

doc. Ing. Miroslav PETRÁK, Ph.D.
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
 Ústav energetiky

Oxid uhličitý jako chladivo

Část 2: Uplatnění CO₂ v chladicí technice

Carbon Dioxide as a Refrigerant Part 2: Use of CO₂ in Refrigeration

Recenzent
 prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

Důležitou charakteristikou chladiva je vedle environmentálních a bezpečnostních vlastností také hodnota chladicího faktoru vyplývající z termodynamických vlastností a určující energetickou náročnost provozu chladicího zařízení. V článku je provedeno srovnání chladicího faktoru oxidu uhličitého s vybranými chladivy používanými v současné době pro oblast chladicí techniky a klimatizace a jsou diskutovány výhody jeho použití a příklady užití v České republice.

Klíčová slova: oxid uhličitý, chladicí faktor, chladicí technika

An important characteristic of refrigerant is aside of the environmental and safety characteristics also energy efficiency, arising from the thermodynamic properties and determining the energy demands for operating the refrigeration system. In the article, energy efficiency of carbon dioxide is compared with selected refrigerants currently used in the field of refrigeration and air conditioning and advantages of its use and examples of use in the Czech Republic are discussed.

Keywords: carbon dioxide, energy efficiency, refrigeration

ENERGETICKÉ SROVNÁNÍ OXIDU UHLIČITÉHO S JINÝMI CHLADIVY

Od chladicího zařízení se v první řadě očekává energeticky hospodárný provoz. Energetickou náročnost procesu chlazení vyjadřuje chladicí faktor a jeho vysoká hodnota je tak vedle ekologických a bezpečnostních vlastností dalším významným požadavkem klade-ným na chladiva.

Obr. 1 ukazuje srovnání chladicího faktoru pro různá chladiva používaná v současné době. Vyčíslen je pro Rankinův oběh s několika vybranými vypařovacími teplotami reprezentujícími typické aplikace v klimatizaci (vypařovací teplota +2 °C), chlazení (-10 °C) a mrazírenské provozu (-32 °C). Srovnávanými chladivy jsou:

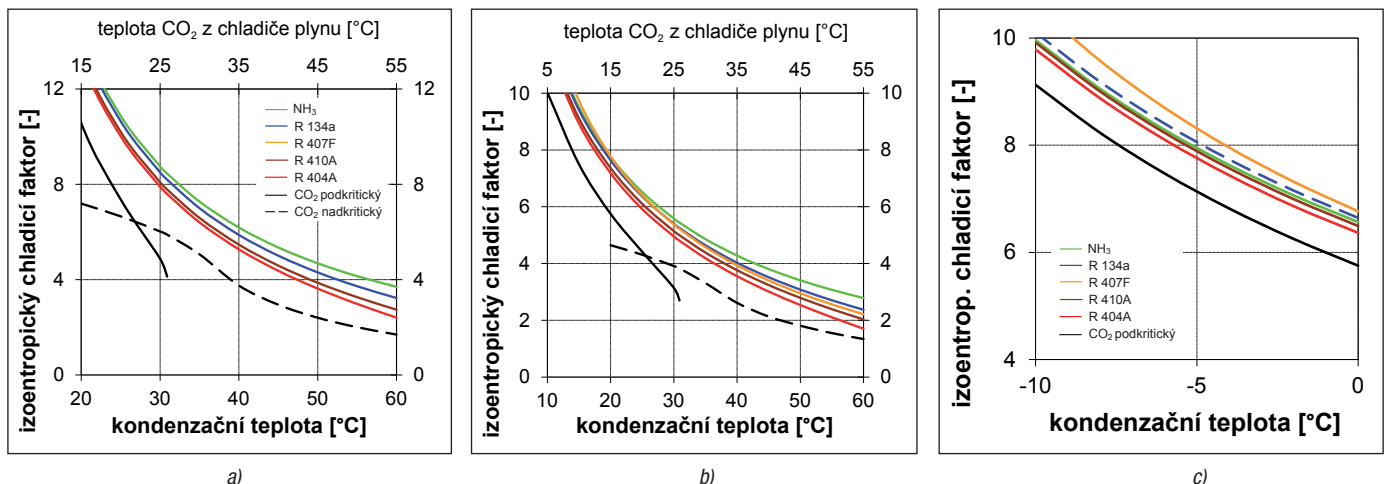
- čpavek (R717) pro průmyslové aplikace (např. potravinářský a chemický průmysl, zimní stadiony),
- R134a pro klimatizaci středních a velkých výkonů se šroubovými kompresory a turbokompresory a některé chladírenské aplikace,
- R404A a R407F pro chladírenské a mrazírenské aplikace včetně průmyslových, kde není z nějakého důvodu čpavek vyhovující,

- R410A pro klimatizaci a v poslední době i pro některé komerční nebo živnostenské aplikace.

