

RASHLADNI FLUID HFO-1234yf: TERMODINAMIČKA ANALIZA CIKLUSA TOPLOTNIH PUMPI MALIH SNAGA

FRANC KOSI, MILENA STOJKOVIĆ, UROŠ MILOVANČEVIĆ i
SRĐAN OTOVIĆ, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16, 11000 Beograd

U radu je izložena termodinamička analiza rashladnih ciklusa toplotnih pumpi malih snaga sa HFO-1234yf kao rashladnim fluidom. Zbog vrlo niske vrednosti GWP, HFO-1234yf ima izgleda da bude zamena za R134a. Date su osnovne termodinamičke, fizičko-hemijske i ekološke karakteristike HFO-1234yf, merodavne za primenu u rashladnoj tehnici. Za referentni levokretni ciklus sa unutrašnjim razmenjivačem toplote, izvršeno je poređenje termodinamičkih performansi i dati su pripadajući uporedni dijagrami za pet rashladnih fluida. Pokazano je da su ciklusi malih toplotnih pumpi sa HFO-1234yf energetski efikasni, tehnički izvodljivi i da, s obzirom na nizak GWP, mogu da budu prihvatljiva alternativa fluidu R134a za primenu u rashladnoj i klimatizacionoj tehnici

KLJUČNE REČI: toplotna pumpa; rashladni fluid HFO-1234yf; GWP; termodinamička analiza; zamena za R134a

REFRIGERANT HFO-1234yf: THERMODYNAMICAL ANALYSIS OF CYCLES FOR SMALL HEAT PUMPS

A thermodynamical analysis of refrigeration cycles for small heat pumps with HFO-1234yf as a refrigerant has been given in this paper. As a result of very low GWP value, HFO-1234yf is intended to be a replacement for R134a. The basic thermodynamical, physico-chemical and ecological characteristics of HFO-1234yf relevant for RAC applications have been given. For a comparative cycle with internal suction gas heat exchanger the comparison of thermodynamical performances and associated diagrams for five refrigerants have been presented. It has been shown that the cycles of small heat pumps with HFO-1234yf are energy efficient and technical feasible. Having in mind his very low GWP the HFO-1234yf fluid may be acceptable alternative for R134a in RAC applications

KEY WORDS: heat pump; refrigerant HFO-1234yf; GWP; thermodynamical analysis; replacement for R134a

1. Uvod

Krajem 1995. godine, potpuno halogenizovani hlorofluorouglenici (CFC) su Montrealskim protokolom eliminisani iz upotrebe kao rashladni fluidi. Zbog sadržaja jednog atoma hlora u molekulu, upotreba delimično halogenizovanih hidrohlorofluorouglenika (HCFC) se ubrzano redukuje (u mnogim evropskim zemljama novi uređaji sa HCFC se ne grade). Primena delimično halogenizovanih hidroflluorouglenika (HFC), u čijim molekulima nema hlora takođe je, zbog povećane zapaljivosti, u dobroj meri ograničena.

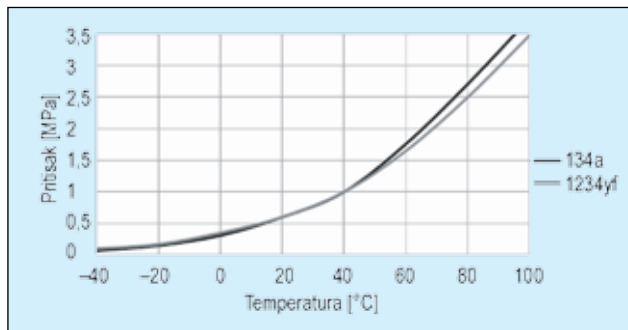
S obzirom da se tragalo za rashladnim fluidima koji ne sadrže atome hlora (njihov ODP – **O**zone **D**epletion **P**otential jednak je nuli), a koji imaju nizak GWP (**G**lobal **W**arming **P**otential) i slabu zapaljivost, hidroflluoroolefini (HFO) nametnuli su se kao prirodan izbor za novu generaciju rashladnih fluida.

