

# Skladovanie tekutého CO<sub>2</sub> v tankoch

Z. DVOŘÁK, F. JÄGER

---

## Úvod

Problém skladovania a dopravy skvapalnených plynov nie je novým problémom, ale v posledných rokoch nastal tu taký rozmach, že sa stal jedným z prvoradých problémov chladiacej techniky. Predošlý spôsob dopravy v oceľových fľašiach s jeho nevýhodným pomerom váh obalu a dopravovaného množstva látky je obmedzený na rozvoz drobným spotrebiteľom. Doprava veľkého množstva sa deje podľa okolností buď potrubím alebo na veľké vzdialenosti cisternami.

Medzi takto skladované a dopravované látky patrí i kyslík uhličitý, ktorého spotreba s novými možnosťami použitia opäť rastie. Zatiaľ čo predtým prevažná väčšina priemyselnej výroby sa spotrebovala na výrobu tuhej fázy, t. zv. suchého ľadu, je dnešné využitie okrem toho veľmi široké v zvarovacej technike (ako ochranná atmosféra), v jadrovej energetike (ako teplonosná látka), pre účely chladenia (priamym vstrekom do ochladzovanej látky), pre vytvrdzovanie jadier v zlievárenstve, pri konzervácii potravín a ich doprave atď.

Skladovanie tekutého CO<sub>2</sub> súvisí s radom zaujímavých problémov v riešení samotného tanku, chladiaceho zariadenia udržiavajúceho predpísanú teplotu a tým i tlak v nádrži a ďalej v riešení splynovacieho zariadenia.

Z práce, v ktorej autori tohoto článku riešili skladovacie zariadenie s tankmi à 5 m<sup>3</sup> sú v ďalšom uvedené niektoré zaujímavejšie partie.

## Technický popis

Schéma zapojenia tanku, jeho chladiaceho zariadenia pre odber plynného CO<sub>2</sub> a príslušnej automatiky je znázornené na obr. 1.

### Vysvetlivky značiek

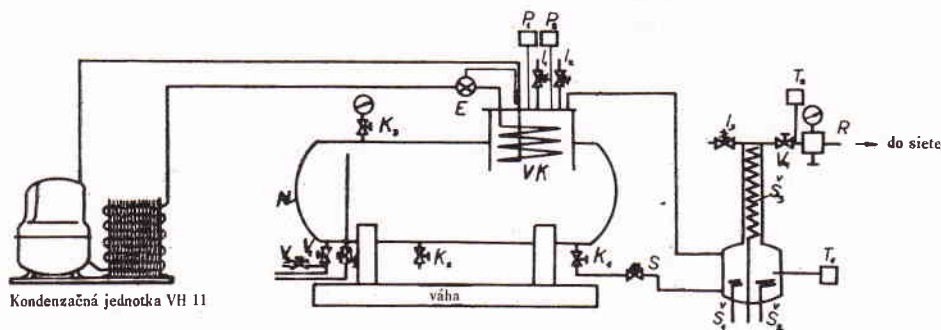
- I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> a I<sub>3</sub> — poistné ventily
- P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> — presostaty
- T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> — termostaty
- S — solenoidový ventil
- V<sub>1</sub> — uzavierací kohút plnenia
- V<sub>2</sub> — uzavierací kohút na vyrovnávanie tlaku pri plnení
- V<sub>3</sub> — uzavierací kohút slúžiaci na odvzdušnenie potrubia pri plnení aby sa nedostal stĺpec vzduchu z potrubia do tanku
- V<sub>4</sub> — uzavierací ventil plynného CO<sub>2</sub>.

## Nádrž

Obsah vlastného skladovacieho tanku je  $5 \text{ m}^3$ , má rozmery  $\varnothing 1400 \text{ mm}$ , dĺžku  $3740 \text{ mm}$  a je konštruovaný pre výpočtový tlak  $20 \text{ kp/cm}^2$ . Je z materiálu 11416.1. V hornej časti umiestnený dóm obsahuje výparník chladiaceho zariadenia VK s jeho termostatickým expanzným ventilom E a ďalej do dómu je napojené potrubie pre odber plynného  $\text{CO}_2$ . Z dolnej časti tanku sa potrubím cez ventily  $K_1$  a S odobiera kvapalný  $\text{CO}_2$ . Potrubie s ventilom  $K_2$  slúži odkalovaniu alebo pri väčšom počte tankov ich vzájomnému prepojeniu. Nádrž je svojimi podperami uložená na tepelne izolačných podperách z bukového dreva a ako celok uložená na váhe.

