



BEZPEČNÉ ZACHÁZENÍ SE ZÁSOBNÍKY NA KAPALNÝ OXID UHLIČITÝ, KTERÉ ZTRATILY TLAK

IGC Doc 164/10/CZ
Globálně harmonizovaný dokument

Odborný překlad proveden pracovní skupinou PS-6 ČATP

**EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION
(EVROPSKÁ ASOCIACE PRŮMYSLOVÝCH PLYNŮ)**
AVENUE DES ARTS 3-5 • B – 1210 BRUSSELS
Tel : +32 2 217 70 98 • Fax : +32 2 219 85 14
E-mail : info@eiga.eu • Internet : <http://www.eiga.eu>

ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ
U Technoplynu 1324, 198 00 Praha 9
Tel: +420 272 100 143 • Fax: +420 272 100 158

E-mail : catp@catp.cz • Internet : <http://www.catp.cz/>



BEZPEČNÉ ZACHÁZENÍ SE ZÁSOBNÍKY NA KAPALNÝ OXID UHLIČITÝ, KTERÉ ZTRATILY TLAK

KLÍČOVÁ SLOVA

- OXID UHLIČITÝ
- SUCHÝ LED
- ZÁSOBNÍK DEFINICE VZTAHUJÍCI SE K ZÁSOBNÍKU
- DEFINICE VZTAHUJÍCI SE K ZÁSOBNÍKU
- BEZPEČNOST
- ZÁKONNÉ PŘEDPISY

Odmítnutí odpovědnosti

Veškeré technické publikace EIGA, nebo vydané jménem EIGA, včetně praktických manuálů, bezpečnostních postupů a jakýchkoliv dalších technických informací, obsažených v těchto publikacích, byly převzaty ze zdrojů, o které považujeme za spolehlivé a které se zakládají na odborných informacích a zkušenostech, aktuálně dostupných u členů asociace EIGA a dalších, k datu jejich vydání.

I když asociace EIGA doporučuje svým členům používat své publikace nebo se na ně odkazovat, je používání publikací asociace EIGA nebo odkaz na tyto publikace členy asociace nebo třetími stranami čistě dobrovolné a nezávazné. Proto asociace EIGA a členové asociace EIFA neposkytují žádnou záruku za výsledky a nepřebírají žádný závazek či odpovědnost v souvislosti s referencemi a s použitím informací a doporučení obsažených v publikacích asociace EIGA.

Asociace EIGA nemá žádnou kontrolu nad čímkoli, pokud se jedná o provádění nebo neprovádění výkonu, chybnou interpretaci informací, správné nebo nesprávné používání jakýchkoli informací a doporučení obsažených v publikacích asociace EIGA., ze strany osob nebo organizačních jednotek (včetně členů asociace EIGA) a asociace EIGA výslovně neuzná v této souvislosti jakoukoli odpovědnost. Publikace asociace EIGA jsou pravidelně revidovány a uživatelé jsou upozorňováni, aby si opatřili poslední vydání.



BEZPEČNÉ ZACHÁZENÍ SE ZÁSOBNÍKY NA KAPALNÝ OXID UHLIČITÝ, KTERÉ ZTRATILY TLAK

Dokument IGC Doc 164/10/E

GLOBÁLNĚ
HARMONIZOVANÝ DOKUMENT

Založený na CGA G-6.7

EVROPSKÁ ASOCIACE PRŮMYSLOVÝCH PLYNŮ AISBL



AVENUE DES ARTS 3-5 • B – 1210 BRUSSELS
Telefon: +32 2 217 70 98 • Fax: +32 2 219 85 14
E-mail: info@eiga.eu • Internet: <http://www.eiga.eu>



BEZPEČNÉ ZACHÁZENÍ SE ZÁSObNÍKY NA KAPALNÝ OXID UHLIČITÝ, KTERÉ ZTRATILY TLAK

PŘIPRAVILI:

Hervé Barthélémy	Air Liquide
Dany Bourdeaud'huy	Praxair
Jean-Louis Jolivet	Air Liquide
Udo Kohl	Messer
Klaus Krinninger	IGV
David Teasdale	The Linde Group
Andy Webb	EIGA
Stuart Williams	Air Products

ODMÍTNUTÍ ODPOVĚDNOSTI

Všechny technické publikace EIGA nebo pod jménem EIGA včetně Sbírek praktických postupů, Bezpečnostních postupů a všechny další technické informace v těchto publikacích obsažené, byly získány ze zdrojů, které považujeme za spolehlivé a které se zakládají na odborných informacích a zkušenostech aktuálně dostupných u členů asociace EIGA a dalších k datu jejich vydání.

I když asociace EIGA doporučuje svým členům používat své publikace nebo se na ně odkazovat, je používání publikací asociace EIGA nebo odkaz na tyto publikace členy asociace nebo třetími stranami čistě dobrovolné a nezávazné.

Proto asociace EIGA a členové asociace EIGA neposkytují žádnou záruku za výsledky a nepřebírají žádný závazek či odpovědnost v souvislosti s referencemi a s použitím informací a doporučení obsažených v publikacích asociace EIGA.

Asociace EIGA nemá žádnou kontrolu nad čímkoliv, pokud se jedná o provádění nebo neprovádění výkonu, chybnou interpretací informací, správné nebo nesprávné používání jakýchkoliv informací a doporučení obsažených v publikacích asociace EIGA ze strany osob nebo organizačních jednotek (včetně členů asociace EIGA) a asociace EIGA výslovně neuznává v této souvislosti jakoukoliv odpovědnost.

Publikace asociace EIGA jsou pravidelně přezkoumávány a uživatelé jsou upozorňováni, aby si opatřili poslední vydání.

© Reprodukováno s povolením Asociace pro stlačené plyny. Všechna práva vyhrazena.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Rozsah a účel	1
2.1	Rozsah	1
2.2	Účel.....	1
3	Definice	1
3.1	Automatické ochlazování	1
3.2	Křehkost	1
3.3	Koincidenční teplota	1
3.4	Stlačený plyn	1
3.5	Kondenzace.....	2
3.6	Zásobník.....	2
3.7	Kritická velikost.....	2
3.8	Snížení tlaku.....	2
3.9	Suchý led.....	2
3.10	Tažnost.....	2
3.11	Pružnost	2
3.12	Rovnováha	2
3.13	Nízkolegovaná uhlíková ocel.....	2
3.14	Maximální povolený pracovní tlak (MAWP).....	2
3.15	Tavení.....	2
3.16	Minimální konstrukční teplota kovu (MDMT).....	2
3.17	Teplota nulové tažnosti (NDTT)	3
3.18	Plastická deformace	3
3.19	Tlakovací odpařovač	3
3.20	Kvalifikovaný technik pro oxid uhličitý	3
3.21	Opětovné natlakování.....	3
3.22	Sublimace	3
3.23	Houževnatost.....	3
3.24	Trojný bod.....	3
3.25	Pevnost v tahu.....	3
3.26	Překročený stav.....	3
3.27	Odpařování	3
4	Základ	3
5	Varování.....	4
6	Vlastnosti oxidu uhličitého	4
7	Teplota a tlak	6
8	Fyziologie a toxikologie oxidu uhličitého.....	7
8.1	Všeobecné údaje.....	7
8.2	Fyziologické účinky oxidu uhličitého.....	8
8.3	Fyzické účinky nadměrného vystavení vlivu oxidu uhličitého	8
8.4	Zákonné předpisy	8
8.5	Bezpečnostní opatření.....	9
8.6	Záchrana a první pomoc.....	9
9	Zvláštní nebezpečí.....	9
9.1	Všeobecně.....	9
9.2	Zablokování suchým ledem nebo ucpání.....	9
9.3	Vliv nízké teploty na materiály.....	10
9.4	Zachycená kapalina.....	10
9.5	Nadměrné vystavení se vlivu u zaměstnanců.....	10
10	Rizika opětovného natlakování zásobníku oxidu uhličitého	11
10.1	Rizika.....	11
10.2	Varování	13

11	Předběžné pracovní postupy pro navrácení zásobníků se sníženým tlakem do provozu	14
11.1	Požadavky na zaměstnance	14
11.2	Ustanovení pro alternativní zdroj.....	14
11.3	Vyhodnocení zásobníku se sníženým tlakem	14
11.4	Fakta ke zvážení při vyhodnocování postupů opětovného natlakování	15
12	Návod pro vyhodnocení stavu zásobníku se sníženým tlakem.....	16
12.1	Tlak zásobníku je vyšší než 1380 kPa (200 psig)	17
12.2	Tlak zásobníku je nižší než 1380 kPa (200 psig), ale vyšší než 416 kPa (60,4 psig)	17
12.2.1	Minimální konstrukční teplota kovu zásobníku -20 °F (-29 °C).....	17
12.2.2	Minimální konstrukční teplota kovu zásobníku -40 °C (-40,0 °F).....	17
12.2.3	Minimální konstrukční teplota kovu zásobníku -46 °C (-50 °F).....	17
12.2.4	Zásobníky s jinými hodnotami minimální konstrukční teploty kovu	17
12.3	Tlak zásobníku nižší než 416 kPa (60,4 psig).....	17
12.4	Speciální nízkoteplotní zásobníky	18
13	Doporučené pracovní postupy pro opětovné natlakování	18
13.1	Doporučení	18
13.2	Přirozené opětovné natlakování bez obsluhy (Pracovní postup 1).....	18
13.3	Zahřívání teplým plynem bez tlaku (Pracovní postup 2)	19
13.4	Natlakování plynu oxidu uhličitého až na 690 kPa (100 psig) (Pracovní postup 3)	19
13.5	Recirkulace ohřáté kapaliny (Pracovní postup 4).....	20
14	Pracovní postupy opětovného natlakování – nedoporučené	21
14.1	Napuštění kapalného oxidu uhličitého do zásobníku pro rozpuštění suchého ledu a ohřátí kapaliny – nedoporučuje se.....	21
14.2	Pracovní postup použití tlakovacího odpařovače/interního ohříváče – nedoporučuje se....	22
14.3	Přenos opětovně natlakovaného oxidu uhličitého v opětovně natlakované přípojce zásobníku se sníženým tlakem – nedoporučuje se	22
14.4	Odstranění kapalného oxidu uhličitého ze zásobníku a přečerpání do nákladních cisteren – nedoporučuje se	22
14.5	Manuální odstranění suchého ledu – nedoporučuje se	22
15	Souhrn doporučených pracovních postupů	22
15.1	Všeobecné informace.....	22
15.2	Monitorování.....	23
15.3	Podrobný popis postupu opětovného natlakování o dvou krocích (kapitoly 13.4 a 13.5)....	23
15.3.1	Krok jedna (<690 kPa [100 psig])	23
15.3.2	Krok dva (>690 kPa [100 psig]).....	23
16	Reference	24

Tabulky

Tabulka 1 – Fyzikální konstanty oxidu uhličitého	5
Tabulka 2 – Vztah tlaku/pnutí stěny zásobníku oxidu uhličitého.....	11

Obrázky

Obrázek 1 – Fázový diagram oxidu uhličitého	6
Obrázek 2 – Příklady nesprávné a preferované instalace zařízení na uvolnění tlaku (bezpečnostní přetlakový ventil) na potrubí kapalného oxidu uhličitého.....	10
Obrázek 3 – Povolené tlaky-teploty u ASME zásobníku kapalného oxidu uhličitého (bezpečnostní součinitel před rokem 1976 4X).....	12
Obrázek 4 – Povolené tlaky-teploty u ASME zásobníku kapalného oxidu uhličitého (bezpečnostní součinitel před rokem 1998 4X, po roce 1998 3,5X)	12
Obrázek 5 – Formulář vyhodnocení zásobníku se sníženým tlakem.....	15

Dodatek

Dodatek A – Konstrukční údaje o materiálu tlakových nádob EN.....	25
---	----

Obrázky v dodatku

Obrázek A-1 – Porovnání EN a ASME povolených MDMT pro zásobník oxidu uhličitého pro opětovné natlakování	25
Obrázek A-2 – Konstrukční referenční teploty a teploty rázové zkoušky jako podmínky pro svařovanou a tlakovou nádobu podle EN	26

1 Úvod

Jako součást programu harmonizace průmyslových norem Evropská asociace průmyslových plynů (EIGA) přijala původní normu Asociace pro stlačené plyny (CGA) G-6.7.

Tento dokument je určen jako mezinárodně harmonizovaná norma pro použití po celém světě a použití všemi členy asociací EIGA, CGA, JIMGA, AIGA a ANZIGA. Vydání EIGA má stejný technický obsah jako vydání CGA, nicméně obsahuje redakční změny zejména ve formátování, použitých jednotkách a pravopisu. Také odkazy na Evropské regionální požadavky na tvorbu norem nahrazují nařízení US.

2 Rozsah a účel

2.1 Rozsah

Rozsah této publikace se týká zejména bezpečného opětovného natlakování stabilních nebo přenosných zásobníků s kapalným oxidem uhličitým vyrobených z nízkolegovaných uhlíkových ocelí, které mají minimální konstrukční teplotu kovu vyšší než -110 °F ($-78,9\text{ °C}$).

2.2 Účel

Účelem této publikace je poskytovat zaměstnancům informace pro zajištění bezpečného opětovného natlakování zásobníků s oxidem uhličitým, které ztratily tlak a možná obsahují suchý led před tím, než budou vráceny do provozu.

Jsou uvedeny příklady pracovních postupů opětovného natlakování pro zásobníky vyrobené podle normy Americké společnosti strojních inženýrů *ASME Boiler & Pressure Vessel Code* (Předpisy pro kotle a tlakové nádoby), část VIII, oddíl 1, Tlakové nádoby (ASME Code) [1]¹.

3 Definice

Za účelem této publikace platí následující definice.

3.1 Automatické ochlazování

Snižování teploty oxidu uhličitého jak se snižuje tlak pro udržení rovnováhy mezi teplotou a tlakem.

3.2 Křehkost

Vlastnost materiálu, která způsobuje, že praskne pod zatížením s malou nebo žádnou deformací.

3.3 Koincidenční teplota

Odpovídající teplota pro látky při daném tlaku v rovnovážném stavu.

3.4 Stlačený plyn

Látka, která existuje pouze jako plyn při uvedené teplotě a tlaku.

¹ Odkazy jsou zobrazeny čísly v závorkách a jsou uvedeny na seznamu v pořadí výskytu v kapitole reference.