Rashladni fluidi HFO razvijeni su sa idejom da budu zamena za R134a prvenstveno za automobilske klima-uređaje, pošto prema direktivama Evropske unije vezanim za emisiju f-gasova (Regulation (EC) No 842/2006 i Direktive 2006/40/EC), od januara 2011, novi modeli automobila sa klima-uređajima koji koriste „f-gasove staklene bašte“

sa GWP-om većim od 150 ne mogu da se proizvode. Generalno, svi HFO-1234 imaju odlična ekološka svojstva, GWP im prosečno ne prelazi 4 (335 puta manje od GWP-a za R134a), u prirodnim uslovima se brzo razlažu („atmosferski životni vek“ im je oko 11 dana, približno isto kao za R134a), a produkti razlaganja ne sadrže supstancije sa visokim GWP-om. HFO-1234 su blago zapaljivi i ne prouzrokuju nikakvu akutnu niti hroničnu toksičnost, pa su prema ASHRAE-ovoj klasifikaciji svrstani u grupu rashladnih fluida A2. Termički su vrlo stabilni i kompatibilni sa svim materijalima koji se uobičajeno koriste u instalacijama sa R134a kao rashladnim fluidom. U pogledu rastvorljivosti sa uljima za podmazivanje kompresora, slično R134a, dobro se mešaju sa poliesterskim uljima, a sa mineralnim i alkil-benzenkim uljima formiraju heterogene smese.

2. Termofizičke osobine

Termofizičke osobine fluida HFO-1234 su vrlo bliske svojstvima R134a, što znači da omogućavaju dobre performanse uređaja u širokom opsegu temperatura isparavanja i kondenzacije. Poređenja radi, na dijagramu na slici 1, u dijagramu p–t date su ravnotežne krive parne i tečne faze za R134a i HFO-1234yf, a u tabeli 1 veličine stanja u kritičnoj tački i NBP za HFO-1234yf i još četiri rashladna fluida, R290, R125, R134a i R410A, koji će biti uporedo razmatrani u ovom radu.



Slika 1. Ravnotežna kriva parne i tečne faze u p–t dijagramu

Upoređivanjem ravnotežne krive HFO-1234yf sa krivom R134a primećuje se da se one dobro poklapaju. Za temperature ispod 60 °C ravnotežne krive su skoro identične, a na temperaturama višim od 60 °C ravnotežna kriva za R134a je nešto strmija od krive za HFO-1234yf.

Tabela 1. Veličine stanja u kritičnoj tački za pojedine rashladne fluide

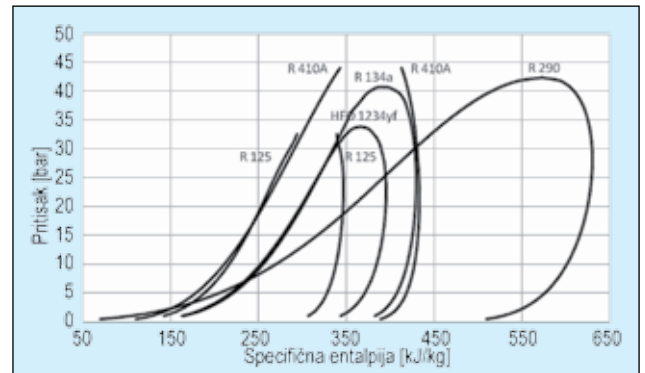
Rashladni fluid	T_{cr} [°C]	p_{cr} [kPa]	v_{cr} [m ³ /kg]	NBP ¹⁾ [°C]	Izvor
R-290	96,67	4235,9	0,00507	-42,20	[1], [2]
R-125	66,28	3635,0	0,00176	-48,37	[4]
R134a	101,06	4059,0	0,00195	-26,36	[1], [2]
R-410A	74,67	5173,4	0,00162	-52,53 ²⁾	[1], [2]
HFO-1234yf	94,7	3382,0	0,00209	-29	[3], [5], [6], [7]

¹⁾ Temperatura ključanja na atmosferskom pritisku.

²⁾ U stanju suvozasićene pare.

Na slici 2 date su u p–h dijagramu granične krive vlažne pare za svih pet razmatranih fluida. Vrednosti toplote isparavanja kod HFO-1234yf manje su nego kod R134a, i naravno, značajno manje nego kod ugljovodonika (R-290). Interesantno je da su nagibi gornjih graničnih kri-

vih HFO-1234yf i R134a skoro jednaki, ali su izentropne kod HFO-1234yf strmije, što povoljno utiče na rad sabijanja bez obzira na stepen dobrote realne krive kompresije.