Tepelná izolácia hrúbky  $200 \text{ mm}$  je z tvarového peneného polystyrénu (UMAPOR), navzájom lepeného a s parotesnou povrchovou vrstvou  $3 \text{ mm}$  epoxydového laminátu. Rovnako je izolované potrubie v hrúbke  $65 \text{ mm}$ .

Chladiace zariadenie slúži na udržiavanie tlaku v rozmedzí  $17 \div 20 \text{ kp/cm}^2$ , čo odpovedá teplote sýtych pár  $-25$  až  $-20^\circ \text{C}$ . Je vytvorené hermetickým kompresorovým sústrojím s vzduchom chladeným kondenzátorom typu VH 11 a predtým



Obr. 1

spomínaným výparníkom VK s vstrekovacím ventilom E. Predpokladaný chladiaci výkon pri vyparovacej teplote  $-25^\circ \text{C}$  je  $800 \text{ kcal/h}$ . Chladiace zariadenie sa uvádza do činnosti presostatom  $P_1$  pri dosiahnutí tlaku  $20 \text{ kp/cm}^2$ . Kondenzáciou pár  $\text{CO}_2$  na výparníku sa udržiava tlak v predtým uvedených medziach.

Splynovač je pripojený k nádrži kvapalným a plynným potrubím. Je to nádoba valcovitého tvaru, s lemovanými dnami. V hornej časti dna je zavarená trubka, v ktorej je predhrievacia špirála  $\check{S}_3$  o výkone  $4500 \text{ W}$ . Prehriaty plyn ( $+50^\circ \text{C}$ ) prechádza cez uzavierací ventil  $V_4$ , cez redukčný ventil R, kde sa redukuje tlak z  $20 \text{ kp/cm}^2$  na  $6 \div 2 \text{ kp/cm}^2$ , k spotrebiteľovi. V spodnej časti splynovača sú umiestnené ponorné topné telesá  $\check{S}_1$  o výkone  $750 \text{ W}$  a  $\check{S}_2$  o výkone  $1000 \text{ W}$ . Splynovač je delený. Prírubby sú spojené skrutkami. Izolácia splynovača je z polystyrénu a prehrievacie potrubie z čadičovej vlny.

## Funkcia zariadenia

Po naplnení tanku na predpísanú váhu (t. j.  $75\%$  plnenia a nie je odber  $\text{CO}_2$ ), teplota v nádrži je udržiavaná automaticky presostatom  $P_1$ , ktorý udržiava rozmedzie teplôt  $-25$  až  $-20^\circ \text{C}$ . V prípade odberu ale je tlak v nádrži nad  $17 \text{ kp/cm}^2$ , presostat

uzavrie solenoidový ventil S. Súčasne je vypnutý ponorný ohrievač  $\dot{S}_1$  o výkone 750 W. Plynny kyslíčnik uhličitý prechádza cez prehrievač  $\dot{S}_3$  o výkone 4500 W. ohreje sa na  $+50^\circ\text{C}$ , postupuje cez redukčný ventil R a ďalej do siete. Prehriatie plynného  $\text{CO}_2$  reguluje termostat  $T_2$ , ktorý pri stúpnutí teploty nad  $+50^\circ\text{C}$  vypne prehrievacu špirálu  $\dot{S}_3$  a ponorný ohrievač  $\dot{S}_2$  o výkone 1000 W. Odberom plynného  $\text{CO}_2$  poklesne tlak v nádrži a obsah kvapalného  $\text{CO}_2$  sa podchladí.

Pri poklese tlaku pod  $17\text{ kp/cm}^2$  presostat  $P_2$  otvorí solenoidový ventil S, súčasne zapne ponorný ohrievač  $\dot{S}_1$ . V splynovači sa tekutý kyslíčnik uhličitý premení na plynný a prehreje na  $+50^\circ\text{C}$ . Termostat  $T_2$  reguluje prehrievanie.