3.5 Kondenzace

Proces, kterým se plyn přeměňuje na kapalinu.

3.6 Zásobník

Izolovaná tlaková nádoba vyrobená podle předpisu ASME pro skladování kapalného oxidu uhličitého [1]. Zásobník je výraz zaměnitelný pro nádobu nebo cisternu.

3.7 Kritická velikost

Velikost trhliny v materiálu zásobníku, která způsobuje nekontrolované zvýšení délky praskliny při konstantním zatížení.

3.8 Snížení tlaku

Snížení tlaku v zásobníku, které má za následek nižší teplotu zásobníku, než je minimální konstrukční teplota kovu (MDMT) nebo tuhnutí oxidu uhličitého.

POZNÁMKA: Typické příčiny jsou přetížení tlakovacího odpařovače, prosakování nebo zařízení na uvolnění tlaku, které se po odlehčení řádně neuzavřelo.

3.9 Suchý led

Běžný název pro pevný oxid uhličitý.

POZNÁMKA: Jeho teplota je $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-109,3\text{ }^{\circ}\text{F}$) při atmosférickém tlaku.

3.10 Tažnost

Vlastnosti materiálu, která definuje jeho schopnost se deformovat pod zatížením, aniž by došlo k prasknutí.

3.11 Pružnost

Vlastnost materiálu, která definuje jeho schopnost se deformovat pod zatížením, aniž by se deformoval nastalo.

3.12 Rovnováha

Fyzický stav látky, kdy se teplota a tlak nezmění bez změny energie.

3.13 Nízkolegovaná uhlíková ocel

Ocel s nízkým obsahem uhlíku obsahující poměrně malá množství dalších prvků pro zvýšení pevnosti, tvárnosti a houževnatosti.

3.14 Maximální povolený pracovní tlak (MAWP)

Maximální povolený přetlak v horní části nádoby v její provozní poloze pro navrženou teplotu.

3.15 Tavení

Proces, kterým se pevný oxid uhličitý přeměňuje na kapalinu.

3.16 Minimální konstrukční teplota kovu (MDMT)

Nejnižší teplota, na kterou je zásobník zkonstruován, aby pracoval při uvedeném tlaku.

3.17 Teplota nulové tažnosti (NDTT)

Teplota, pod kterou jsou kovy dost křehké na to, aby praskly.

3.18 Plastická deformace

Deformace materiálu, která zůstane stálá po odstranění zatížení, které ji způsobilo.

3.19 Tlakovací odpařovač

Výměník tepla, který odpařuje kapalný oxid uhličitý ze zásobníku a vrací jej do zásobníku jako plyn pro zvýšení nebo udržení tlaku v nádobě.

3.20 Kvalifikovaný technik pro oxid uhličitý

Osoba, která díky vzdělání, proškolení a zkušeností zná vlastnosti oxidu uhličitého; je obeznámena se zařízením používaným ke skladování, přenosu a používání oxidu uhličitého, a zná předběžná opatření nezbytná pro bezpečné používání zařízení s oxidem uhličitým.

3.21 Opětovné natlakování

Proces obnovy tlaku v zásobníku na jeho konstrukční parametry, pokud ztratil tlak a má nižší teplotu než MDMT.

3.22 Sublimace

Proces změny z pevné fáze přímo do plynné fáze, aniž by prošla přes kapalnou fázi.

3.23 Houževnatost

Schopnost kovu absorbovat energii a podstoupit plastickou deformaci před zlomením.

3.24 Trojný bod

Teplota a tlak, při kterých materiál existuje současně pevný, kapalný i plynný.

POZNÁMKA: Pro oxid uhličitý je trojný bod: -56,6 °C (-69,9 °F) a 416 kPa (6 0,4 psia).²

3.25 Pevnost v tahu

Maximální úroveň zatížení, kterou materiál vydrží, aniž by došlo k lomu.

3.26 Překročený stav

Jakýkoli stav mimo běžné konstrukční parametry.

3.27 Odpařování

Proces, kterým se kapalný oxid uhličitý přeměňuje na plyn.

4 Základ

² kPa bude indikovat přetlak proti atmosférickému tlaku, tzv. relativní tlak, pokud nebylo jinak doplněno, jako (kPa, abs) pro absolutní tlak nebo (kPa, diferenční) pro diferenční tlak. Všechny hodnoty kPa jsou zaokrouhlené podle CGA P-11, Návod pro metrickou praxi pro průmysl stlačeného plynu [2].

Základem této publikace jsou provedené aktuální zkoušky pod záštitou asociace CGA, která sponzorovala rozšířené zkoušky na skladovacím zásobníku oxidu uhličitého o objemu 50 tun v letech 1992 a 1993. Účelem zkoušek bylo získat údaje o tlaku, teplotě a rychlosti průtoku, aby CGA mohla vyhodnotit případné pracovní postupy, které by se mohly použít pro vrácení zásobníku oxidu uhličitého zbaveného tlaku do běžného provozu. Průmysl oxidu uhličitého využíval mnoho různých pracovních postupů a účelem zkoušek bylo vyhodnotit jejich bezpečnost.

CGA poskytuje tyto pracovní postupy a doporučení jako své nejlepší dostupné znalosti o oxidu uhličitém a jeho bezpečném používání. Pro každý zásobník v provozu nelze jednoduše použít stejný pracovní postup pro proces opětovného natlakování, musí se vždy vyhodnotit konkrétní podmínky případu.

5 Varování

Je rozhodující, aby si osoby, které se pokoušejí vrátit zásobník oxidu uhličitého z překročeného stavu (nízký tlak), uvědomily související nebezpečí, metalurgické vlastnosti, množství kapaliny v zásobníku před překročením stavu a fyzikální podmínky stanoviště pro volbu nejbezpečnějšího pracovního postupu pro tyto okolnosti.

Zásobník oxidu uhličitého, který se ochladil pod minimální konstrukční teplotu kovu (MDMT), by měl znovu natlakovat kvalifikovaný technik na oxid uhličitý. Je nezbytné mít znalosti metalurgie zásobníku a vlastností oxidu uhličitého. Potenciál pro katastrofickou poruchu zásobníku zbaveného tlaku, který se znovu tlakuje, je mnohem větší než za normálního stavu, pokud s ním není řádně zacházeno.

6 Vlastnosti oxidu uhličitého

Oxid uhličitý je sloučenina uhlíku a kyslíku v poměru podle hmotnosti 27,3 % uhlíku k 72,7 % kyslíku. Oxid uhličitý plyn při normálních atmosférických teplotách a tlacích, je bezbarvý, bez zápachu a je asi 1,5 krát těžší než vzduch. Jedná se o mírně kyselý plyn, který může mít štiplavou chuť a slabě dráždivý zápach. Fyzikální konstanty oxidu uhličitého jsou uvedeny v tabulce 1.

Oxid uhličitý plyn je poměrně nereaktivní a netoxický. Nehoří a nepodporuje hoření ani život. Při rozpuštění ve vodě se vytvoří kyselina uhličitá (H_2CO_3). Hodnota pH nasycené kyseliny uhličitě se mění od 3,7 při atmosférickém tlaku do 3,2 při 2440 kPa (354 psig).

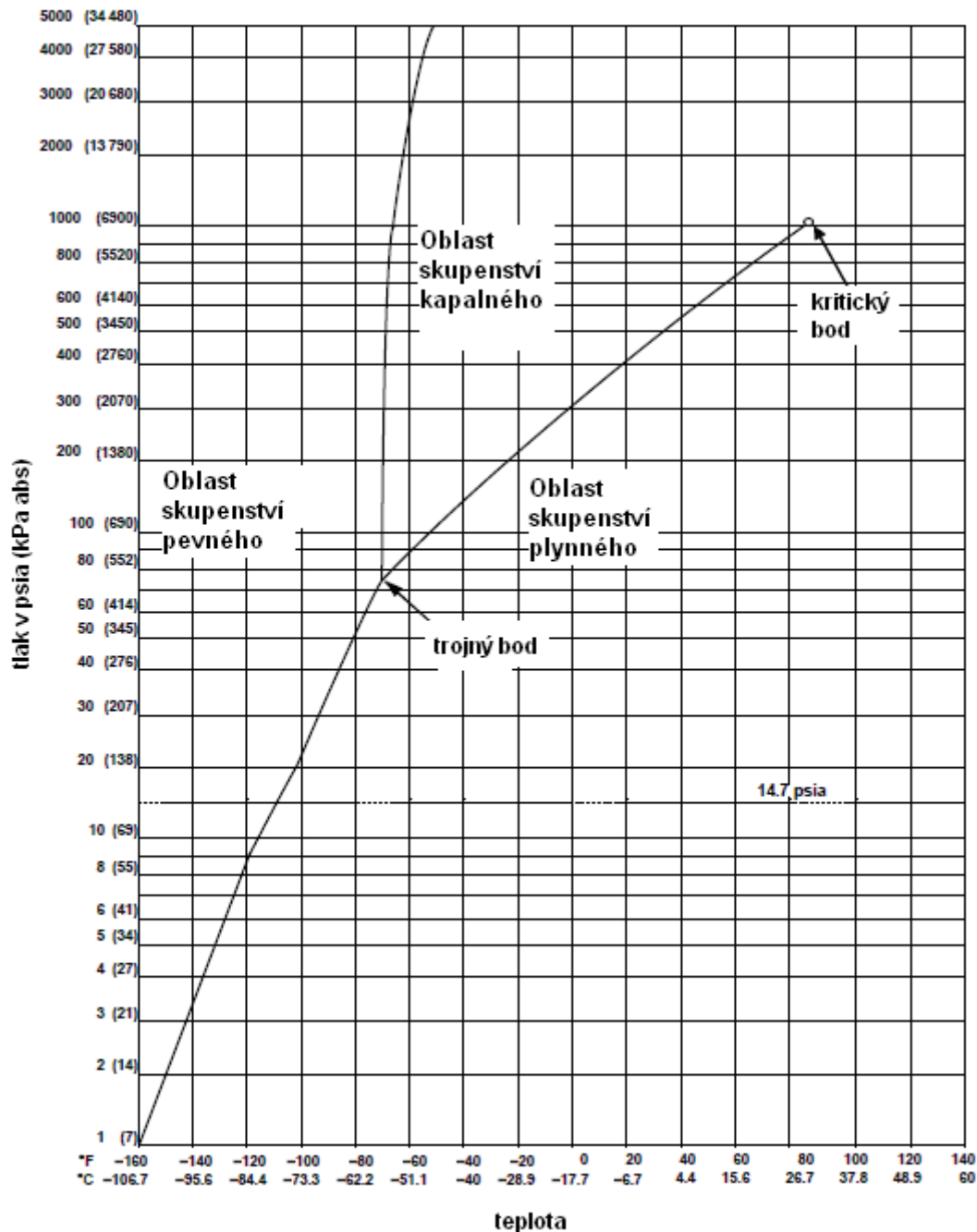
Oxid uhličitý může existovat současně jako pevný, kapalný a plynný při teplotě $-56,6\text{ }^\circ\text{C}$ ($-69,9\text{ }^\circ\text{F}$) a tlaku 60,4 psig (416 kPa), což je jeho trojný bod. Na obrázku 1 je uveden trojný bod a celá rovnovážná křivka pro oxid uhličitý.

Při teplotách a tlacích nižších než trojný bod může být oxid uhličitý buď pevný (suchý led) nebo plynný v závislosti na podmínkách. Pevný oxid uhličitý se při teplotě $-78,5\text{ }^\circ\text{C}$ ($-109,3\text{ }^\circ\text{F}$) a atmosférickém tlaku přeměňuje přímo na plyn (sublimuje), aniž by prošel kapalnou fází. Pokud pevný oxid uhličitý sublimuje při tlacích nižších než atmosférickém, je výsledkem snižování teploty.

Při teplotách a tlacích vyšších než trojný bod a nižších než $31,1\text{ }^\circ\text{C}$ ($87,9\text{ }^\circ\text{F}$) může kapalný oxid uhličitý existovat v rovnováze v uzavřené nádobě. V tomto teplotním rozsahu v uzavřené nádobě je kapalný a plynný oxid uhličitý držen v rovnováze vytvořeným tlakem a pevným vztahem k teplotě. Oxid uhličitý nemůže existovat v kapalném skupenství nad kritickou teplotou $31,1\text{ }^\circ\text{C}$ ($87,9\text{ }^\circ\text{F}$), a to nezávisle na tlaku.