Slika 2. Granične krive u p–h dijagramu za pojedine rashladne fluide

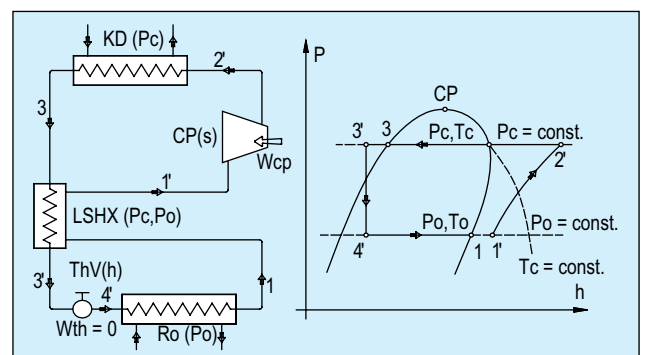
3. Termodinamička analiza ciklusa toplotne pumpe

U novije vreme, između ostalih, razvijene su nove familije kompresora sa R134a kao rashladnim fluidom, namenjene za temperature kondenzacije preko 60 °C. U poređenju sa R134a, HFO-1234yf ima nešto nižu kritičnu temperaturu, ali i manje specifične zapremine suvozasićene pare na temperaturama isparavanja, pa bi kao rezultat trebalo očekivati manje koeficijente grejanja (COP_H), ali i manje potrebne zapremine kompresora u instalacijama sa HFO fluidima. Za levokretni ciklus (šema instalacije je data na slici 3a, a pripadajući logp–h na slici 3b) sprovedena je uporedna termodinamička analiza za svih pet rashladnih fluida iz table 1, pod sledećim uslovima:

- grejni učinak: 5 kW,
- temperatura kondenzacije: 50 °C,
- stepen dobrote kompresije („izentropska efikasnost“): 0,8,
- pregrevanje pare u prehladivaču kondenzata: 10 °C.

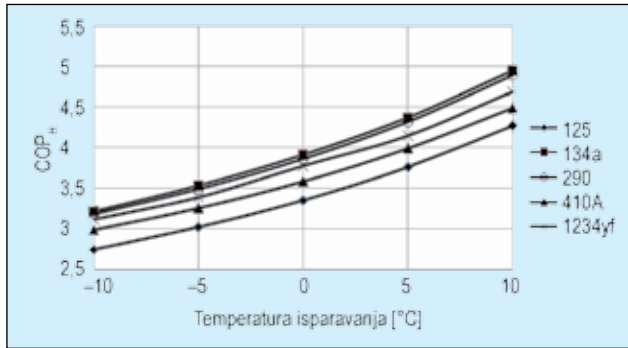
Temperatura isparavanja je varirana u rasponu od –10 °C do +10 °C. Da bi se u razmatranje uzeo i uticaj pregrevanja pare u prehladivaču (unutrašnjem razmenjivaču toplote), za usvojenu temperaturu isparavanja od +5 °C, analizirana je promena koeficijenta grejanja i specifične zapreminske rashladne sposobnosti pri promeni temperature pregrejane pare na usisu kompresora u opsegu od 0 °C do 20 °C.

Veličine stanja u karakterističnim tačkama i procedura proračuna merodavnih veličina ciklusa nisu dati u ovom radu, jer se smatraju dovoljno rutinskim.



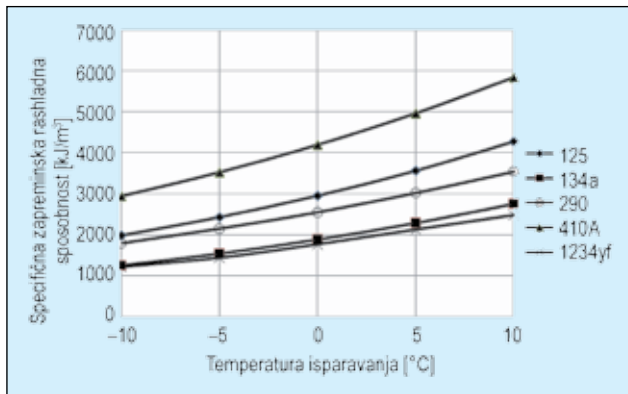
Slika 3. Termodinamički ciklus toplotne pumpe; a) šema ciklusa, b) logp–h dijagram

Rezultati analize prikazani su na dijagramima na slikama 4–8.



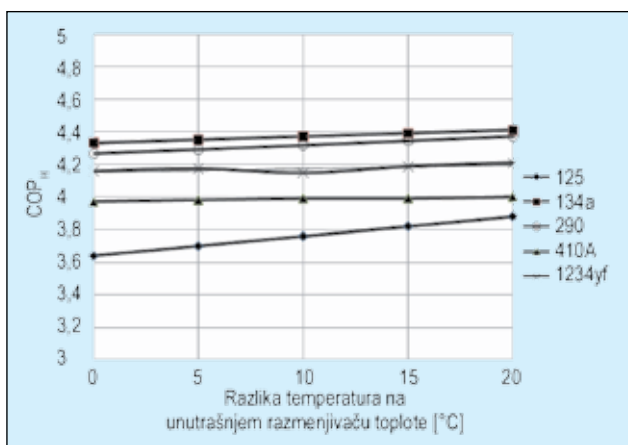
Slika 4. Promena COP_H sa promenom temperature isparavanja