Hladinu tekutého  $\text{CO}_2$  v splynovači reguluje termostat  $T_1$ . Pri stúpnutí hladiny kvapalného kyslíčnika uhličitého až po tykavku termostatu, termostat  $T_1$  uzavrie solenoidový ventil S. Pri poklese hladiny ho opäť otvorí.

### Výpočet

Výpočet tanku a chladiaceho zariadenia je bežne známy z literatúry a preto nie je tu uvedený. Ako zaujímavý príklad menej obvyklého výpočtu je v ďalšom uvedený tepelný výpočet splynovača.

#### Tepelný výpočet splynovača

Teplo potrebné pre splynovanie kvapalného kyslíčnika uhličitého.

$$Q_1 = G(i_{II} - i_I) \quad [\text{kcal/h}] \quad (1)$$

$G$  — odber  $[\text{kp/h}]$

$i_{II}$  — entalpia  $\text{CO}_2$  na krivke sýtosti

$i_I$  — entalpia  $\text{CO}_2$  na krivke varu

Teplo  $Q_{II}$  potrebné na prehriatie plynného  $\text{CO}_2$ , aby pri škrtení na požadovaný tlak nedošlo k zamrznaniu redukčného ventilu vplyvom Joule-Thomsonovho efektu.

$$Q_{II} = G(i_1 - i_i) \quad [\text{kcal/h}] \quad (2)$$

$i_1$  — entalpia prehrievaného plynu.

$$Q = Q_I + Q_{II}$$

Volený výkon prehrievacej špirály býva asi o 30 % vyšší než je potrebné teplo  $Q$  vzhľadom na straty.

Topné teleso tvorí plochý oválny profil  $6,5 \times 12\text{ mm}$ , ktorý je stočený do špirály.

Predpoklad:

Prehrievacu špirálu predpokladáme ako trubku o konštantnom priereze. Plynny kyslíčnik uhličitý prúdi v priestore medzi trubkou ( $J_s 40$ ) a prehrievacou špirálou.

Prietočné prierezy sú volené tak, aby rýchlosť plynného  $\text{CO}_2$  bola v celom priereze približne rovnaká.

$$F_3 - F_2 = F_1 \quad (3)$$

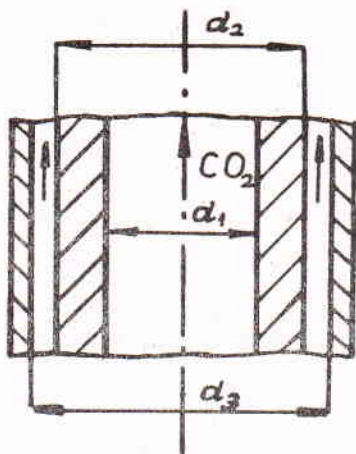
rýchlosť

$$w = \frac{V}{F} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

$V$  — prietočný objem  $[\text{m}^3/\text{s}]$

$F$  — prietočná plocha  $(\text{m}^2)$

- 1 — indexom je označovaný vnútorný povrch prehrievacej špirály
- 2 — indexom je označovaný vonkajší povrch prehrievacej špirály
- 3 — indexom je označovaný vnútorný povrch trubky (pozri obr. 2)



Obr. 2

Súčiniteľ priestupu tepla na strane prúdiaceho plynu samotnou konvekciou sa určí podľa veľkosti Reynoldsovho čísla

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (5)$$

$w$  — rychlosť prúdenia plynného  $CO_2$  [m/s]

$d$  — charakteristický rozmer [m]

$\nu$  — kinematická viskozita [m<sup>2</sup>/s]

buď pre oblasť prechodovú t. j. pre  $2320 < Re < 10^4$  z vzťahu

$$Nu = 0,116(Re^{\frac{2}{3}} - 125) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \left[ 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \left( \frac{\eta}{\eta_{st}} \right)^{0,14} \quad (6)$$

alebo pre oblasť plne rozvinutého turbulentného prúdenia pri  $Re > 10^4$  z vzťahu

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7)$$

v týchto vzorcoch značí:

$Nu$  — Nusseltovo číslo

$Pr$  — Prandtlovo číslo

$\alpha$  — súčiniteľ priestupu tepla [kcal/m<sup>2</sup> h deg]

$\lambda$  — súčiniteľ tepelnej vodivosti látky [kcal/m h deg]

$l$  — charakteristický rozmer [m]

$\eta_{st}$  — teplota steny [°C]

$\eta$  — stredná aritmetická teplota látky [°C]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (8)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \quad (9)$$

$$a = \frac{\lambda}{3600 \cdot \gamma \cdot c_p} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (10)$$

$a$  — súčiniteľ teplotnej vodivosti

$\gamma$  — merná váha [ $\text{kp}/\text{m}^3$ ]

$c_p$  — merné teplo [ $\text{kcal}/\text{kp deg}$ ]

Vzorec (7) sa dá upraviť do tvaru

$$\alpha = A_t \cdot \frac{w^{0,8}}{d^{0,2}} \quad [\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ h deg}] \quad (11)$$

$A_t$  — súčiniteľ, je funkciou fyzikálnych parametrov, určená teplotou.

$$A_t = 0,61 \cdot \frac{\lambda^{0,6} \cdot c_p^{0,4} \cdot \gamma^{0,4}}{\nu^{0,4}} \quad (12)$$

Topný výkon špirály  $Q$  musí byť rovný

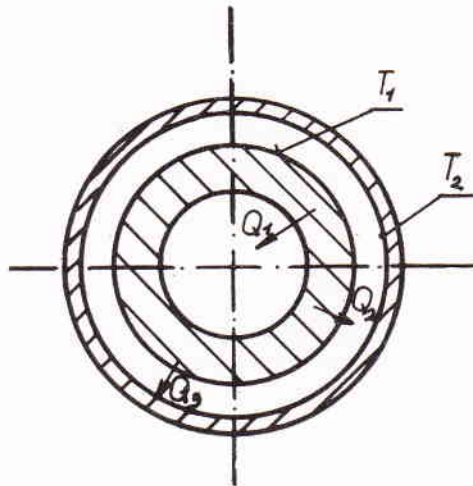
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (13)$$

kde  $Q_1$  je teplo prechádzajúce konvekciou zo špirály do plynu prúdiaceho vo vnútri špirály a spočítané zo vzťahov (8) resp. (11) ako

$$Q_1 = F_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta t \quad (14)$$

$Q_2$  je teplo prestupujúce z prehrievacej špirály do plynu, prúdiaceho medzi trúbkou a prehrievacou špirálou

$Q_3$  je teplo prechádzajúce priestupom ( $Q_v$ ) a sálaním ( $Q_s$ ) na vnútornú stenu trubky



Obr. 3

$$Q_3 = Q_s + Q_v \quad [\text{kcal/h}] \quad (15)$$

pre obidve menované zložky platia výrazy

$$Q_s = 4,96 \cdot \varepsilon_u \cdot F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi \quad (16)$$

$$\varepsilon_u = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_3} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}; \varphi = 1; F = F_3 \quad (17)$$

$$Q_v = \frac{\pi \cdot L(T_1 - T_2)}{\frac{1}{\alpha_2 d_2} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_3 d_3}} \quad [\text{kcal/h}] \quad (18)$$

kde 4,96 je súčiniteľ sálenia čierneho telesa

$\varepsilon_u$  — súčiniteľ zloženej pohltivosti sústavy oboch telies

$F$  — vnútorný povrch trubky ( $\text{m}^2$ )

$T_1, T_2$  — teploty povrchov oboch telies ( $^{\circ}\text{K}$ )

$\varphi$  — súčiniteľ osálenia sústavy

$L$  — dĺžka topnej špirály (m)

Ak volíme povrchovú teplotu špirály  $T_1$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) a známe topný výkon  $Q$  [ $\text{kcal/h}$ ], je možné neznámu hodnotu teploty povrchu trubky  $T_2$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) určiť napr. nasledovným postupom:

Rovnice (16) a (18) je možné písať v tvare

$$Q_s = A - B \cdot T_2^4 \quad (19)$$

$$Q_v = C - D \cdot T_2^4 \quad (20)$$

Vzhľadom na to, že platí rovnica (15), bude

$$Q_3 = Q_s + Q_v = A - B \cdot T_2^4 + C - D \cdot T_2^4 \quad (21)$$

a súčasne

$$Q_3 = Q - (Q_1 + Q_2) \quad (22)$$

Úpravou (21) a (22) obdržíme

$$T_2^4 + E \cdot T_2 + F = 0 \quad (23)$$

rovnica je 4. radu a rieši sa redukciou na 3. rad

korene:

$$T_{2a} = \frac{1}{2} (\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2} + \sqrt{z_3})$$

$$T_{2b} = \frac{1}{2} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3})$$

$$T_{2c} = \frac{1}{2} (-\sqrt{z_1} - \sqrt{z_3} - \sqrt{z_2})$$

$$T_{2d} = \frac{1}{2} (-\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} + \sqrt{z_3})$$

Kde  $z_1, z_2, z_3$  sú korene rovnice 3. radu  
Obecne:

$$T^4 + pT^2 + qT + r = 0$$

$$z^3 + 2pz^2 + (p^2 - 4r)z - q^2 = 0$$

Riešením pre reálne korene obdržíme  $T_2$  (°C). Tým je možné určiť  $Q_s, Q_v$ . Časť tepla, ktoré sa dostalo sálaním a vedením z prehrievacej špirály na trubku, sa stráca izoláciou trubky do okolia a časť sa šíri vedením v trubke do spodnej časti splynovača.

### Súhrn

V článku sú pojaté len niektoré partie z konštrukčného návrhu skladovania tekutého  $CO_2$  v tankoch z dôvodov rozsiahlosti práce a už bežne známych vecí z literatúry. Voľba splynovacieho systému ako i udržanie konštantného tlaku v skladovacej nádrži môže viesť k rôznym iným variáciám vyhotovenia zariadenia.

Hlavný význam navrhnutého zariadenia spočíva v tom, že vytvára plnoautomatické zariadenie pre skladovanie tekutého kyslíčnika uhličitého s odberom plynnej fázy.

### Literatúra

Knihy:

1. Dvořák Z.—Červenka O., Промысловá chladicí zařízení (SNTL, Praha 1962).
2. Dvořák Z., Chladicí technika I. (skripta, SNTL, Praha 1963).
3. Dvořák Z.—Chyský J., Vybrané stati ze sdílení tepla (skripta, SNTL, Praha 1964).
4. Chlumský V., Konstrukce chladicích zařízení (skripta, SNTL, Praha 1958).
5. Plank R., Handbuch der Kältetechnik IV. (Berlín 1956).
6. Polák V., Automatika chladicích zařízení (Praha 1959).
7. Rendla F., Tepelné izolace (skripta, Praha 1962).
8. Spravočnik mašinostroitelja (I. II. III. IV. diel, Moskva 1955)
9. Jäger F., Diplomová práca (ČVUT Praha 1965).

## Хранение жидкого углекислого газа в цистернах

### Выводы

В статье приводятся только некоторые части из предложенной конструкции хранения жидкого углекислого газа в цистернах из-за обширности работы, и некоторых познаний уже известных в литературе. Выбор системы газификации, в том числе и поддержка постоянного давления в цистерне, может вести к разным способам создания установки.

Главное значение предложенной установки заключается в том, что она является полно автоматической установкой для хранения жидкого углекислого газа, с возможностью отбирать газовую фазу.

## Lagerung von flüssigem $CO_2$ in Behältern

### Zusammenfassung

Im Artikel sind nur einige Teile von Konstruktionsvorschlag der Lagerung von flüssigen  $CO_2$  im Behältern inbegriffen aus Gründen des Arbeitsumfanges und schon laufend bekannter Angaben aus der Literatur. Die Wahl des Systems zur Vergasung, sowie auch die Erhaltung von konstantem Druck in dem Lagerungsbehälter kann zu verschiedenen anderen Variationen zur Herstellung der Anlage führen.

Die besondere Bedeutung der vorgeschlagenen Anlage liegt darin, dass sie eine voll-automatisierte Anlage für die Lagerung des flüssigen  $CO_2$  mit Bezug der Gasphase schafft.