$ môžeme určiť pomocou nomogramu (obr.1), alebo vypočítať s odchýlkou pod 7% podľa regresnej závislosti, ktorý odvodili L.M. Guchman a T.V.Nagarevová.



Obr. 1. Závislosť veličiny $f(p_{red}, T_{red})$ od absolútnych hodnôt tlaku p_{red} a teploty T_{red} .

Vzťah má platnosť v intervale:

$$f(p_{red}, T_{red}) = 2,343 \cdot T_{red}^{-2,04} - 0,071 \cdot (p_{red} - 0,8), \quad (1.5)$$

$$1,6 \leq T_{red} \leq 2,1 \quad a \quad 0,8 \leq p_{red} \leq 3,5$$

kde:

$$T_{red} = \frac{T}{T_{ps.krit}}, \quad p_{red} = \frac{p}{p_{ps.krit}},$$

$$T_{ps.krit} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot T_{krit}, \quad p_{ps.krit} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot p_{krit}$$

kde:

- T_{red} - redukovaná hodnota teploty ^(A);
- p_{red} - redukovaná hodnota tlaku ^(A);
- $T_{ps.krit}$ - pseudokritická teplota [°K];
- $p_{ps.krit}$ - pseudokritický tlak [MPa];

Pre reálne prírodné plyny môžeme Joule-Thompsonov koeficient ε_i okrem vzťahu (1.1) vyjadriť aj pomocou koeficienta stlačiteľnosti: z.

$$\varepsilon_i = \frac{A_M \cdot R \cdot T}{C_p \cdot p} \cdot \left(\frac{\partial z^2}{\partial T} \right)_p,$$

(1.6)

Hodnotu $\left(\frac{\partial z^2}{\partial T} \right)_p$ - môžeme určiť z rovnice zloženia reálneho prírodného plynu, ktorú odvodili Peng

a Robinson:

$$\left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p = \frac{B \cdot z^2 - \left[6B^2 + 2B - 2A - \frac{A \cdot m}{\alpha} \cdot \left(\frac{T}{T_{krit}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot z + 3B^3 + 2B^2 - 3AB - \frac{A \cdot B \cdot m}{\alpha} \cdot \left(\frac{T}{T_{krit}} \right)^{\frac{1}{2}}}{T \cdot [3z^2 + 2(B-1) \cdot z - 3B^2 - 2B + A]}, \quad (1.9)$$

kde:

A_M , R- 8,314.10⁻³ [J.kMol⁻¹.K⁻¹];

α - bezrozmerná funkcia redukovanej teploty T_{red} a koeficientu acentricity ω ;

$$\alpha = 1 + m \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_{krit}} \right)^{\frac{1}{2}} \right],$$

^(A) - bezrozmerné číslo

$$A = \frac{a \cdot p}{R^2 \cdot T},$$

$$B = \frac{b \cdot p}{R \cdot T},$$

$$z = \frac{p \cdot V}{R \cdot T},$$

$$m = 0,37464 + 1,54226 \cdot \omega_{zm} - 0,26992 \cdot \omega_{zm}^2,$$

$$\omega_{zm} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot \omega_i,$$

- z - koeficient stlačiteľnosti;
 ω_{zm} - koeficient acentricity pre celkovú zmes;
 ω_i - koeficient acentricity pre i-tú zložku zmesi;
 y_i - i-tá zložka kvapalnej zmesi;
m - koeficient Peng - Robinsona
A, B - konštanty;

kde:

- a, b - konštanty;

$$a = \sqrt{0,4278 \cdot \frac{T_{krit}}{p_{krit} \cdot T^{2,5}}},$$

$$b = 0,0867 \cdot \frac{T_{krit}}{p_{krit} \cdot T},$$

Ak $\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p > 0$; $\varepsilon_i > 0$ - Plyn sa v procese škrtienia ochladzuje.

Ak $\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p < 0$; $\varepsilon_i < 0$ - plyn sa v procese rozpínania ohrieva.

V prípade ak $\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p = 0$; $\varepsilon_i = 0$, tak na priebehu nomogramu (obr. 1) získame inverzný bod.

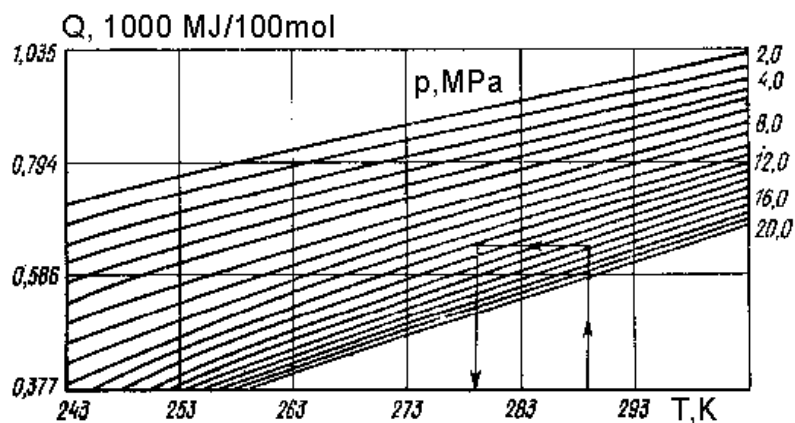
Po laboratórnych pokusoch a následných matematických výpočtoch sa dospelo k záveru, že vo väčšine prípadov sa plyny v procese škrtienia ochladzujú a kvapaliny ohrievajú.