V jednom grafu jsou všechna chladiva srovnávána při stejné vypařovací teplotě s výjimkou chladiva R407F, které má výrazný skluz umožňující při stejných teplotách chlazené látky zvýšit vypařovací teplotu o několik K. V grafech je proto u tohoto chladiva počítáno s vypařovací teplotou o 2 K vyšší.

U mrazíren (obr. 1c) je zobrazen jen chladicí faktor prvního stupně dvou-stupňového oběhu, neboť oxid uhličitý by se v jedноступňovém zapojení nerealizoval. Chladicí faktor pro R134a je v obr. 1c naznačen jen čárkovaně, protože R134a není pro tyto teplotní podmínky příliš vhodná, neboť nízkotlaká strana by pracovala ve vakuu.

Zobrazené hodnoty pro nadkritický oběh jsou při teplotách nadkritického plynu do 30 °C pro tlak na vysokotlaké straně 7,5 MPa a při vyšších teplotách pro optimální tlak (viz předchozí část „Zvláštnosti CO₂ jako chladiva“ [5]). Výstupní teplota plynu z vysokotlakého chladiče je uvedena na pomocné ose x a je předpokládána o 5 K nižší než konden-



Obr. 1 Chladicí faktor Rankinova oběhu pro vypařovací teplotu: a) +2 °C (klimatizace); b) -10 °C, pro R 407F -8 °C (chlazení); c) -32 °C, pro R 407F -30 °C (mrazírny, první stupeň více-stupňového nebo kaskádního oběhu)

zační teplota chladicího zařízení s jiným podkritickým chladivem. To vychází z myšlenkového předpokladu, že nadkritický plyn lze v chladicí ochladit na teplotu o cca 5 K vyšší, než je teplota okolí, zatímco u podkritických oběhů s dlouhodobým provozem bývá teplotní rozdíl mezi kondenzační teplotou a okolním vzduchem 10 K.

Ukazuje se, že u CO₂ v blízkosti kritického bodu vykazuje podkritický oběh horší chladicí faktor než oběh, u něhož by byl tlak uměle držen v nadkritické oblasti. Přispívá k tomu tvar izoterm v okolí kritického bodu a výše uvedený předpoklad volby teplot.

Z obrázku vyplývá, že oxid uhličitý má všeobecně horší chladicí faktory oproti ostatním chladivům používaným v současné době, a to je jeho podstatnou nevýhodou bránící jeho většímu rozšíření. Z vysokých provozních tlaků vyplývají silnostěnné konstrukční prvky, což přináší další nevýhody jako vyšší pořizovací cenu a vyšší hmotnost. Všechny tyto nevýhody způsobily, že se oxid uhličitý dosud sériově neuplatnil v automobilové klimatizaci, přestože již byly dávno vyvinuty funkční prototypy.

OXID UHLIČITÝ V CHLADICÍ TECHNICE

Přesto použití oxidu uhličitého dává v určitých případech smysl:

- a) Jedná se o ekologické chladivo s 1 500 až 3 000krát nižším vlivem na globální oteplování Země oproti dnes používaným halogenovaným chladivům, což se projevuje zanedbatelným přímým vlivem v rámci hodnotícího parametru *TEWI* vyjadřujícího celkové emise oxidu uhličitého způsobené provozem chladicího zařízení po dobu jeho životnosti.

TEWI = přímé emise způsobené chladivem uniklým netěsnostmi do atmosféry + nepřímé emise spojené se získáváním pohonné energie potřebné pro provoz zařízení [kg_{CO2}] (1)

kde:

*přímé emise = GWP * roční únik chladiva * životnost zařízení + GWP * náplň chladiva v zařízení * (1 – faktor recyklace)* [kg_{CO2}] (2a)

*nepřímé emise = životnost zařízení * roční spotřeba energie * měrné emise CO₂* [kg_{CO2}] (2b)

Zařízení s oxidem uhličitým, jenž má *GWP* = 1, tak mají zanedbatelné přímé emise a podstatnou výhodu oproti dnes používaným fluorovaným chladivům.