Tabulka 1 – Fyzikální konstanty oxidu uhličitého

	Jednotky US	Jednotky SI
Chemický vzorec	CO ₂	CO ₂
Molární hmotnost	97,025lb/kmol	44,01 kg/ kmol
Tlak plynu CO ₂ při 70 °F (21,1 °C) při 32 °F (0 °C) při 2 °F (-16,7 °C) při -20 °F (-28,9 °C) při -69,9 °F (-56,6 °C) při -109,3 °F (-78,5 °C)	838 psig 491 psig 302 psig 200 psig 60,4 psig 0 psig	5778 kPa 3385 kPa 2082 kPa 1379 kPa 416 kPa 0 kPa
Hustota plynu při 70 °F (21,1 °C) a 1 atm při 32 °F (0 °C) a 1 atm	0,1144 lb/ft ³ 0,1234 lb/ft ³	1,833 kg/m ³ 1,977 kg/m ³
Specifická měrná hmotnost plynu při 70 °F (21,1 °C) a 1 atm (vzduch = 1) při 32 °F (0 °C) a 1 atm (vzduch = 1)	1,522 1,524	1,522 1,524
Specifický objem plynu při 70 °F (21,1 °C) a 1 atm při 32 °F (0 °C) a 1 atm	8,741 ft ³ /lb 8,104 ft ³ /lb	0,5457 m ³ /kg 0,5059 m ³ /kg
Hustota kapaliny, saturované při 70 °F (21,1 °C) při 32 °F (0 °C) při 2 °F (-16,7 °C) při -20 °F (-28,9 °C) při -69,9 °F (-56,6 °C)	47,6 lb/ft ³ 58,0 lb/ft ³ 63,3 lb/ft ³ 66,8 lb/ft ³ 73,5 lb/ft ³	762 kg/m ³ 929 kg/m ³ 1014 kg/m ³ 1070 kg/m ³ 1177 kg/m ³
Sublimační teplota (1 atm)	-109,3 °F	-78,5 °C
Kritická teplota	87,9 °F	31,1 °C
Kritický tlak	1070,6 psia	7381,8 kPa, abs
Kritická hustota	29,2 lb/ft ³	468 kg/m ³
Trojný bod	-69,9 °F při 75,1 psia	-56,6 °C při 518 kPa, abs
Skupenské teplo odpařování při 32 °F (0 °C) při 2 °F (-16,7 °C) při -20 °F (-28,9 °C)	100,8 Btu/lb 119,0 Btu/lb 129,6 Btu/lb	234,5 kJ/kg 276,8 kJ/kg 301,4 kJ/kg
Skupenské teplo fúze při -69,9 °F (-56,6 °C)	85,6 Btu/lb	199 kJ/kg
Hmotnost kapaliny při 2 °F (-16,7 °C)	8,46 lb/gal	1014 kg/m ³
Skupenské teplo sublimace při -109,3°F (-78,5 °C)	245,5 Btu/lb	571,0 kJ/kg



Obrázek 1 – Fázový diagram oxidu uhličitého

7 Teplota a tlak

Teplota kapalného oxidu uhličitého a jeho zásobníku se snižuje, jak se snižuje tlak kvůli automatickému ochlazení. Teplota a fáze obsahu zásobníku během snížení tlaku mohou být přesně stanoveny pomocí známého tlaku a fázového diagramu zobrazeného na Obrázku 1. K přeměně z kapaliny na suchý led začne docházet při tlaku 416 kPa (60,4 psig) s odpovídající teplotou $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-69,9\text{ }^{\circ}\text{F}$). To je trojný bod, kdy plynný, kapalný a pevný oxid uhličitý jsou v rovnováze. Jak plyn pokračuje v odvětrávání, energie se odebírá z kapaliny za vytváření plynu a pevného oxidu uhličitého požadovaného pro udržení rovnováhy. Takto se přeměně více kapaliny na pevnou látku. Tento proces pokračuje tak dlouho, tj. odvětrávání při udržení stále stejné teploty a tlaku, dokud v systému nezůstane pouze plyn a suchý led. Pokračující odvětrávání pod trojným bodem pak způsobí, že tlak a teplota pokračují ve snižování, dokud nebude při tlaku 0 kPa (0 psig) dosažena teplota $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-109,3\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Ztráty tlaku zásobníku mohou být způsobeny takovými věcmi, jako jsou otevření pojistného ventilu a chyba při jeho opětovném uzavření, rychlé odebrání velkých objemů plynného oxidu uhličitého nebo porucha tlakovacího odpařovače.

Obsluha zásobníku oxidu uhličitého musí porozumět tomu, že vztah rovnováhy tlak/teplota nemusí platit, pokud je zásobník znovu natlakován pro návrat do běžného provozu. Je klidně možné, že zásobník má poté tlak 2070 kPa (300 psig) a v zásobníku je kapalina a suchý led při teplotě $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-69,9\text{ }^{\circ}\text{F}$), protože systém není v rovnováze. Teplota kapaliny se sice časem bude zvyšovat a tlak plynu se bude snižovat, dokud se celý systém nestabilizuje. Toto ale může trvat dny nebo týdny.

Skladovací zásobníky oxidu uhličitého jsou obvykle navrženy a zkonstruovány podle předpisu ASME Code, který je uznávanou normou pro konstrukci tlakových nádob ve Spojených Státech a Kanadě [1]. ASME Code poskytuje koeficient bezpečnosti 3,5, což znamená, že při svém maximálním provozním tlaku je materiál namáhaný pouze na 28,6 % své konečné pevnosti v tahu. Zásobníky oxidu uhličitého jsou obvykle vyrobeny použitím nízkolegovaných uhlíkových ocelí.

Nízkolegované uhlíkové oceli při konstrukčních provozních podmínkách jsou jak odolné (mají vysokou pevnost v tahu) tak houževnaté. Tyto materiály zůstávají odolné, ale jak se ochlazují, budou méně houževnaté. Snížením provozní teploty může zásobník dosáhnout své teploty nulové tažnosti (NDTT). To znamená, že materiál, který je obvykle považovaný za houževnatý, se stane křehkým při teplotách nižších než NDTT. Tento stav je plně vratný, pokud se teplota zvýší nad NDTT. Jak se teplota snižuje, materiál zásobníku se také smršťuje a tím se může vytvořit lokální pnutí. Houževnaté materiály se mohou přizpůsobit lokálnímu pnutí mírnou deformací. Materiál se v této oblasti natáhne, ale nepraská. Křehké materiály nejsou schopné se při nízkých teplotách lokálně natáhnout a mohou katastrofálně selhat. Pokud trhлина nebo závada materiálu dosáhnou kritické velikosti v natlakovaném křehkém zásobníku, je zde velká pravděpodobnost destrukce celého zásobníku podobná roztříštění sklenice. Tvárné materiály sice mohou také selhat, ale zpravidla ne katastrofálně, protože materiál má tendenci se táhnout, eventuálně prasknout a prosakovat, ale nikoliv se rozpadnout.

Oxid uhličitý se skladuje v izolovaných zásobnících jako zkapalněný stlačený plyn. Běžný rozsah provozních tlaků zásobníku je v rozsahu od 1380 kPa do 2070 kPa (200 psig až 300 psig), což odpovídá rovnovážné teplotě $-28,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-20\text{ }^{\circ}\text{F}$) a $-16,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($3\text{ }^{\circ}\text{F}$) v shodném pořadí.

V Severní Americe je většina zásobníků v chlazeném provozu s oxidem uhličitým vyrobena použitím nízkolegovaných uhlíkových ocelí jako jsou SA-212, SA-515, SA-516 a SA-612. Zásobníky vyrobené před rokem 1990 obvykle měly hodnotu MDMT $-28,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-20\text{ }^{\circ}\text{F}$). Pokud je stěna zásobníku při provozní teplotě studenější než MDMT, nachází se mimo svůj provozní stav.

8 Fyziologie a toxikologie oxidu uhličitého

8.1 Všeobecné údaje

Fyziologie a toxikologie oxidu uhličitého jsou jedinečné, protože oxid uhličitý je produktem běžného metabolismu. Je to požadavek běžného chemického prostředí těla a aktivní nosná látka ve spojení s dýcháním, oběhem a vaskulární reakcí na požadavky metabolismu jak při odpočinku, tak při cvičení (aktivitě).

Dýchací systém udržuje tlak oxidu uhličitého při poměrně vysoké úrovni tlaku cca 50 mm Hg v arteriální krvi a tkáňových tekutinách. To udržuje kyselost tkáně a buněčných tekutinách na vhodné úrovni pro nezbytné metabolické reakce a funkce membrán. Změny v obvyklém tkáňovém tlaku oxidu uhličitého mohou být škodlivé. Pokud tlak v tkáni bude nadměrně nízký, k čemuž může dojít od zrychleného dýchání, může dojít ke kritické poruše neuromuskulární funkce nebo ztrátě vědomí.

Nadýchání se oxidu uhličitého produkuje stejné fyziologické účinky jako metabolicky vytvořený oxid uhličitý. Jak se v tkáni tlak oxidu uhličitého zvýší od nadýchání oxidu uhličitého, tělo reaguje pomocí respiračních a adaptivních procesů, aby se přizpůsobilo této změně. Tyto adaptivní procesy jsou omezené a nemůžou zvládnout vážné vystavení se vlivu, které způsobí změnu pH tělesných tekutin.

Toxické účinky oxidu uhličitého, zejména vážná a ničivá acidóza, se objeví, jakmile dojde k nadýchání vysokých koncentrací oxidu uhličitého.

Krev a buněčné tekutiny jsou aktuálně roztoky kyselého uhličitanu sodného obsahující mnoho dalších látek. Vážné vystavení se vlivu oxidu uhličitého vytváří kyselinu uhličitou v krvi, pro což kyselý uhličitan sodný není příliš účinný tlumivý roztok. Snížení hodnoty pH má rychlý toxický účinek, protože nervový řídicí systém je nadměrně buzený. Je důležité si uvědomit, že tyto účinky nejsou závislé na množství kyslíku obsaženého v ovzduší které dýcháme.

Účinky vytvořené nízkými a středními koncentracemi oxidu uhličitého jsou fyziologické a vratné, ale účinky vysokých koncentrací jsou toxické a škodlivé [3].

8.2 Fyziologické účinky oxidu uhličitého

Reakce na nadýchání oxidu uhličitého závisí na stupni a době trvání vystavení se vlivu působení a značně se vzájemně liší dokonce i u běžně zdravých jedinců. Lékařský termín pro fyziologické účinky nahromadění oxidu uhličitého v krvi je hyperkapnie. Oxid uhličitý může být toxický dokonce, i když jsou přítomny běžné úrovně kyslíku v dýchaném ovzduší. Např. nízké koncentrace vdechnutého oxidu uhličitého se mohou tolerovat po značně velkou dobu bez patrného účinku nebo mohou vyvolat mírně neobvyklé pocity nedostatku dechu. Trvalé vystavení vlivu 5 % oxidu uhličitého vytváří stresující zrychlené dýchání. Pokud úroveň vdechnutého oxidu uhličitého překročí 7 %, rychlé dýchání se stane obtížným (dušnost) a objeví se nervozita, mdloby, prudká bolest hlavy a otupující se vědomí. Při 15 % dojde k bezvědomí doprovázenému strnulostí a třesem do méně než 1 minuty a při 20 % až 30 % dojde k bezvědomí a křečím do 30-ti sekund. Tyto účinky se objeví rychle, protože oxid uhličitý se rozšíří v tkáňových tekutinách rychlostí přibližně 20 krát rychlejší než kyslík. Vysoké koncentrace oxidu uhličitého mohou bez varování rychle zadusit bez možnosti vlastní záchrany, a to bez ohledu na koncentraci kyslíku v dýchaném vzduchu.

8.3 Fyzické účinky nadměrného vystavení vlivu oxidu uhličitého

Kontakt pevného oxidu uhličitého (suchého ledu) s kůží, ústy nebo očima může způsobit vážné popáleniny, kožní léze, popálení rohovky nebo vážnější poranění od velkého podchlazení tkání kvůli teplotě -78,5 °C (-109,3 °F). Vypouštění kapaliny ze zásobníku vytváří velmi rychle sněhové částičky, které jsou nejen studené, ale navíc abrazivní a způsobují podobná poranění.

8.4 Zákonné předpisy

Oxid uhličitý přirozeně existuje v ovzduší při cca 350 ppm podle objemu. Úřad pro bezpečnost a zdraví při práci (OSHA) jak je uvedeno v názvu nařízení 29 *Zákoníku federálních nařízení US* (U.S.Code of Federal Regulations (29 CFR)), část 1910.1000, uvádí osmihodinový časově vážený průměr – přípustný expoziční limit TWA-PEL 5000 ppm (9000 mg/m³) [4]. TWA-PEL je expoziční limit, který nesmí být překročen 8-hodinovým časově váženým průměrem za kteroukoliv 8-mi hodinovou pracovní směnu v 40-ti hodinovém pracovním týdnu.

Americká společnost sdružující osoby činné v bezpečnosti a ochraně zdraví v průmyslu (ACGIH) doporučuje, aby byla Nejvyšší dovolená koncentrace – časově vážený průměr (TLV[®]-TWA) 5000 ppm [0,5 %] (9000 mg/m³). TLV-TWA je koncentrace v časově váženém průměru pro běžný 8-hodinový pracovní den na 40-ti hodinový týden, jemuž mohou být zaměstnanci opakovaně vystavováni, každý den bez nepříznivého účinku [5].

ACGIH také doporučuje, aby byla Nejvyšší dovolená koncentrace – Krátkodobá mez expozice (TLV[®]-STEL) 30 000 ppm [3 %] (54 000 mg/m³) [5]. TLV-STEL je expozice TWA 15 minut, které nesmí být nikdy překročeny během pracovního dne, i při pracovní době 8 hodin je TWA v rámci TLV-TWA. Vystavení vlivu nad TLV-TWA až do STEL by nemělo být delší než 15 minut a nemělo by k němu dojít více než 4krát denně. Mezi následujícími expozicemi by mělo být nejméně 60 minut v tomto rozsahu [5]. V Kanadě jsou podobné mezní hodnoty nařízené regionální legislativou.

8.5 Bezpečnostní opatření

Na vstupy do omezených prostor, kde se mohou vysoké koncentrace oxidu uhličitého nahromadit, by mělo být umístěno varování. Typické varování je uvedeno níže:

UPOZORNĚNÍ – PLYNNÝ OXID UHLIČITÝ

Před vstupem do prostoru vyvětrejte. V tomto prostoru může dojít k vysokým koncentracím plynného oxidu uhličitého a může dojít k zadušení.

Před vstupem do jakéhokoli omezeného prostoru nebo nízko položené oblasti, kde se může nahromadit plynný oxid uhličitý, by se mělo provádět monitorování oxidu uhličitého. Oxid uhličitý se musí odstranit větráním na koncentraci pod 3 % (viz 8.4) nebo je nutné mít na sobě respirátor zásobovaný vzduchem před vstupem do uzavřeného prostoru nebo nízko položené oblasti (viz EIGA Kampaň proti zadušení a související dokumenty) [6].

8.6 Záchrana a první pomoc

Nepokoušejte se odtáhnout osobu vystavenou vlivu vysokých koncentrací oxidu uhličitého bez použití záchranného vybavení nebo se můžete stát také obětí. Záchranáři uvádějí více než 60 % smrtelných případů v omezených prostorech. Pokud je zasažená osoba v bezvědomí, zajistěte si asistenci a použijte zavedené pracovní postupy pro případ nouze.

Pokud se osoba nadýchala většího množství oxidu uhličitého s projevy nepříznivých účinků, okamžitě přesuňte osobu vystavenou vlivu na čerstvý vzduch. Pokud přestala dýchat, proveďte umělé dýchání. Kyslík mohou podat pouze kvalifikovaní zaměstnanci. Zasaženou osobu udržujte v teple a klidu. Co nejdříve přivolejte lékařskou pomoc. Pro všechny případy nadměrného vystavení vlivu plynného oxidu uhličitého je vhodný čerstvý vzduch a asistované dýchání. Při okamžité reakci na nehodu s oxidem uhličitým je obvykle zotavení úplné a bez komplikací.