Na slici 4 prikazan je uticaj temperature isparavanja na koeficijent grejanja. Za niže temperature isparavanja nema osetne razlike u koeficijentu grejanja za HFO-1234yf i R134a. Za propan se dobijaju vrlo slični rezultati. Koeficijent grejanja za toplotne pumpe sa R410A i R125 su manji, što je verovatno rezultat njihove niže kritične temperature, pošto su u blizini kritične tačke sva rashladna svojstva fluida načelno nepovoljna.



Slika 5. Promena specifične zapremine rashladne sposobnosti sa promenom temperature isparavanja

Na slici 5 dat je uticaj temperature isparavanja na specifičnu zapreminsku rashladnu sposobnost koja karakteriše veličinu (zapreminu) kompresora. Vrednosti specifične zapremine rashladne sposobnosti HFO-1234yf i R134a su

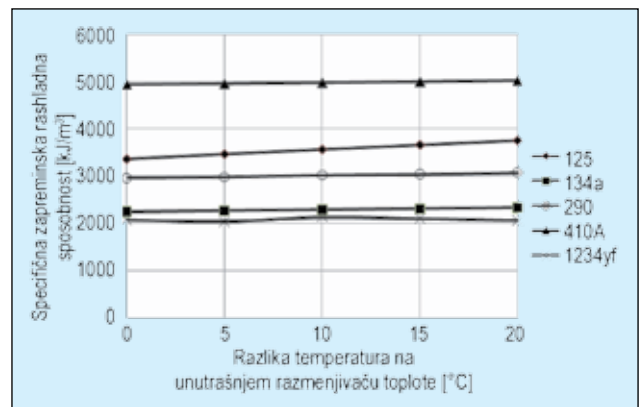


Slika 6. Promena COP_H sa promenom pregrevanja pare na unutrašnjem razmenjivaču toplote (temperatura isparavanja +5°C)

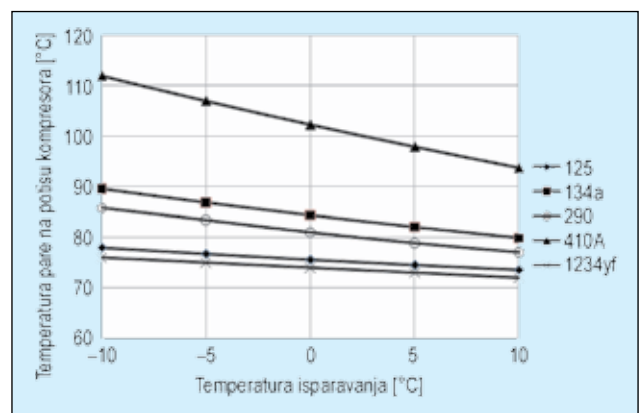
ispod vrednosti za ostale fluide, što je jasno imajući u vidu njihovu relativno malu toplotu isparavanja i veliku specifičnu zapreminu pare. R410A ima visoke pritiske isparavanja u razmatranoj oblasti temperatura isparavanja i sledstveno tome najmanju specifičnu zapreminu pare; istovremeno toplota isparavanja mu je relativno velika (veća je jedino kod R290). Propan R290 i pored praktično dvostruko veće toplotne isparavanja ima relativno malu specifičnu masenu i zapreminsku rashladnu sposobnost, pošto su gubici eksergije usled prigušivanja (zbog blagog nagiba donje granične krive) jako izraženi.

Uticaj pregrevanja pare u unutrašnjem razmenjivaču toplote LSHX (liquid suction heat exchanger) na koeficijent grejanja dat je na slici 6, a na specifičnu rashladnu sposobnost na slici 7. Pregrevanje pare odnosi se samo na povišenje temperature pare na razmenjivaču toplote LSHX (stvarno pregrevanje je veće za 7 °C, koliko iznosi pregrevanje na mestu dawača temperature termostatskog prigušnog ventila). Pored neospornog smanjenja gubitaka rashladne sposobnosti usled prigušivanja, u posmatranom rasponu temperatura pregrevanja pare (od 0 °C do 20 °C), kod svih rashladnih fluida porast pregrevanja pare prati povećanje koeficijenta grejanja i blagi porast specifične zapreminske rashladne sposobnosti.