U kvapalín je to zapríčinené tým, že po výtoku zo škrtiaceho elementu dochádza k jej kontrakcii, kvapalina si udržiava tzv. kontrakčný uhol.

Zmena teploty plynu (kvapaliny) v procese rozpínania za podmienok izoentálie pri značnom poklese tlaku na škrtiacom elemente sa nazýva integrálnym škrtiacim efektom. Túto zmenu môžeme určiť podľa vzťahu:

$$T_1 - T_2 = \int_{p_2}^{p_1} \varepsilon_i dp, \quad (1.10)$$

alebo pomocou nomogramu entálie, (obr. 2).



Obr. 2. Diagram entalpie pre prírodný plyn Oreburského plynno - kondenzátneho ložiska.

Približnú konečnú hodnotu teploty plynu v procese škrtenia získame zo vzťahu:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{3,75}{\tilde{C}_P \cdot T_{red1}} \cdot \tilde{p}_{red}^{\frac{1}{4}} \cdot \left[0,005 \cdot 10^{-3} \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) + 0,29 \cdot 10^{-7} (p_1^2 - p_2^2) - 209 \cdot 10^{-7} \cdot (p_1 - p_2) \right],$$

kde:

- p_1 - počiatkový tlak, pred procesom škrtenia [Pa];
- p_2 - konečný tlak, po procese škrtenia [Pa];
- T_1 - počiatková teplota, pred procesom škrtenia [°K];
- T_2 - konečná teplota, po procese škrtenia [°K];

$$\tilde{p}_{red} = \frac{(p_1 - p_2)}{2 \cdot p_{krit}},$$

$$T_{red1} = \frac{T_1}{T_{krit}},$$

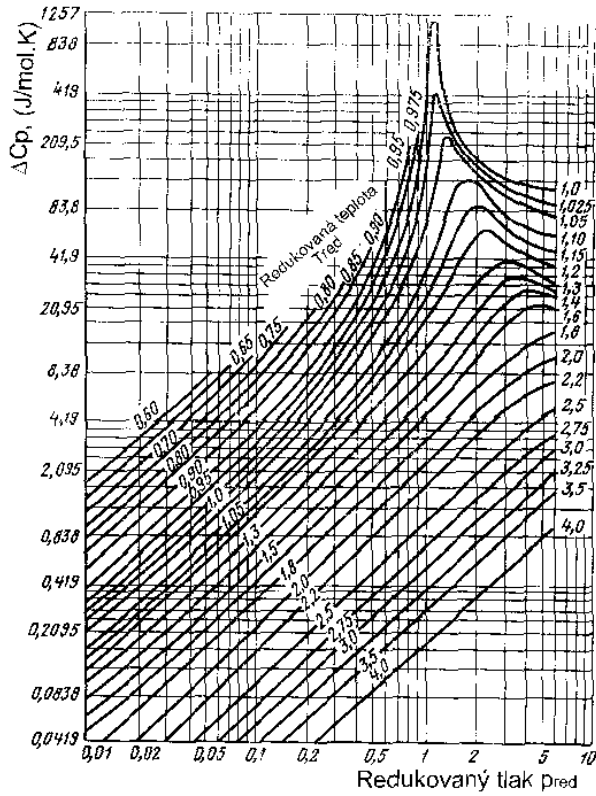
$$\tilde{C}_P = C_{P0}(t) + \Delta C_P(p, T),$$

$$C_{P0} = 0,523 \cdot (8,63 + 0,00892 \cdot t) \cdot M_i^{\frac{3}{4}},$$

$$\Delta C_P = \frac{32.600 \cdot p_{red}}{T_{red}^4},$$

kde:

- t - teplota prostredia [°C];
- M_i - molarne množstvo uhl'ovodíka, alebo z nomogramu (obr.3).



Moskva.

Obr. 3. Závislosť izotermickej korelácie izobarickej molarnej teplovodivosti ΔC_p od redukovaných veličín tlaku p_{red} a teploty T_{red} .

Integrálny Joule - Thompsonov koeficient pre prírodný plyn sa mení v intervale od 2°K.MPa^{-1} po 4°K.MPa^{-1} v závislosti od zloženia plynu, poklesu tlaku a počiatkovej teploty.

Na dosiahnutie efektu najväčšieho zníženia teploty je potrebné odstrániť kvapalinu z plynu ešte pred vstupom prúdiaceho média do škrtiaceho elementu.

Literatúra

- Heinrich, J.: Vlastnosti tekutín . ALFA , SNTL 1980, Bratislava.
- Korotaev, J.P a Širkovsky, A.I.: Dobyča, transport i podzemnoe chranenie gaza. Nedra 1984, Moskva.
- Murzadžanzade, A.CH. a Ametov, I.M: Technologia dobyči prirodnych gazov. Nedra 1987, Moskva.
- Trebin, F.A, Makogon, J.F. a Basniev, K.S : Dobyča prirodnovo gaza. Nedra 1976,