Pokud suchý led nebo stlačený plynný oxid uhličitý přijdou do kontaktu s kůží nebo ústy, okamžitě zastavte působení. Pokud dojde k omrzlinám, přivolejte lékaře. Postiženou oblast netřete. Ponořte ji do teplé vody o teplotě 37,8 °C až 40,6 °C (100 °F až 105 °F).

9 Zvláštní nebezpečí

9.1 Všeobecně

Zaměstnanci, kteří manipulují s kapalným oxidem uhličitým, by měly být plně obeznámeni se souvisejícími nebezpečími. Existuje několik případů, kde může dojít k extrémnímu nebezpečí pro zaměstnance a zařízení. Následuje popis těchto stavů a pracovní postupy a návody, jak nebezpečným stavům zabránit.

9.2 Zablokování suchým ledem nebo ucpání

Uvnitř hadice a potrubí se mohou vytvořit ucpávky ze suchého ledu, jakmile se kapalným oxidem uhličitým dostane pod tlak jeho trojnásobku 416 kPa (60,4 psig). Suchý led se může utužit do ucpávky, která může uvěznit plyn. Tlak za nebo v rámci ucpávky se může zvýšit, jak suchý led sublimuje, dokud ucpávka není silou tlaku vystřelena nebo hadice či potrubí nepraskne. Ucpávka ze suchého ledu může být vymrštěna z otevřeného konce hadice nebo potrubí dostatečnou silou a může vážně poranit zaměstnance jak samotným úderem ucpávky ze suchého ledu tak náhlým pohybem hadice nebo potrubí v reakci na náhlé uvolnění ucpávky.

Kapalný oxid uhličitý musí být vytlačen z hadice nebo potrubí před snížením tlaku pod 416 kPa (60,4 psig). To se provede dodáním plynného oxidu uhličitého na jeden konec hadice nebo potrubního systému pro udržení tlaku nad trojným bodem, zatímco se zbývající kapalina odstraňuje druhým koncem.

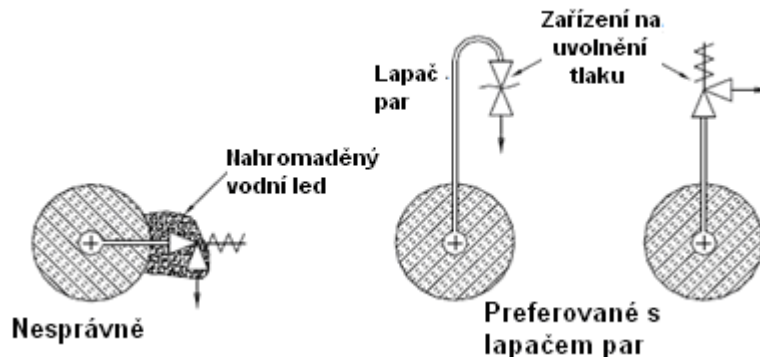
9.3 Vliv nízké teploty na materiály

Dalším nebezpečím je vliv nízké teploty suchého ledu (-78,5 °C [-109,3 °F]) na materiály v systému. Při teplotách suchého ledu mnoho materiálů používaných na hadice a v potrubních systémech zkřehne a pokud jsou silně namáhané, tak selžou. Materiály používané při konstrukci přenosových systémů oxidu uhličitého včetně hadic by měly být slučitelné s kapalným oxidem uhličitým a podmínkami teploty a tlaku.

9.4 Zachycená kapalina

Kapalný oxid uhličitý, který je přinucen vyplnit pevný objem (tj. mezi dvěma uzavřenými ventily), zvyšuje svůj tlak, jak se ohřívá a rozpíná. Pevný objem kapalného oxidu uhličitého při tlaku 2000 kPa a teplotě -17,8 °C (290 psig a 0 °F), jakmile je zahřátý na -12,2 °C (10 °F), vyvolá zvýšení tlaku na 2000 psig (13 790 kPa). Jak teplota pokračuje ve zvyšování, tlak zachycené kapaliny by mohl překročit hodnotu, kterou mohou potrubí a hadice vydržet. To může způsobit prasknutí hadice nebo potrubí s možným následným zraněním a poškozením majetku.

Celé potrubí oxidu uhličitého musí být vybaveno zařízením na uvolnění tlaku umístěným ve všech částech systému, kde může zůstat kapalina (mezi ventily, zpětnými ventily, čerpadly atd.). Zařízení na uvolnění tlaku by se mělo nainstalovat na stoupací trubku prodlouženou od studeného potrubí kapaliny pro vytvoření vymrazovací dráhy a zamezení nahromadění ledu uvnitř zařízení na uvolnění tlaku a umožnit tak vypustit jakoukoli kondenzaci (viz Obrázek 2).



Obrázek 2 – Příklady nesprávné a preferované instalace zařízení na uvolnění tlaku (bezpečnostní přetlakový ventil) na potrubí kapalného oxidu uhličitého

9.5 Nadměrné vystavení se vlivu u zaměstnanců

Když se používá oxid uhličitý v uzavřených prostorách, je nutné vhodně větrat oblast, aby se udrželo bezpečné pracovní prostředí pro zaměstnance. Oxid uhličitý je v plynném stavu bezbarvý a bez chuti a nedá se snadno zjistit. Plynný oxid uhličitý je 1,5 krát hustější než vzduch a proto jej lze najít ve vyšších koncentracích ve stísněných nebo nízko položených prostorech. Větrací systémy by měly být konstruovány tak, aby odčerpávaly z nejnižší úrovně a nechaly přicházející vzduch vstupovat do výše položeného místa. Nespoléhejte na samotné měření obsahu kyslíku ve vzduchu, protože zvýšená úroveň oxidu uhličitého může být toxická, i když je dostatečné množství kyslíku na podporu života. Podrobné informace viz kapitola 8.

10 Rizika opětovného natlakování zásobníku oxidu uhličitého

10.1 Rizika

Snížení tlaku zásobníku a následné samoochlazování, ke kterému dojde, nebudou mít pravděpodobně za následek křehký lom jinak zdravého zásobníku. Vyšší pnutí v zásobníku jsou způsobena interním tlakem užitého produktu. Jak se tlak a teplota snižují, také se snižují tlakem vyvolaná pnutí.

Tabulka 2 popisuje vztah pnutí stěny zásobníku a interního tlaku jak pro zásobník oxidu uhličitého ASME tak EN. Zásobník ASME je zkonstruován z SA 516-70N majícího pevnost v tahu 483 MPa (70 000 psi) s MAWP 23,8 bar (350 psig). ASME Code vyžaduje součinitel bezpečnosti 3,5; proto je maximální povolené pnutí při MAWP $70\,000/3,5 = 20\,000$ psi. Příklad pro EN je zkonstruován z materiálu majícího zaručenou mez průtažnosti 355 MPa (51 500 psi). EN 13458 *Cryogenic vessels—Part 2: Static vacuum insulated vessels: Design, fabrication, inspection and Testing* (Kryogenické nádoby – Část 2: Stabilní vakuově izolované nádoby: Konstrukce, výroba, kontrola a zkoušení), používá součinitel bezpečnosti 2,5; proto maximální povolené pnutí při MAWP 22 bar (319 psig) je 225,6 MPa [7].

Vyhodnocení rizika tlakové nádoby musí provádět kvalifikovaný technik pro oxid uhličitý před zvolením způsobu opětovného natlakování zásobníku. Vyhodnocení musí obsahovat následující: předpis pro konstrukci zásobníku, tažnost konstrukčních materiálů a pnutí stěny. Uživatelé s nádobami jinými než zkonstruovanými podle ASME musí provádět porovnatelné vyhodnocení pro zajištění bezpečného opětovného natlakování. Viz Dodatek A jako příklad vyhodnocení pro nádoby zkonstruované podle EN.

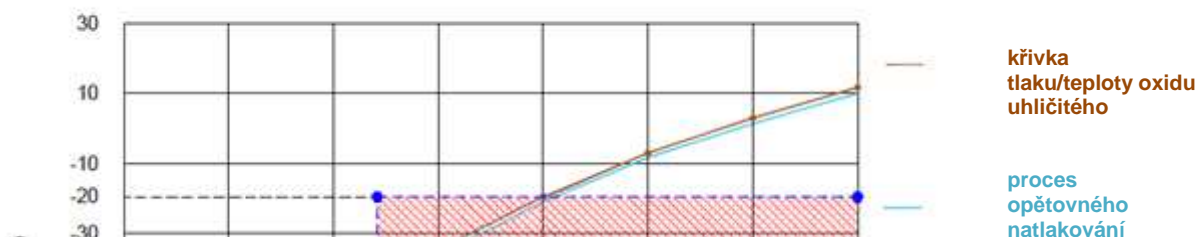
Tabulka 2 – Vztah tlaku/pnutí stěny zásobníku oxidu uhličitého

Interní tlak			Rovnovážná teplota oxidu uhličitého		Pnutí stěny v zásobníku kvůli internímu tlaku		
psig	kPa	Bar	F	C	ASME ¹⁾		EN ²⁾
					psi	MPa	MPa
350	2413	<u>24,1</u>	13	-11	20 000	138	-----
<u>319</u>	<u>2199</u>	<u>22</u>	<u>5</u>	<u>-15</u>	<u>18 250</u>	<u>125,8</u>	<u>225,6</u>
300	2069	<u>20,7</u>	3	-16	17 143	118	<u>212,2</u>
250	1724	<u>17,2</u>	-8	-22	14 286	98,4	<u>176,8</u>
200	1379	<u>13,8</u>	-20	-29	11 429	78,8	<u>141,4</u>
150	1034	<u>10,3</u>	-35	-37	8571	59,1	<u>106,1</u>
100	690	<u>6,9</u>	-53	-47	5714	39,4	<u>71,8</u>
60	414	<u>4,1</u>	-69	-56	3429	23,6	<u>56,1</u>
0	0	<u>0</u>	-110	-78,9	0	0	<u>0</u>

¹⁾ Při nižších rovnovážných teplotách/tlaciích a pomocí pravidel ASME Code a značení UCS 66,1, může být zobrazeno, že přípustné snížení v MDMT je studenější než rovnovážná teplota při snížených tlacích [1]. Viz Obrázky 3 a 4 jako příklady typických zásobníků kapalného oxidu uhličitého, které vykazují přípustnou teplotu jako funkci sníženého tlaku.

²⁾ Další informace o EN-zkonstruovaných nádobách viz Obrázek A-1.

Hrubozrnné nízkolegované oceli - MDMT -20 °F

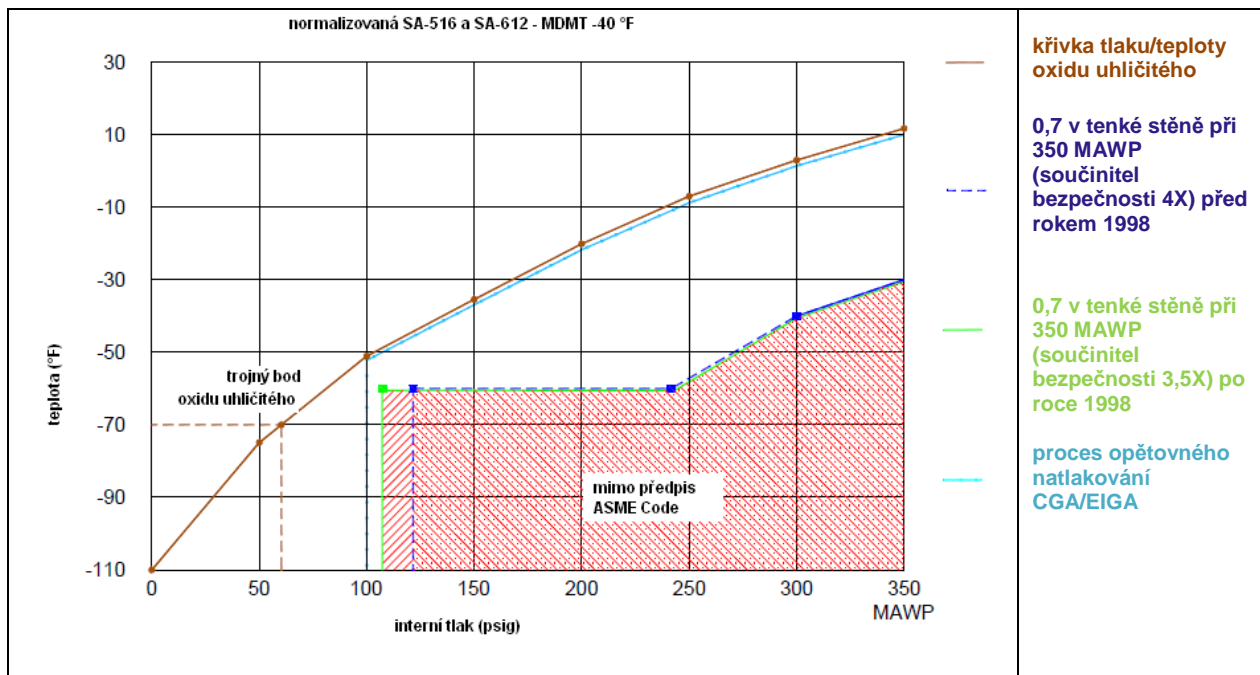


CGA/EIGA

0,7 v tenké stěně
při 350 MAWP
(součinitel
bezpečnosti 4X)

POZNÁMKA: Hrubozrnné nízkolegované oceli používané pro zásobníky oxidu uhličitého včetně SA-212, SA-515, SA-516 (jako válcované) a SA-612 (jako válcované).

Obrázek 3 – Povolené tlaky-teploty u ASME zásobníku kapalného oxidu uhličitého (bezpečnostní součinitel před rokem 1976 4X)



Obrázek 4 – Povolené tlaky-teploty u ASME zásobníku kapalného oxidu uhličitého (bezpečnostní součinitel před rokem 1998 4X, po roce 1998 3,5X)

10.2 Varování

Při umělém zvyšování tlaku v zásobníku, který je znovu odtlakován a automaticky ochlazen pod NDTT materiálu zásobníku, může dojít k vytvoření nebezpečných podmínek. Pro zásobník oxidu uhličitého při nižším tlaku než 416 kPa (60,4 psig) se předpokládá teplota nižší než -56,6 °C (-69,9 °F) a předpokládá se, že je zásobník v křehkém stavu a neměl by se přesunovat nebo být vystaven mechanickým nárazům.