- b) Díky výborným termokinetickým vlastnostem CO₂ je možné zvýšit vypařovací teplotu o řádově 2 K (podle [6] až o 3 K) oproti jiným chladivům a tím zlepšit dosažený chladicí faktor [1, 6, 11].
- c) Díky vysokým tlakům je u chladicího zařízení s oxidem uhličitým dosaženo potřebného tlakového rozdílu pro nátok chladiva na nízkotlakou stranu již při nižších kondenzačních teplotách ve srovnání s ostatními chladivy, což umožňuje v zimním období v podkritické oblasti provoz s výrazně nižšími kondenzačními teplotami (např. komerční chladicí zařízení pro prodej potravin pracují v zimě s kondenzační teplotou již od 10 °C), kdy je tak provoz zařízení s oxidem uhličitým výrazně úspornější oproti jiným chladivům a kompenzuje tak vyšší energetickou náročnost v teplých obdobích roku. Závisí pak na celoročním průběhu zátěže a na klimatických podmínkách místa instalace, zda zimní úspory převáží vyšší energetické nároky v létě. Z uvedeného vyplývá, že pro oxid uhličitý jsou výhodné chladné klimatické oblasti s dlouhým podkritickým provozem za nízkých teplot okolí, proto je také oxid uhličitý velmi rozšířen ve skandinávských státech, kde je navíc podpořen i místní legislativou. Pro oxid uhličitý jsou naopak nepříznivé teplé klimatické oblasti, např. jižní Evropa, a dále sezónní letní aplikace, např. klimatizace. Pro chladicí zařízení v supermarketech re-

prezentující typ celoročního provozu s poměrně stabilní tepelnou zátěží uvádí firma Carrier [2], ale i jiné zdroje [7] jako orientační kritérium smysluplnosti použití nadkritické technologie CO₂ průměrnou roční teplotu vzduchu místa instalace do 15 °C. Je ale zapotřebí si uvědomit, že tato poučka vznikla před několika lety oproti tehdy nejvíce používanému chladivu R404A v těchto aplikacích, často s termostatickými expanzními ventily. V současné době se v České republice v nových chladicích zařízeních v supermarketech používají převážně R134a a R407F, tedy chladiva s výrazně menším *GWP* než u R404A, a dále jsou nasazovány elektronické expanzní ventily umožňující pracovat s nižšími minimálními kondenzačními teplotami, čímž se snižuje potřeba pohonné energie zařízení v zimě. Obojí tak přispívá ke snížení přímých a nepřímých emisí v rámci *TEWI*, čímž se současně zmenšují přednosti samotného oxidu uhličitého. V porovnání s těmito fluorovanými chladivy by se tak výhodnost nadkritického systému s oxidem uhličitým omezovala na nižší průměrné roční teploty vzduchu než zmíněných 15 °C.

V souvislosti s bojem proti globálnímu oteplování Země je v Evropské unii patrná tendence směrem k chladivům s nízkým *GWP* vyjádřená nejen již zmíněným nařízením č. 517/2014 o fluorovaných plynech [9], tak i např. směrnici Rady 2006/40/ES o emisích z klimatizačních systémů motorových vozidel [10], což bude stírat výhody zanedbatelných přímých emisí oxidu uhličitého. Ačkoliv nařízení č. 517/2014 vyjma několika málo oblastí výslovně nezakazuje používání fluorovaných chladiv, bude v budoucnu docházet k výrazné redukci množství chladiva uváděného na trh, přičemž první citelné snížení nastává již od 1. 1. 2018 na úroveň 63 % letošní spotřeby a od 1. 1. 2021 o dalších 18 procentních bodů na 45 %. S vědomím možného nedostatku chladiva pro servisní účely v budoucnu tak může řada investorů již brzy vyžadovat odklon od stávajících fluorovaných chladiv. Vyjma chladiva R1234yf pro automobilovou klimatizaci nebo R1234ze pro zařízení s malým chladicím výkonem nebo s turbokompresory však dosud nejsou komerčně dostupné trvalé náhrady za dnes používaná fluorovaná chladiva, což může vést k většímu rozmachu oxidu uhličitého v blízké budoucnosti i přes jeho výše uvedené nedostatky.