Většina zásobníků oxidu uhličitého vyrobených před rokem 1976 v Severní Americe používala hrubozrnné nízkolegované oceli, které mají slabou nízkou teplotní charakteristiku (viz Obrázek 3). Tyto zásobníky zůstávají v provozu a vyžadují speciální péči při provádění opětovného natlakování. Je třeba vzít v úvahu instalace regulačních zpětných ventilů na ochranu proti nadměrnému uvolnění tlaku plynu, což je běžná příčina snížení tlaku. CGA doporučuje, aby se životnost těchto nádob neprodložovala prohlídkou a údržbou (viz CGA PS-5, *CGA Specifikace umístění o vhodnosti zásobníků z uhlíkové oceli pro stacionární skladování oxidu uhličitého*) [8].

Tyto zásobníky byly vyrobeny pomocí nízkolegovaných ocelí SA-212 nebo SA-515 s MAWP 2410 kPa až 2500 kPa (350 psig až 363 psig) podle předpisu ASME Code, což umožňuje MDMT -29 °C (20 °F) bez provedení rázové zkoušky. Předpis ASME Code byl přezkoumán v roce 1987, aby odrazil fakt, že nízkolegované oceli neměly vhodnou tažnost při teplotách nižších než -12 °C (10 °F). Tyto byly a stále jsou v rámci předpisu ASME Code určeny pro provoz při nízkých teplotách jako -29 °C (-20 °F), dokonce i když by byly stěny zásobníku v křehkém stavu.

Obrázek 3 zobrazuje, kde křivka rovnováhy tlaku/teploty pro oxid uhličitý prochází oblastí mimo předpis ASME při rovnovážných teplotách mezi -29 °C a -42 °C (-20 °F a -44 °F) a odpovídajících rovnovážných tlacích 1380 kPa až 830 kPa (200 psig a 120 psig).

Nicméně proces opětovného natlakování uvedený v Pracovních postupech 4 a 5 je přijatelný z následujících důvodů:

- Součinitel bezpečnosti tlakové nádoby těchto zásobníků je 4:1 proti součiniteli bezpečnosti 3,5:1 přijatém v roce 1987, což poskytuje dodatečnou úroveň bezpečnosti.
- Úroveň pnutí ve stěně zásobníku od 120 psig do 200 psig (1380 kPa až 830 kPa) se pohybuje v rozsahu 33 % až 55 % dovoleného napětí materiálu.
- Zásobníky byly obvykle vyrobeny z desek zlomkové palcové řady v porovnání se současnou válcovanou na tloušťku desky. Tím se efektivně zvýšila tloušťka stěny zásobníku a tím zvyšování součinitele bezpečnosti daleko za minimální hodnotu 4:1 požadovanou ASME.
- Zásobníky jsou chráněny před nárazem a vnějším poškozením izolací a vnějším pláštěm, snižujícími potenciální nebezpečí zkrášení způsobeného nadměrným pnutím.
- Nedošlo k žádným známým poruchám nebo nehodám, které používaly tyto pracovní postupy opětovného natlakování.

Navíc je nutné splnit následující podmínky:

- Proces opětovného natlakování provádí kvalifikovaný technik na oxid uhličitý.
- Proces je obsluhou nepřetržitě řízen a monitorován s ohledem na neobvyklé okolnosti.
- Po dokončení procesu neplňte zásobník zprvu nad 80 % jmenovité kapacity (viz 15.3.2 b).

Nesprávné opětovné natlakování zásobníku, který je v křehkém stavu, může mít za následek katastrofickou destruktci.

Únik oxidu uhličitého může mít za následek nebezpečí zadušení ve slabě větraných prostorech. Před vstupem do takového prostoru učiňte vhodná opatření (viz Kapitola 9).

11 Předběžné pracovní postupy pro navrácení zásobníků se sníženým tlakem do provozu

Před navrácením zásobníků s pokleslým tlakem do provozu dodržujte následující předběžné pracovní postupy:

- Přerušete veškerý odběr oxidu uhličitého.
- Uzavřete všechny provozní odběrní ventily a nevracejte zásobník do provozu, dokud nemá hodnotu rovnu nebo vyšší MDMT.
- Vypněte všechny tlakovací odpařovače a nezavádějte tlak z jiného zdroje.
- Nepohybujte zásobníkem, ani nevystavujte zásobník nárazům.
- Určete, zda v zásobníku není žádná zbytková kapalina nebo suchý led.
-

11.1 Požadavky na zaměstnance

Kvalifikovaný technik na oxid uhličitý by měl určit důvod ztráty tlaku a opravit problém dříve, než dojde k procesu opětovného natlakování.

Opětovné natlakování by měl provádět kvalifikovaný technik nebo osoby obeznámené s provedením zásobníku a fyzikálními vlastnostmi oxidu uhličitého. Před prováděním opětovného natlakování by měly být ujasněny bezpečné a testované pracovní postupy.

11.2 Ustanovení pro alternativní zdroj

Vrácení zásobníku do provozu může být dlouhodobým procesem, takže možná bude nutné vytvořit opatření pro alternativní zdroj oxidu uhličitého. V závislosti na množství suchého ledu v zásobníku a velikosti zásobníku, se může pro postup opětovného natlakování požadovat značné množství oxidu uhličitého. Mělo by se provést vyhodnocení a poskytnout vhodný zdroj oxidu uhličitého pro tento pracovní postup.

11.3 Vyhodnocení zásobníku se sníženým tlakem

Před opětovným natlakováním by se měly prozkoumat zásobník a jeho potrubí, označení, údaje výrobce (U-1A), záznamy o posledním plnění, záznamy o posledním použití a události vedoucí až k opětovnému natlakování. Deska s údaji ASME může být na zásobníku na jednom z mnoha míst, jako jsou nohy, horní část nebo na obslužné lávce. Příklad formuláře vyhodnocení zásobníku se sníženým tlakem viz Obrázek 5.

Výrobce _____	Rok výroby _____	Výrobní sériové číslo _____
Inspekční org. _____	Typ materiálu _____	MAWP _____
Min. konstrukční teplota kovu _____ °F	při _____ psi	Zkouška rázem _____
ASME Code _____	Kapacita (objem) _____	Tlak v zásobníku _____
Hladina kapaliny _____	Externí vzhled _____	
Externí vzhled potrubí (př. námraza/vodní led nebo okolní teplota) _____		
Znaky úniku nebo prosakování produktu _____		
Poslední známá hladina kapaliny _____	Datum _____	Čas _____
Poslední známý tlak _____	Datum _____	Čas _____
Znamé použití od poslední známé hladiny obsahu _____		
Odhadovaný odběr produktu od poslední známé hladiny obsahu _____		

Obrázek 5 – Formulář vyhodnocení zásobníku se sníženým tlakem

11.4 Fakta ke zvážení při vyhodnocování postupů opětovného natlakování

Přibližně 50 % oxidu uhličitého v zásobníku se ztratí během kompletní ztráty tlaku.

Pro opětovné zkapalnění a ohřátí 0,45 kg (1 lb) suchého ledu na cca 1030 kPa (150 psig) saturované kapaliny se vyžaduje 4,1 až 4,5 kg 1720 kPa (9 až 10 lb 250 psig) saturované kapaliny.

Přibližně 1 lb 0 °F (0,45 kg, -17,8 °C) plynného oxidu uhličitého se vyžaduje pro vrácení 0,45 kg (1 lb) suchého ledu na ca 1030 kPa (150 psig) saturované kapaliny. Trochu suchého ledu v zásobníku se rozpustí a přemění na kapalinu. Hladina kapaliny se zvyšuje, dokud zbytkový suchý led nebude zcela ponořený v kapalině. Od tohoto bodu se tlak zásobníku zvyšuje, protože se snižuje přenos tepla způsobený tím, že plynný CO₂ již není dále v přímém kontaktu se suchým ledem. Další nepřetržité přidávání plynu nad trojným bodem systému může tedy vést k vytvoření nebezpečných tlaků v zásobníku. Pro rozpuštění zbývající pevné látky a ohřátí kapaliny a stěn zásobníku se vyžaduje další energie.

Na měřidlo hladiny kapaliny (používající diferenční tlak nebo plovák) se nelze spoléhat od momentu, kdy byl v zásobníku snížen tlak pod jeho požadovanou konstrukční teplotu a obsahuje hustou kapalinu, sníh nebo suchý led.

Pro zásobování dostatečným množstvím plynného oxidu uhličitého pro dokončení procesu opětovného natlakování (viz tabulka 3) se může vyžadovat několik nákladních cisteren oxidu uhličitého.

Tepelný výměník, čerpadlo a zdroj energie mohou být vyžadovány pro dokončení procesu uvedeného v kapitole 13.5.

Během opětovného natlakování se suchý led při vyšších tlacích než 416 kPa (60,4 psig) ponoří do kapalného oxidu uhličitého; *proto se nemůže tlak dále používat jako indikátor teploty zásobníku.*

Tlak vyšší než vypočítaná hodnota pomocí předpisu ASME Code a značení UCS 66.1 by se neměly na nádobu použít, pokud může být materiál nádoby pravděpodobně studenější než MDMT [1].

Tabulka 3 – Typická množství oxidu uhličitého a časy potřebné pro opětovné natlakování zásobníku
(Zásobník má tlak plně snížen na tlak atmosférický)

Množství kapalného CO ₂ v zásobníku před snížením tlaku	Plynný CO ₂ vyžadovaný pro natlakování na 100 psig (690 kPa) (kap. 13.4)		Požadovaný počet plných 20 tunových nákladních cisteren s CO ₂	Doba pro opětovné zkapalnění zbývajících suchého ledu na kapalinu -20 °F (-28,8 °C) (200 psig) (1380 kPa) pomocí ohřivače 6 kW (kap. 13.4)	Množství kapalného CO ₂ v zásobníku po opětovném natlakování	Doba požadovaná pro ohřátí kapaliny -50 °F až -20 °F (-45,6°C až -29°C) (100 psig až 200 psig) (690 kPa až 1380 kPa) pomocí ohřivače 6 kW (kap. 13.5) (není přítomen žádný suchý led)
(tun)	(lb)	(kg)		(hod)	(tun)	(hodin)
6	1110	(503)	0,5	10	3,3	4,2
14	2590	(1175)	1,2	23,3	7,6	10,3
30	5550	2517)	2,5	50	16,3	22
50	9250	4196)	4,2	83,3	27,1	36,5

Rychlosti průtoku dosahující až 120 lb/min (54 kg/min) byly pozorovány u zkoušek používajících nákladní cisterny jako zdroj plynného CO₂. Pro dokončení tohoto kroku se vyžaduje cca 185 liber plynu na tunu kapalného oxidu uhličitého (92,3 kg/t), který byl v zásobníku před snížením tlaku. Pokud *plně* 20 tunové nákladní cisterny jsou zásobovacím zdrojem plynného CO₂, poté se vyžaduje 0,084 nákladní cisterny na tunu kapaliny se sníženým tlakem.

Příklad: 50 tun kapaliny se sníženým tlakem na 0 psig by vyžadovalo:

$$185 \text{ lb/t (83,9 kg/0,91 tun)} \times 50 \text{ tun (45,4 tun)} = 9250 \text{ liber plynného oxidu uhličitého (4096 kg) (sloupec 2); nebo } 0,084 \times 50 = 4,2 \text{ nákladní cisterny pro natlakování na 100 psig (690 kPa) (sloupec 3).}$$

Příklad: Zásobník, u kterého zcela klesl tlak, by měl vyžadovat cca 10 kWh/t kapaliny pro rozpuštění veškerého suchého ledu a ohřátí kapaliny na 200 psig (1380 kPa), tj. zásobník s 30 tunami kapaliny s plně sníženým tlakem se může vrátit na 200 psig (1380 kPa) pomocí ohřivače 6 kW za cca 50 hodin:

$$10 \text{ kWh/t} \times 30 \text{ tun} / 6 \text{ kW} = 50 \text{ hodin (sloupec 4).}$$

Příklad: Požadovaná energie na ohřátí kapalného oxidu uhličitého je cca 0,28 kWh/t °F. Zásobník s 10 tunami kapaliny při 131 psig (900 kPa) (-40 °F/-40 °C) vyžaduje 112 kWh pro ohřátí na 291 psig (2010 kPa).

(0 °F/-17,8 °C). (Rozdíl teploty je 40 °F):

$$0,28 \text{ kWh/t} \times (0 - [-40] \text{ °F}) \times 10 \text{ tun} = 112 \text{ kWh.}$$

12 Návod pro vyhodnocení stavu zásobníku se sníženým tlakem

Zásobník, který má nižší tlak než tlak odpovídající své MDMT, obvykle 1380 kPa (200 psig), musí být před prací (činností) vyhodnocen. Je možné, že je zásobník prázdný (bez kapaliny) nebo může obsahovat studenou kapalinu, směs studené kapaliny a suchého ledu nebo pouze suchý led. Jednou z nejběžnějších příčin klesání tlaku pod 1380 kPa (200 psig) je prázdný zásobník. Všechna kapalina se spotřebuje a v zásobníku zůstane pouze tlak plynu. Prázdný zásobník není v narušeném stavu, ale musí se s ním takto nakládat, dokud se nedokončí řádné vyhodnocení. Následující návod by měli technici používat před provedením opětovného natlakování a vrácení do běžného provozu.

12.1 Tlak zásobníku je vyšší než 1380 kPa (200 psig)

Zásobník je pravděpodobně pro běžný provoz přípustný. Nicméně pokud byl u zásobníku snížen tlak dříve a tlak se neustále v průběhu času snižuje, aniž by se odebíral produkt, pravděpodobně je v zásobníku studená kapalina nebo suchý led. Nenechávejte zásobník v běžném provozu, dokud nejsou známa všechna fakta (viz kapitola 11).

12.2 Tlak zásobníku je nižší než 1380 kPa (200 psig), ale vyšší než 416 kPa (60,4 psig)

Pro stanovení, zda je zásobník prázdný (bez kapaliny), by se měl provést následující pracovní postup:

- Zkontrolujte záznamy o spotřebě pro stanovení, zda by mohl zásobník být vůbec prázdný.
- Zkontrolujte ventil a potrubí kapaliny, zda nevykazují znaky námrazy, což může indikovat přítomnost kapalného oxidu uhličitého.
- Potvrďte, že je zásobník prázdný otevřením buď plicního ventilu kapaliny nebo pracovního ventilu kapaliny. Pokud existuje a uvolňuje se POUZE plynný oxid, zásobník je prázdný a může se naplnit podle CGA G-6.4 *Bezpečný transport zkapalněného oxidu uhličitého v izolovaných nákladních cisternách, železničních cisternách a přenosných zásobnících* [9]. Pokud uniká kapalina z jednoho ventilu kapaliny nebo pokud je potrubí ucpané zablokováním suchým ledem, musí se předpokládat, že jsou přítomny kapalina o nízké teplotě a/nebo suchý led. Další návod viz kapitoly 13.1, 13.4 a 13.5.

12.2.1 Minimální konstrukční teplota kovu zásobníku -20 °F (-29 °C)

Zásobníky udržující kapalinu při tlacích nižších než 1380 kPa (200 psig) jsou v narušeném stavu a jsou studenější než minimální konstrukční stav. Znovu je natlakujte pomocí postupů uvedených v kapitolách 13.4 a 13.5.

12.2.2 Minimální konstrukční teplota kovu zásobníku -40 °C (-40,0 °F)

Zásobníky s tlaky vyššími než 970 kPa (140 psig) se mohou vrátit do provozu. Zásobníky s tlaky nižšími než 970 kPa (140 psig) jsou v narušeném stavu a vyžadují použití pracovní postupy pro opětovné natlakování uvedené v kapitolách 13.4 a 13.5.

12.2.3 Minimální konstrukční teplota kovu zásobníku -46 °C (-50 °F)

Zásobníky s tlaky vyššími než 724 kPa (105 psig) se mohou vrátit do provozu. Zásobníky s tlaky nižšími než 720 kPa (105 psig) jsou v narušeném stavu a vyžadují použití pracovní postupy pro opětovné natlakování uvedené v kapitolách 13.4 a 13.5.

12.2.4 Zásobníky s jinými hodnotami minimální konstrukční teploty kovu

Zásobníky s jinými hodnotami MDMT se mohou vrátit do provozu při tlacích vyšších než je odpovídající rovnovážný tlak oxidu uhličitého (viz Obrázek 1). Zásobníky s teplotami nižšími než MDMT jsou v překročeném stavu a vyžadují provést postupy opětovného natlakování uvedené v kapitolách 13.4 a 13.5.

12.3 Tlak zásobníku nižší než 416 kPa (60,4 psig)

Zásobník by se měl vyprázdnit od veškeré kapaliny pouze tlakem plynu. Pro stanovení, zda je zásobník prázdný (bez kapaliny), by se měl provést následující pracovní postup:

- Zkontrolujte záznamy o spotřebě pro stanovení, zda by mohl být zásobník vůbec prázdný.
- Zkontrolujte ventil a potrubí kapaliny, zda nevykazují znaky námrazy, což může indikovat přítomnost kapalného oxidu uhličitého nebo suchého ledu.
- Zkontrolujte přesnost měřidla tlaku a hladiny kapaliny. Pulzace na měřidle hladiny kapaliny může indikovat přítomnost suchého ledu.

- d) Natlakujte zásobník na 690 kPa (100 psig) pomocí plynného CO₂ (viz kapitola 13.4). Pokud tlak zásobníku zůstává na hodnotě 414 kPa (60 psig) po dlouhou dobu během natlakování, je uvnitř zásobníku suchý led.
- e) Otevřete buď plnicí ventil nebo pracovní ventil kapaliny a uvidíte, zda je v zásobníku pouze plyn. Pokud je potrubí kapaliny ucpané zablokováním suchým ledem nebo vypouští kapalinu, poté cisterna obsahuje suchý led a musí se znovu natlačit pomocí postupů uvedených v kapitole 13.

12.4 Speciální nízkoteplotní zásobníky

Zásobníky vyrobené z materiálů, které zůstanou kujné při teplotě -78,5 °C (-109,3 °F) (např. zásobníky TC/DOT-4L vyrobené z nerez oceli typu 304), se mohou vrátit do provozu, aniž by byla provedena opatření nutná pro zásobníky vyrobené z materiálů, které mají vlastnost ztráty tuhosti pod hodnotou -20 °F (-28,9 °C).

Štítek s údaji ASME těchto nádob by měl zřetelně identifikovat nádoby, že mají MDMT nižší než -78,5 °C (-109,3 °F).

Testování prokázalo, že pevný oxid uhličitý může být stále ještě přítomen, přestože tlak je vyšší než bod, kdy by pevný oxid uhličitý mohl existovat, pokud by obsah byl v rovnovážném stavu. Přestože v zásobníku je trocha pevného oxidu uhličitého, je pravděpodobné, že může být aktivován tlakovací odpařovač a zásobník může být vrácen do běžného provozu. *Neplňte zásobník do normální hladiny kapalného oxidu uhličitého.* První plnění poté, co zásobník ztratil tlak, by nemělo překročit 80 % běžného plnění. Tím se nabízí prostor pro rozpuštění jakéhokoli zbývajícího suchého ledu a jeho přeměnu na kapalinu, která se expanduje do přibližně normální 100 % hladiny plnění. Zásobník se zbytkem suchého ledu bude přeplněn nad konstrukční podmínky, pokud se naplní na běžně nastavené plnění. *Pracovní postupy navrhované v této kapitole platí pouze pro zásobníky s nižší hodnotou MDMT než -78,5 °C (-109,3 °F).*

13 Doporučené pracovní postupy pro opětovné natlakování

13.1 Doporučení

Následující doporučení jsou poskytnuta na základě nejlepších informací dostupných v době publikace. Každý příklad musí vyhodnotit technik znalý vlastností oxidu uhličitého. Snižování tlaku zásobníku probíhá z úrovně překročeného stavu. Předpokládá se, že technik má k dispozici pouze měřidlo tlaku, měřidlo hladiny obsahu a plnicí potrubí kapaliny/plynu. Také se předpokládá, že je k dispozici jen několik nebo žádné nástroje; je dostupné omezené množství elektrické energie nebo alternativních zdrojů tepla; nákladní cisterny jsou pravděpodobně jedinými externími zdroji plynu oxidu uhličitého; a zásobník se musí vrátit do běžného provozu co možná nejrychleji.

13.2 Přirozené opětovné natlakování bez obsluhy (Pracovní postup 1)

Odpojte zásobník z provozu, uzavřete všechny ventily a nainstalujte zařízení pro regulaci tlaku pro udržení tlaku zásobníku na hodnotě 690 kPa (100 psig). Okolní teplo, které vniká přes izolaci, rozpustí suchý led a ohřeje zbývající kapalinu na běžné provozní podmínky.

Jedná se o pomalý a postupný proces. Tlak se nemůže použít pro stanovení teploty kapaliny během opětovného tlakování, protože suchý led a studenější kapalina mají tendenci se usazovat na dně zásobníku. To by mohlo udržovat teplotu u dna zásobníku na trojném bodu bez ohledu na tlak. Tento postup by se měl používat pouze, pokud je tlak v zásobníku omezen na 690 kPa (100 psig) (viz Poznámka 2 v Tabulce 2).

Výhodou přirozeného opětovného natlakování bez obsluhy je jeho samoregulace.

Nevýhody jsou:

- Velmi pomalé.
- Může trvat až 30 dní v závislosti na množství produktu, okolní teplotě a kvalitě izolace.

13.3 Zahřívání teplým plynem bez tlaku (Pracovní postup 2)

Tento postup je nejbezpečnější pro zásobníky vyrobené z hrubozrnných ocelí, protože se nevstupuje do nebezpečné oblasti, jak je uvedeno na Obrázku 3.

Odpojte zásobník z provozu. Pokud tlak zásobníku je vyšší než 416 kPa (60,4 psig), odstraňte veškerý zbývající kapalný oxid uhličitý prostřednictvím přípojky pro kapalinu (viz 9.2). Prostřednictvím přípojky pro plyn jej úplně odtlakujte.

Vstříkněte velké množství teplého suchého plynu nebo vzduchu přes otevřený průlez nebo provozní přípojku a odvětrejte jej do ovzduší.

Odčerpajte kondenzovanou vlhkost ze zásobníku a potrubí. Vysušte, vyčistěte a propláchněte jej poté, co veškerý suchý led sublimoval. Natlakujte zásobník plynným oxidem uhličitým a naplňte jej, jak je požadováno pro první plnění (viz CGA G-6.4) [9].

Výhodou ohřívání teplým plynem bez tlaku je, že během procesu ohřívání nedochází k žádnému nebezpečí prasknutí zásobníku.

Nevýhody zahřívání teplým plynem bez tlaku jsou:

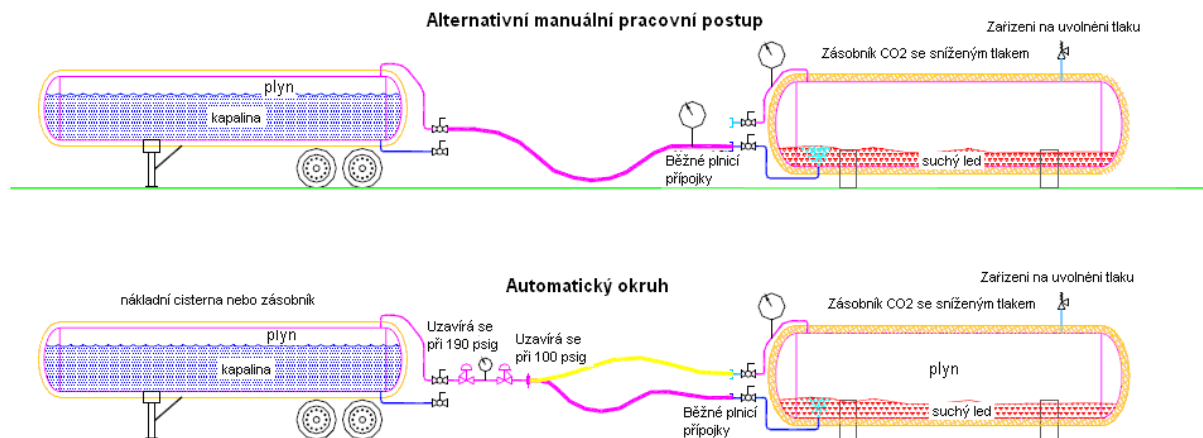
- Odčerpává se veškerý zbývající oxid uhličitý.
- *Může vytvořit velké objemy plynného oxidu uhličitého, který vytváří možné nebezpečí zadušení;*
- Vyžaduje cca 276 800 kJ/t (238 000 Btu/t) kapaliny v zásobníku před snížením tlaku, pokud došlo ke kompletní přeměně na suchý led.
- Vyžaduje čištění a propláchnutí zásobníku pro odstranění vlhkosti a kontaminantů.
- *Může vyžadovat vstup přes průlez s bezpečnostními omezeními, které se týkají vstupu a pracovních postupů pro uzavřené prostory [5].*

13.4 Natlakování plynu oxidu uhličitého až na 690 kPa (100 psig) (Pracovní postup 3)

POZNÁMKA: Tento postup natlakování se může použít pro většinu cisteren zkonstruovaných podle ASME, ale nesmí se použít pro EN nebo jiné konstrukční kódy s nižšími součiniteli bezpečnosti. Uživatel musí určit, zda je tento postup přijatelný (viz příklady v kapitole 10.1 a Dodatku A pro stanovení rozsahu bezpečné oblasti).

Tento pracovní postup je krokem jedna procesu o dvou krocích zde uvedeném a v kapitole 13,5. Používá se pro částečné zkapalnění jakéhokoli suchého ledu uvnitř zásobníku, pokud se tlak snížil pod 416 kPa (60,4 psig).

Natlakujte zásobník na 690 kPa (100 psig) pomocí plynného oxidu uhličitého z nákladní cisterny(en) nebo jiného externího zdroje plynu (viz Tabulka 3). Plyn se může přidávat tak rychle, jak to potrubí a hadice umožní. Pokud je kapalinové potrubí zablokováno suchým ledem, může se použít vyrovnávací vedení plynu (viz Obrázek 6). Plyn kondenzuje, jak rozpouští suchý led. Hladina kapaliny stoupá, dokud se veškerý suchý led neponoří do kapaliny. V tomto bodě se tlak zásobníku opět začne rychle zvyšovat, protože přicházející plyn nemůže přijít do kontaktu přímo se suchým ledem. Na měřidle hladiny kapaliny se může zobrazovat odečet, ale pravděpodobně nebude přesný.



Obrázek 6 – Natlakování plynného oxidu uhličitého na 690 kPa (100 psig)
(Viz kapitoly 13.4 a 15.1)

Krok natlakování plynem popsán v předchozím odstavci by se neměl používat pro zvýšení tlaku zásobníku nad hodnotu 690 kPa (100 psig) a zásobovací zásobník plynného CO₂ by se měl udržovat nad svou hodnotou MDMT. První krok opětovného natlakování je nyní dokončen a může začít druhá fáze (viz kapitola 13.5).

Výhody natlakování plynným oxidem uhličitým na 690 kPa (100 psig):

- Pro tlakové nádoby z uhlíkové oceli při natlakování na úroveň tlaku nižší než 690 kPa (100 psig) je nepravděpodobná katastrofická destrukce při teplotách suchého ledu. Tabulka 2 indikuje, že zásobník s MAWP 350 psig (2410 kPa) a tlakem 690 kPa (100 psig) má úroveň pnutí v ocelové stěně 5714 psi (39,4 MPa). Proto je bezpečné natlakovat takový zásobník na 690 kPa (100 psig) bez rizika křehkého lomu. Při tlaku 690 kPa (100 psig) testování ukáže, že je v zásobníku dostatečné množství kapaliny, aby se kapalina mohla odčerpát podle doporučení v kapitole 13.5.
- Žádná ztráta produktu.