V současné době se nadkritické aplikace s oxidem uhličitým v chladicí technice v České republice omezují na komerční chlazení (chlazení prodeje potravin). Máme zhruba necelých 20 supermarketů chlazených výhradně oxidem uhličitým, nejvíce TESCO (např. Brno Heršpice, Ostrava, Plzeň, Praha Zličín, Mladá Boleslav a další) a dále dvě prodejny Albert a po jedné Kaufland a Makro (pouze jedna hala v rámci rozšíření prodejny). Největší část byla instalována a zprovozněna v letech 2011 až 2012. Např. v sousedním Polsku ale již existují i logistické sklady potravin s touto technologií.

Vedle nadkritických oběhů se oxid uhličitý používá v chladicí technice i v podkritickém stavu, a to:

- a) U kaskádních zařízení v prvním nízkoteplotním (mrazírenském) stupni. Nejčastěji se jedná o kombinace CO₂ a čpavku v průmyslu (pekárna La Lorraine, výroba vegetariánských potravin Tivall) a chlazení skladů potravin (Lidl Měřín) a CO₂ s R134a v komerčním chlazení prodeje potravin (např. veškeré prodejny firmy Kaufland od poloviny roku 2012 a některé poslední prodejny Billa a Albert).
- b) Jako teplotonosná látka u nepřímého chlazení. Výhodou oxidu uhličitého proti teplotonosným kapalinám je využití latentního tepla, což přináší mj. menší hmotnostní tok teplotonosné látky a menší čerpací práci. Protože rozvody nebývají většinou dimenzovány na nadkritické tlaky, je nutné vyřešit udržování potřebné nízké teploty oxidu uhličitého i v případech, kdy není po delší dobu potřeba chlazení a jeho teplota by se samovolně vyrovnávala s okolím.

ZÁVĚR

Vedle velké přednosti oxidu uhličitého spočívající v minimálním vlivu na životní prostředí ($ODP = 0$, $GWP = 1$) má oxid uhličitý také některé nevýhody, mezi něž patří kromě nízké kritické teploty a vysokých tlaků v zařízení především horší chladicí faktor v řadě aplikací ve srovnání s jinými chladivými.

U chladicích zařízení přináší oxid uhličitý hlavní energetickou výhodu v možnosti snížit v chladných ročních obdobích kondenzační teplotu výrazně pod hodnoty běžné u jiných chladiv. Proto je oxid uhličitý jako chladivo nejvíce rozšířen v severských státech, v Evropě reprezentovaných Skandinávií a Dánskem.

Snižování energetické náročnosti chladicích zařízení s oxidem uhličitým představuje zásadní výzvu pro větší rozšíření tohoto chladiva, a proto výzkum a vývoj v této oblasti stále pokračuje. Zajímavým se v této souvislosti ukazují různé formy strojního dochlazení chladiva za vysokotlakým chladičem plynu [3, 4].

Rozšíření oxidu uhličitého jako chladiva bude ovlivněno i legislativní situací s chladivými. Dnes je již jisté vyřazení fluorovaných halogenovaných uhlovodíků (označovaných jako F-plyny) jako silných skleníkových plynů, což jsou v současnosti hlavní chladiva používaná v Evropě, přičemž probíhá vývoj nových chladiv. Vedle energetické náročnosti těchto nových chladiv ovlivní užití oxidu uhličitého i další vývoj legislativy, např. zákazy nebo naopak příkazy používání, vedlejší ekonomické náklady (např. za pravidelné kontroly těsnosti, jak je tomu u dnes používaných F-plynů) nebo různé poplatky a daně uvalené na chladiva.