Nevýhody natlakování plynným oxidem uhličitým na 690 kPa (100 psig):

- Vyžaduje velký objem plynu pro částečné zkapalnění suchého ledu. Pro vytvoření tlaku 690 kPa (100 psig) z normálního atmosférického tlaku je potřeba 92,3 kg/t (185 lb/t) plynu na tunu kapaliny bez tlaku. Ve většině případů nejsou elektrické odpařovače dostatečně velké pro rychlé dokončení tohoto kroku.
- Jediný praktický dostupný zdroj plynného oxidu uhličitého je z nákladních cisteren. Typické nákladní cisterny nemají odpařovač ani pomocný zdroj tepla a proto mají dostupné omezené množství plynu. Plné nákladní cisterny jsou nejlepším zdrojem, ale nemohou zásobovat více než 50 kg (100 lb)/t plynu na tunu kapaliny. Plyn odebíraný z nákladních cisteren se dodává pomocí automatického ochlazování kapalného oxidu uhličitého. Odběr plynu musí být omezen, aby udržel tlak nad odpovídající MDMT nákladní cisterny.
- Nedostatečný ohřev kapaliny. Nezajišťuje cirkulaci kapaliny, aby se zajistilo rozpuštění veškerého suchého ledu v přiměřené době, takže je nutná recirkulace kapaliny, jak je uvedeno v kapitole 13.5.

13.5 Recirkulace ohřáté kapaliny (Pracovní postup 4)

Tento postup je krokem dvě a musí mu předcházet krok uvedený v kapitole 13.4, dokud nemá zásobník tlak 690 kPa (100 psig) nebo vyšší.

POZNÁMKA: Ventily, trysky a potrubí mohou být zablokovány (nebo se zablokují) suchým ledem, dokonce i poté, co je oxid uhličitý v zásobníku částečně zkapalněný (viz kapitola 9.2).

VAROVÁNÍ: Recirkulace kapaliny způsobí, že teplota a tlak zásobníků vyrobených z hrubozrnných ocelí prochází oblastí mimo ASME Code, jak je uvedeno na obrázku 3 [1]. Tento postup vyžaduje, aby kvalifikovaný technik na oxid uhličitý nepřetržitě dohlížel na monitorování průtoku čerpadla, přívod tepla a ochranu nádoby proti otřesům a/nebo úderům pro pomalé, regulované zvýšení tlaku.

Kapalný oxid uhličitý se odčerpává buď z plnicího nebo provozního vedení kapaliny přes odpařovač/ohřivač par. Ohřátá kapalina se vrací do zásobníku přes přípojku plnění plynem (viz Obrázek 7). Obvyklý rozsah kapacity čerpadla je od 7,6 l/min do 37,9 l/min (2 g/min až 10 g/min) a obvyklý rozsah kapacity ohřivače je od 3 kW do 18 kW. Upřednostňuje se odčerpání kapaliny z jednoho konce zásobníku a vrátit ohřátou kapalinu na opačný konec, pokud je k dispozici taková přípojka.

Měřidlo hladiny zásobníku obvykle není přesné, dokud se nerozpustí veškerý suchý led.

Výhody recirkulace ohřáté kapaliny jsou:

- Minimalizuje možnost, že tlak plynného CO₂ v zásobníku překročí rovnovážný tlak cirkulované kapaliny. Každý suchý led se v zásobníku postupně rozpustí. Cirkulace kapaliny způsobí promíchání, které minimalizuje klesání teploty po celém zásobníku.
- Relativně rychlé – zásobník může být vrácen do běžného provozu za jeden až dva dny.
- Využívá zařízení rychle dostupné v průmyslu oxidu uhličitého. Tohoto postupu je možné dosáhnout použitím dvou plnicích přípojek.
- Žádná ztráta produktu.

Nevýhody recirkulace ohřáté kapaliny jsou:

- Vyžaduje donést další zařízení na stanoviště, což prodlouží dobu přípravy.
- Vyžaduje kompatibilní elektrický nebo energetický zdroj s dostatečnou kapacitou pro napájení čerpadla a ohřivače. Většina zásobníků oxidu uhličitého má elektrický zdroj pro chladicí zařízení, který se může dočasně odpojit a použít pro proces.
- Vyžaduje čas, který se může různit od hodin po dny v závislosti na okolnostech.



Obrázek 7 – Recirkulace ohřáté kapaliny na 1380 kPa (200 psig)
(Viz kapitoly 13.5 a 15.3.2)

14 Pracovní postupy opětovného natlakování – nedoporučené

O některých z následujících pracovních postupů je známo, že se používaly pro opětovné natlakování v minulosti. Aktuální testování CGA zjistila, že nejsou efektivní nebo bezpečné a proto se nedoporučují.

14.1 Napuštění kapalného oxidu uhličitého do zásobníku pro rozpuštění suchého ledu a ohřátí kapaliny – nedoporučuje se

Důvody, pro které se tento postup nedoporučuje:

- Provádí se pouze s částečně naplněnými zásobníky (cca z 10 % plný před snížením tlaku). Vyžaduje to víc jak 20-ti tunovou cisternu pro vrácení 50-ti tunového zásobníku zpět do provozu, pokud obsahuje 10 % kapaliny těsně před snížením tlaku.

- Není jistota, že se veškerý suchý led rozpustí po přidání kapaliny. Zásobník může být přeplněn poté, co se veškerý zbývající suchý led rozpustí.
- Nemusí být možné vstříknout kapalinu skrz vedení, které může být zablokované suchým ledem.

14.2 Pracovní postup použití tlakovacího odpařovače/interního ohříváče – nedoporučuje se

Důvody, pro které se tento postup nedoporučuje:

- Suchý led se může stále nacházet v oblastech mimo ohříváč. Tlak zásobníku nebude spolehlivě ukazovat množství produktu a teplotu zásobníku.
- Může se rychle zvýšit tlak plynu v zásobníku, aniž by se rozpustil suchý led nebo ohřála kapalina v oblastech mimo ohříváč.
- Žádná cirkulace kapaliny na rozpuštění suchého ledu nebo ohřátí kapaliny mimo odpařovač.
- Může způsobit přehřátí nebo vyhoření topného tělesa uvnitř extrémně studeného a křehkého zásobníku. Suchý led v potrubí přivádějícím kapalinu (viz kapitola 9.2) do externího odpařovače nebo uváznutí v suchém ledu obklopujícího interní ohříváč by mohly zabránit, aby se mohl ohříváč řádně ponořit do kapaliny což může způsobit přehřátí.

14.3 Přenos opětovně natlakovaného oxidu uhličitého v opětovně natlakované přípojce zásobníku se sníženým tlakem – nedoporučuje se

Důvody, pro které se tento postup nedoporučuje:

- Zahřeje obsah zásobníku pouze, když může přichodící plyn přímo kontaktovat suchý led nebo sníh. Tlak se rychle zvýší, když je suchý led zakryt kapalinou a další rozpouštění suchého ledu nebo ohřívání kapaliny je extrémně pomalé.
- Nemůže aktivovat zásobník pro normální provoz tímto postupem samotným.
- Není podporováno žádné míchání kapaliny.

14.4 Odstranění kapalného oxidu uhličitého ze zásobníku a přečerpání do nákladních cisteren – nedoporučuje se

Důvody, pro které se tento postup nedoporučuje:

- Vyžaduje, aby byl obsah před přečerpáním v kapalném stavu.
- Vyžaduje, aby nákladní cisterny měly vhodnou MDMT.
- Vyžaduje, aby zásobník s vhodnou MDMT přijal studenou kapalinu z nákladní cisterny.

14.5 Manuální odstranění suchého ledu – nedoporučuje se

Důvody, pro které se tento postup nedoporučuje:

- Nebezpečí zmrznutí a zadušení zaměstnanců.
- Vyžaduje pracovní postupy spojené se vstupem do omezených prostor.

15 Souhrn doporučených pracovních postupů

15.1 Všeobecné informace

Toto je souhrn doporučených pracovních postupů pro kvalifikované zaměstnance pro opětovné natlakování zásobníků oxidu uhličitého s vyšší teplotou MDMT než $-78,5\text{ °C}$ ($-109,3\text{ °F}$). Neurčuje žádný specifický typ zásobníku nebo okolnost a každý stav musí vyhodnotit kvalifikovaný technik na oxid uhličitý. Cílem je ohřát materiál zásobníku na teplotu, při které znovu získá svoji tažnost před tím, než zvýšení tlaku způsobí překročení úrovně kritického namáhání okolo oblastí koncentrace namáhání. Pokud jsou tyto zásobníky v křehkém stavu, je nutné vyhnout se tlakovým vlnám a mechanickým úderům či otřesům. Tato publikace doporučuje použít jeden ze tří postupů. Postupy o

jednom kroku jsou uvedeny v kapitolách 13.2 a 13.3 a postup o dvou krocích je uveden v kapitolách 13.4 a 13.5, které jsou spojeny v kapitole 15.3.

15.2 Monitorování

Během opětovného tlakování se vyžaduje, aby kvalifikovaný technik prováděl průběžně monitorování stavu. Každá známka prosakování, neobvyklý hluk nebo jiný nevysvětlený děj nebo jev během těchto pracovních postupů jsou důvodem pro přerušování opětovného natlakování a provedení vhodných činností.

15.3 Podrobný popis postupu opětovného natlakování o dvou krocích (kapitoly 13.4 a 13.5)

15.3.1 Krok jedna (<690 kPa [100 psig])

- a) Připojte hadici z plynné fáze zásobovací cisterny do kapalné fáze zásobníku se sníženým tlakem.
Navrhuje se použít rozdělovací potrubí jako na Obrázku 6. Regulátor tlaku zásobníku se sníženým tlakem by měl být nastaven na 690 kPa (100 psig) a regulátor uvolnění tlaku na zásobovací cisterně by neměl být nastaven na tlak nižší než 621 kPa (190 psig) nebo by měl být nastaven na tlak shodný s MDMT zásobovací cisterny.
Přijatelnou variantou je nepřetržitě monitorování měřidel tlaku a manuální řízení tlaku a průtoku (Obrázek 6 – alternativní manuální postup).
- b) Propláchněte hadici a rozdělovací potrubí.
- c) Pomalu otevřete ventily připojující zásobovací cisternu a zásobník se sníženým tlakem.
Jako zdroj plynného oxidu uhličitého namísto několika nákladních cisteren se mohou použít jedna nákladní cisterna a odpařovač.

UPOZORNĚNÍ: *Nenechávejte klesnout tlak zásobovací cisterny pod hodnotu tlaku odpovídajícího stavu MDMT zásobovací cisterny. Bez externího tlakovacího odpařovače může tlak zásobovací cisterny klesnout na bod, kdy se musí zastavit průběh opětovného natlakování, dokud se neobnoví tlak v zásobovací cisterně. Možná bude potřeba velkého množství oxidu uhličitého (viz Tabulka 3).*

Když se tlak plynu v zásobníku se sníženým tlakem přiblíží hodnotě 100 psig (690 kPa), nelze předpokládat, že se suchý led úplně rozpustil. Zásobník bude stále ještě obsahovat zbytkové, ale stále ještě značné množství suchého ledu při teplotě -56,6 °C (-69,9 °F). Zdá se, že stoupající tlak in dikuje, že celý obsah má vyšší teplotu než -56,6 °C (-69,9 °F), ale pokusy prokázaly, že se rychlost kondenzace zpomaluje a tlak začíná stoupat, jakmile je pevný oxid uhličitý zaplaven a pokryt kapalinou. Dokud zbytky pevného oxidu uhličitého zůstávají v zásobníku, zásobník bude pravděpodobně ještě stále studenější než jeho MDMT a podle toho by se s ním mělo zacházet.

15.3.2 Krok dva (>690 kPa [100 psig])

- a) Odpojte přenos plynu a připojte vedení kapaliny zásobníku se sníženým tlakem k okruhu čerpadla a ohřivače/odpařovače oxidu uhličitého (viz Obrázek 7). Ideálně by napouštění z okruhu čerpadlo-ohřivač mělo být přivedeno na opačný konec zásobníku na podporu míchání teplého oxidu uhličitého se stávajícím obsahem zásobníku. Alternativně může být připojeno k přípojce na plynný oxid uhličitý. Provoz cirkulace by měl pokračovat, dokud tlak zásobníku nepřekročí tlak odpovídající stavu MDMT nebo 1380 kPa (200 psig). Ohřívání produktu a cirkulace mohou být v tento moment přerušeny. Pokud tlak zůstává stabilní alespoň po 2 hodiny nebo stoupá, obsah zásobníku by měl být v bodě nebo blízko bodu rovnováhy. Zásobník se poté může vrátit do normálního provozu.
- b) Neplňte zásobník poprvé nad 80 % jeho jmenovité kapacity po dokončení tohoto postupu. To umožní dostatečný rezervní objem pro expanzi studené kapaliny, pokud uvnitř zásobníku zůstává ještě zbytkový suchý led. Tlak zásobníku a hladina by se měly monitorovat, dokud s jistotou nepozorujete běžný provoz.

16 Reference

Pokud nebylo specifikováno jinak, musí platit poslední vydání.

- [1] ASME Boiler & Pressure vessel Code (Předpisy pro kotle a tlakové nádoby), ASME International, Three Park Avenue, New York, NY 10016. www.asme.org
- [2] CGA P-11, *Metric Practice Guide for the Compressed Gas Industry*, (Praktický návod pro metrickou soustavu pro průmysl stlačeného plynu), Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com
- [3] Quinn, E.L. a Charles L Jones, *Carbon Dioxide* (Oxid uhličitý), p. 97, American Chemical Society Monograph Series, Reinhold Publishing Corp., New York, NY 10036. www.umi.com
- [4] *Code of Federal Regulations* (Zákoník federálních nařízení), Title 29 (Labor) Part 1910, Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402. www.gpoaccess.gov
- [5] *TLVs[®] and BEIs[®] Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, (Seznamy prahových limitních hodnot pro chemické látky a fyzikální činidla a biologické expozice, Americký kongres vládních hygieniků pro pracovní hygienu) 1330 Kemper Meadow Dr., Cincinnati, OH 45240. www.acgih.gov
- [6] *EIGA Campaign against Asphyxiation and related documents*. (Kampaň EIGA proti zadušení a související dokumenty) European Industrial Gases Association, Avenue des Arts 3-5, B 1210 Brussels, Belgium. www.eiga.eu
- [7] EN 13458 Parts 1-3, *Cryogenic vessels – Static vacuum insulated vessels* (Kryogenické nádoby - Stabilní vakuově izolované nádoby)
- [8] PS-5, *CGA Position Statement on the Suitability of Carbon Steel Containers for Stationary Carbon Dioxide Storage*, (Vyjádření stanoviska ohledně vhodnosti zásobníků z uhlíkové oceli pro stacionární skladování oxidu uhličitého). Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com
- [9] CGA G-6.4, *Safe Transfer of Liquefied Carbon Dioxide in Insulated Cargo Tanks, Tank Cars, and Portable Containers* (Bezpečný přenos kapalného oxidu uhličitého v izolovaných zásobnících, automobilových cisternách a přenosných kontejnerech), Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com
- [10] EN 1252-1, *Cryogenic vessels—Materials—Part 1: Toughness requirements for temperatures below –80 °C* (Kryogenické nádoby - Materiály - Část 1: Požadavky na houževnatost při teplotách pod -80 °C)
- [11] ISO 21028-2, *Cryogenic vessels—Toughness requirements for materials at cryogenic temperature — Part 2: Temperatures between –80 °C and –20 °C* (Kryogenické nádoby - Požadavky na houževnatost při kryogenických teplotách - Část 2: Teploty mezi -80 °C a -20°C)
- [12] AD2000 Merkblatt W10 *Werkstoffe für tiefe Temperaturen Eisenwerkstoffe (Materiály pro velmi nízké teploty železné materiály)*, Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Strasse 449, D-50939 Cologne
- [13] EN 10028-3, *Flat products made of steels for pressure purposes—Part 3: Weldable fine grain steels, normalized* (Ploché výrobky z ocelí pro tlakové nádoby – Část 3: Svařitelné jemnozrné oceli, normalizačně žíhané)

Doplňující reference

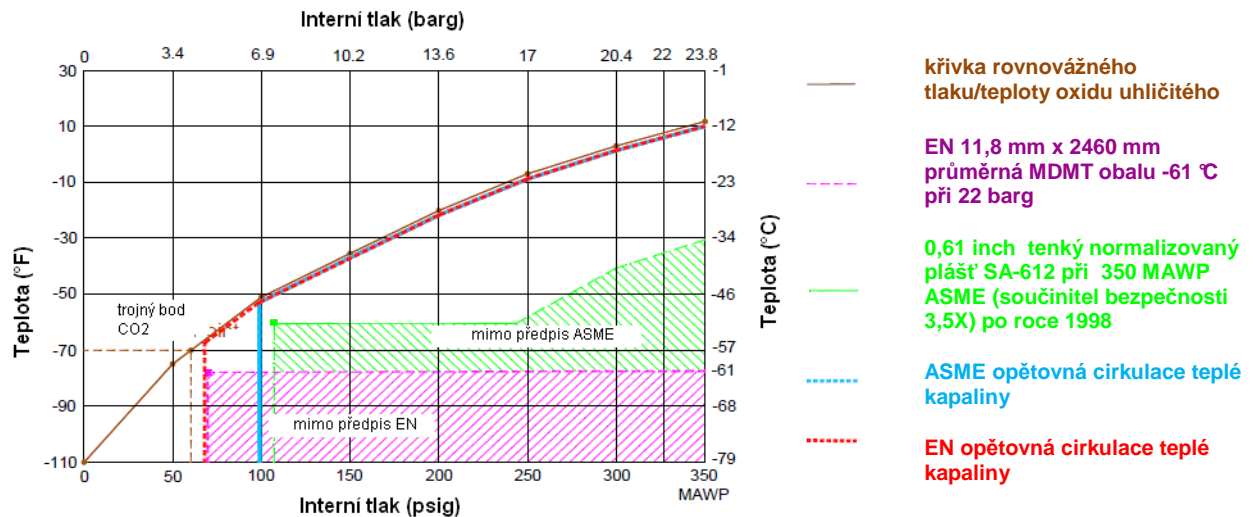
EN 14197 Parts 1-3, *Cryogenic vessels—Static non-vacuum insulated vessels* (Kryogenické nádoby - Stabilní ne-vakuem izolované nádoby),

EIGA Doc 66/08, *Refrigerated CO2 storage at users' premises* (Skladování chlazeného CO2 v prostorách zákazníka), European Industrial Gases Association, Avenue des Arts 3-5, B 1210 Brussels, Belgium. www.eiga.eu

Dodatek A – Konstrukční údaje o materiálu tlakových nádob EN (informativní)

A1 Standardní tlakové nádoby EN

Příklad EN na Obrázku A-1 zobrazuje tlakovou nádobu pro 33 tun oxidu uhličitého, servisní tlak = 22 bar, vnější průměr = 2460 mm, minimální tloušťka stěny = 11,8 mm, vyrobenou z oceli s minimální hodnotou vrubové houževnatosti 27 J při -40 °C s MDMT -61 °C založenou na Obrázku A-2.



POZNÁMKA: Postup natlakování plynu indikovaný v kapitole 13.4 na 7 barg (100 psig) se dostává mimo povolenou oblast předpisu EN. Je přijatelné natlakování plynu pouze na hodnotu nižší než 4,8 barg (70,5 psig).

Obrázek A-1 – Porovnání EN a ASME povolených MDMT pro zásobník oxidu uhličitého pro opětovné natlakování

Zkontrolujte zaručené rázové vlastnosti oceli při nejnižší teplotě v osvědčení materiálu nebo normě materiálu; v tomto případě je to 27 J při -40 °C.

Zkontrolujte tloušťku stěny cisterny, zaručenou mez pružnosti (R_e) použité oceli, a zda byly nádoby tepelně zpracovány po svařování; příklad zásobník uvedený v Obrázku A-1 bez tepelného zpracování po svařování, $R_e = 355 \text{ N/mm}^2$ a tloušťka je rovna 11,8 mm.

S nádobou se může pracovat při teplotách nižších než -61 °C, ale pouze při úrovních zátěže nižších než 50 MPa pro EN 1252-1, *Cryogenic vessels—Materials—Part 1: Toughness requirements for temperatures below -80 °C* (Kryogenné nádoby - Materiály - Část 1: Požadavky na houževnatost při teplotách pod -80 °C) [10]. Tlak, který odpovídá zátěži (pnutí) 50 MPa, se může stanovit pomocí následující rovnice:

$$P = S * 2e/D$$

Kde

P	=	interní tlak 4,8 MPa (4,8 barg)
S	=	50 MPa (úroveň zátěže tam, kde je přípustná nižší provozní teplota)
E	=	tloušťka stěny 11,8 mm
D	=	průměr 2460 mm

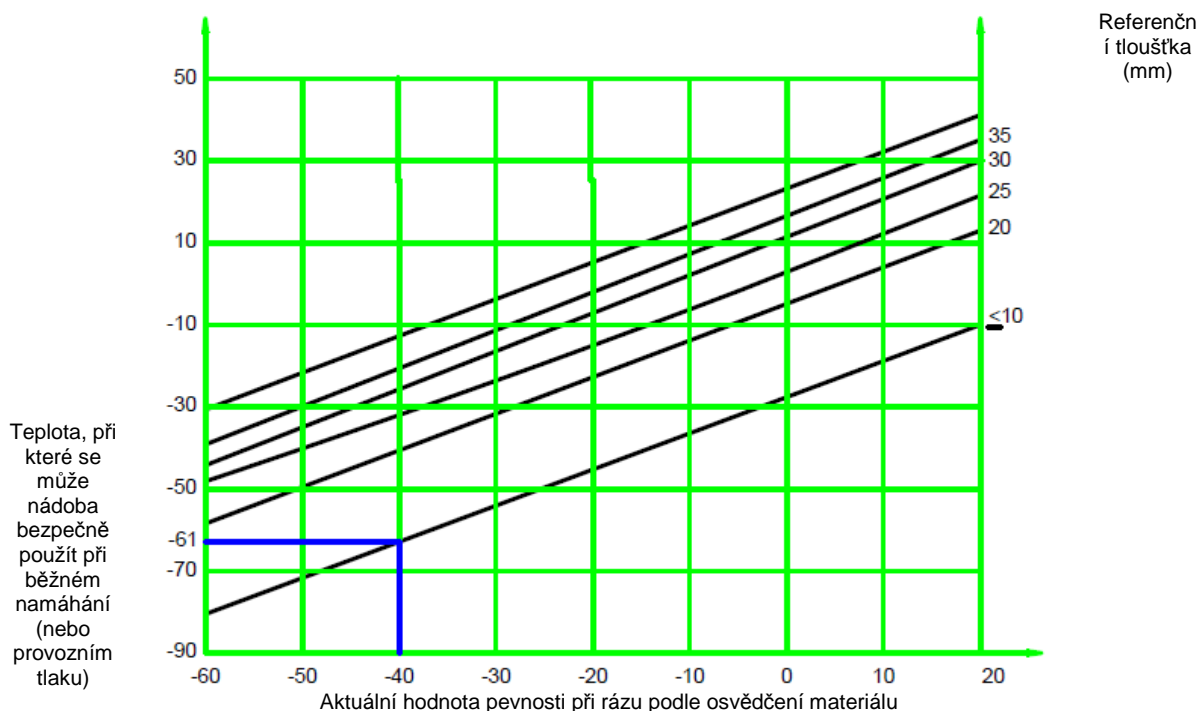
EN 1252 povoluje provoz tlakové nádoby o 40 °C studenější než MDMT, dokud pnutí stěny (namáhání, stres) je nižší než 50 MPa. Proto ukázková nádoba by mohla pracovat studená -101 °C při tlaku nižším než 4,8 barg, což je o dost nižší teplota než nejchladnější teplota suchého ledu -78 °C

(tj. $-61\text{ °C MDMT} - 40\text{ °C}$ povolené snížení teploty = -101 °C minimální provozní teplota p ři sníženém tlaku).

Hranice šrafované oblasti na Obrázku A-1 označené mino předpis EN byly určeny pomocí EN 1252-1. Všechny provozní podmínky chladnější než -61 °C a vyšší než 4,8 barg by nebyly p ředpisem EN povoleny. Tato šrafovaná oblast musí být nižší než křivka teploty/tlaku pro oxid uhličitý (hnědá čára) pro povolení bezpečného provozu cisterny během opětovného natlakování.

Postup 3 v kapitole 13.4 (natlakovat na hodnotu 6,9 barg [100 psig] se nemůže použít u nádob EN, kde výpočet úrovně pnutí a namáhání p ři 50 MPa je nižší než 6,9 barg. Postupy 1 a 2 se mohou použít (viz kapitoly 13.2 a 13.3).

Pro příklad EN se může používat pouze modifikovaný Postup 3, kde krok tlakování plynem cisterny je udržován pod hodnotou 4,8 barg. To se velmi blíží trojnému bodu oxidu uhličitého, a proto se tento postup (recirkulace kapaliny) nedoporučuje.



$$310\text{ N/mm}^2 < R_p \leq 360\text{ N/mm}^2: 27J$$

R_p = smluvní mez kluzu

POZNÁMKA: Minimální přijatelná teplota podle osvědčení materiálu je -40 °C , ale protože je tloušťka cisterny cca 10 mm, může se cisterna použít p ři běžném namáhání (nebo provozním tlaku) až do -61 °C .

Obrázek A-2 – Konstrukční referenční teploty a teploty rázové zkoušky jako podmínky pro svařovanou a tlakovou nádobu podle EN³

³

© Mezinárodní organizace pro standardizaci (ISO). Tento materiál je upraven z ISO 21028-2:2004 s povolením Amerického Národního úřadu pro normalizaci jménem ISO. Žádná část tohoto materiálu nesmí být kopírována nebo reprodukována v jakékoliv formě, uložena v elektronickém vyhledávacím systému nebo jinak nebo zpřístupněna na internetu, veřejné síti p řes satelit nebo jinak bez předchozího písemného souhlasu Amerického národního institutu pro normalizaci. Kopie této normy může být zakoupen od Amerického národního institutu pro normalizaci, 25 West 43rd Street, New York, NY 10036. (Kopie jsou také dostupné u CGA).

A2 Tlaková nádoba AD2000 Merkblatt [12]

Zkontrolujte typ materiálu zásobníku a zaručené rázové vlastnosti oceli při nejnižší teplotě v osvědčení materiálu nebo normě materiálu; např. jemnozrnná ocel jakosti P355ML1 má rázové charakteristiky 27J při -40°C.[12].

Zkontrolujte MAWP a tloušťku stěny zásobníku a zda byl zásobník tepelně opracováván po svařování; např. žádné tepelné opracování a tloušťka je rovna 11,8 mm.

Zvolte zatěžovací stav pro nejnižší očekávanou provozní teplotu pro materiál cisterny ve směrnici AD2000 Merkblatt W10, Tabulka 1, sloupce 4,5 nebo 6, což bude -78,5 °C, pokud je suchý led v cisterně: např. zatěžovací stav II se musí zvážit pro materiál P355NL1, protože umožňuje nejnižší provozní teplotu -110 °C [12].

POZNÁMKA: Zatěžovací stav II se může zvolit pro všechny nízkoteplotní jemnozrnné oceli jakosti P355NL1/2 nebo P355ML1/2 podle EN 10028, *Plech z ocelí pro tlakové nádoby - Část 3: Svařitelné jemnozrnné oceli, normalizačně žíhané*, protože jejich povolená provozní teplota je nižší než -90 °C [13].

Vyberte povolené zátěže tlaku pro cisternu na základě tloušťky stěny pláště cisterny a jejich tepelného zpracování podle směrnice AD2000 Merkblatt W10, Tabulka 2 a/nebo Článek 3 [12]. Jako obecné pravidlo se nepožaduje tepelné zpracování pro tloušťky stěny menší než 20 mm, pokud osvědčení o zkoušce vykazuje dostatečné rázové vlastnosti pro nízkou teplotu, jak je požadováno v materiálové normě.

Požadovaná testovací teplota je také uvedena v tabulce 1, sloupci 9 směrnice AD2000 Merkblatt W10 [12]. Příkladem pro materiál jakosti P355NL1 je -40 °C.

Pro tloušťky stěny rovné nebo menší než 10 mm je povolená zátěž tlakem omezena max. do výše 75 % vypočítaného tlaku (MAWP).

Pro tloušťky stěny větší než 10 mm a rovné nebo menší než 20 mm je povolená zátěž tlakem omezena max. do výše 50 % vypočítaného tlaku (MAWP): např. cisterna o tloušťce 11,8 mm a MAWP 22 bar se může natlakovat až na 11 bar.

POZNÁMKA: Zatěžovací stav I je povolen pro teploty nižší než trojný bod pro některé materiály. Nicméně povolený tlak v zásobníku se smí zvýšit během procesu opětovného natlakování pouze pokud se měří teplota stěny zásobníku a je významně nad povolenou hodnotu.