Kontakt na autora: miroslav.pettrak@fs.cvut.cz

Použité zdroje

- [1] FINCKH, O., SCHREY, R., WOZNY, M. Energy and Efficiency Comparison between Standardized HFC and CO₂ Transcritical Systems for Supermarket Applications. In: *The 23rd International Congress of Refrigeration*. Prague: International Institute of Refrigeration, 2011, ID: 357. ISBN 978-2-913149-89-2.
- [2] HEINBOKEL, B. CO₂OLtec™-Systemtechnik im Lebensmitteleinzelhandel. *Die KÄLTE + Klimatechnik*. 2011, roč. 64, č. 10, s. 48-53. ISSN 0343-2246.
- [3] PETRÁK, M. Energy Improvements of CO₂ Transcritical Refrigeration Systems by Machine-Made Subcooling. In: *Compressors, 2013*. Papiernička Slovensko: joint conference of IIR Commissions B2 and B1 with E1 and E2, 2013. ISBN 978-2-36215-000-5.
- [4] PETRÁK, M. Transkritische CO₂-Kälteanlagen mit künstlicher Unterkühlung. *KI Kälte- Luft-Klimatechnik*. 2012, roč. 48, č. 8-9, s. 22-26. ISSN 1865-5432.
- [5] PETRÁK, M. Oxid uhličitý jako chladivo, část 1: Zvláštnosti CO₂ jako chladiva. *Vytápění, větrání, instalace*. 2015, roč. 24, č. 3, s. 108-111. ISSN 1210-1389.
- [6] ŘÍHA, J., NICKL, J., QUACK, H. Integration of an Expander/Compressor Into a Supermarket CO₂ Cooling System. In: *7th Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*. Trondheim Norway: International Institute of Refrigeration, 2006.
- [7] VOIGT, A. SKM Enviro Eco-Efficiency Study of Supermarket Refrigeration. In: *The 23rd International Congress of Refrigeration*. Prague: International Institute of Refrigeration, 2011, ID: 231. ISBN 978-2-913149-89-2.
- [8] Thermodynamic Properties Refprop. National Institute of Standards and Technology, USA.
- [9] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 517/2014 ze dne 16. dubna 2014 o fluorovaných skleníkových plynech a o zrušení nařízení č. 842/2006.
- [10] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/40/ES ze dne 17. května 2006 o emisích z klimatizačních systémů motorových vozidel a o změně směrnice Rady 70/156/EHS.
- [11] Neveřejné podklady firmy Carrier. ■

Jak těsní Německo?

Poslední léta sílí v Německu trend užití vzduchových rozvodů s vysokou třídou těsnosti. Podle výsledku ankety německého svazu výrobců vzduchových potrubí (Herstellerverband für Luftleitungen – HFL, ustaveného v říjnu 2014) byla v roce 2012 více než polovina hranatých potrubí objednávaná v nejhorší třídě A. V roce 2014 se tento podíl snížil na pětinu v souladu s doporučeními normy EN 13779 – Větrání nebytových budov. Střední hodnoty podílu za rok 2014 jsou u třídy A 19 %, u třídy B 34 %, u třídy C s největším podílem je to 45 % a u nejlepší třídy D již 2 %. Změnu zřejmě přinese nová norma EN 16798, díl 3 – Energetická náročnost budov – Větrání nebytových budov, jejíž návrh byl vydán v lednu 2015. Ta by měla nový trend ještě upevnit.

Pramen: CCI 04/2015, s. 9

(AB)

USA s Čínou a ČR vyvíjí jaderný reaktor chlazený solemi

Dohodu americké Oak Ridge National Laboratory (ORNL) a čínského ústavu Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP) byla sjednána účast čínské strany na vývoji jaderného reaktoru chlazeného solemi FHR. Již dříve byla dohodnuta spolupráce Ústavu jaderného výzkumu (ÚJV) v Řeži na tomto vývoji, jmenovitě ve zkouškách fluoridových solí.

Reaktory FHR (Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor) jsou vycházející hvězdou reaktorů založených na vysokoteplotním palivovém cyklu, pracujících při 800 °C, pro výrobu tepla a elektrické energie s chlazením směsí roztavených solí fluoridů lithia a berylia (7LiF. BeF₂ – FLIBE). Nízkotlaké reaktory s roztavenými fluoridy a povlakovaným granulovaným palivem mají zvláštní význam pro provoz v oblastech s nedostatkem vody pro chlazení, což je zajímavé pro čínskou stranu. Vyznačují se vyšší bezpečností, účinností a stupněm využití paliva.

Českou spolupráci upravuje Dohoda mezi MPO ČR a US DOE (ministerstvo energetiky USA) z 26. 3. 2014 o spolupráci v civilním vývoji a výzkumu v jaderné energetice.

Pramen: www.ornl.gov a technicky.tydenik.cz 17. 3. 2015

(AB)



SE SERVOPOHONY
LUFBERG

MÁTE REGULACI
POD KONTROLOU

www.lufberg.eu