Pregrevanje pare ima relativno skroman uticaj na povećanje koeficijenta grejanja i specifične rashladne sposobnosti posmatranih fluida; kod HFO-1234yf ovo povećanje je minimalno. Međutim, pored dodatne zaštite kompresora od „vlažnog usisavanja“, kod mašina koje rade sa rashladnim fluidima koji se dobro mešaju sa uljima za podmazivanje, prehladivanje hladnom parom je praktična potreba da ras-



Slika 7. Promena specifične zapremine rashladne sposobnosti sa promenom pregrevanja pare na unutrašnjem razmenjivaču toplote



Slika 8. Promena temperature na potisu kompresora sa promenom temperature isparavanja

hladni fluid ispari iz kapljica ulja u prehladivaču, a ne u cilindru kompresora, jer mu to smanjuje stepen isporuke.

Za sve posmatrane fluide temperatura pare na potisu kompresora opada sa povišenjem temperature isparavanja (diagram na slici 8). U odnosu na R134a, HFO-1234yf ima nešto niže vrednosti; niže temperature na potisu kompresora, iako doprinose smanjenju nepovratnosti razmene toplote u kondenzatoru, ne moraju biti uvek prednost kada je u pitanju primena kod toplotnih pumpi.

4. Zaključak

Uz blagu zapaljivost rashladni fluid HFO-1234yf ima odlična ekološka svojstva, uključujući i odsustvo akutne ili odložene toksičnosti. Performanse sistema koji radi sa HFO-1234yf kao rashladnim fluidom vrlo su slične parametrima rada instalacija sa R134a. HFO fluide karakteriše velika termička stabilnost i kompatibilnost sa svim materijalima koji se uobičajeno koriste u instalacijama sa R134a. Iako je prvobitno razvijen sa ciljem da bude zamena za R134a u automobilskim klima-uređajima, HFO-1234yf ima izgleda da bude vrlo atraktivno rešenje za primenu u toplotnim pumpama malih učinaka.

Literatura

- [1] **Downing, R. C.**, *ASHRAE Transactions*, 1974, Paper No. 2313.
- [2] ******* *Thermophysical Properties of Refrigerants*, ASHRAE, 1976.
- [3] **Akasaka, R., K. Tanaka, Y. Higashi**, *Thermodynamic property modeling for 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf)*, International journal of refrigeration 33 (2010), po. 52–60.
- [4] ******* Solkane, Refrigerant software, version 7.0.0.10, Solvay Fluor GmbH Technical Service-Refrigerants-PO Box 220, 30002 Hannover, Germany.
- [5] **Tanaka, K., Y. Higashi**, *Thermodynamic properties of HFO-1234yf (2,3,3,3-tetrafluoropropene)*, International journal of refrigeration 33 (2010), pp. 474–479.
- [6] **Higashi, Y.**, *Thermophysical properties of HFO-1234yf and HFO-1234ze*, International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology 2010, 17–19 February 2010, Tokyo, Japan.
- [7] **Leck, T. J.**, *Evaluation of HFO-1234yf as Potential Replacement for R134a in Refrigeration Applications*, 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Boulder, CO, 2009.

kgh



UNICOM d.o.o.
Desanke Maksimović 17,
11000 Beograd, Srbija
E-mail: unicombg@eunet.rs
www.unicom.rs
t/f: +381 11 322 3235, 322 2915,
323 3020, 323 2689



PREDUZEĆE ZA PROIZVODNJU, PROMET I USLUGE NA VELIKO I MALO

Bul. Arsenija Černojevića 111,
11070 Novi Beograd, Srbija
Tel./faks 011 2144 940, 2147 600
E-mail: yugostam@sezampro.rs
www.yugostam.co.rs

PROIZVODNJA INDUSTRIJSKI FILTERA za otprašivanje u filterskom materijalu DIN 24185/EN779 u kvalitetu G2 za fenkole, G3 i G4 za klima-komore, kao i F5 (CC600G)-10 za lakirnice. Izrada filtera, kako vrećastih tako i kasetnih, vrši se po zahtevu kupca i u standardnim i u vanstandardnim dimenzijama. U proizvodnji posedujemo i visokokvalitetne filterske materijale u klasi F5, F6, F7, F8 i F9 od kojih se takođe mogu izgraditi navedeni filteri za prečišćavanje vazduha.

REFERENC LISTA preduzeća u oblasti prehrambene i hemijske industrije, kao i mnogobrojni hoteli i poslovne zgrade koje poseduju centralne klima-sisteme su garancija našeg kvaliteta izrade filtera.

NAPOMINJEMO da kompletan proizvodni program možemo ponuditi i izraditi u našoj radionici uz zamenu filtera na licu mesta

KOMPLETAN filterski materijal je nemačkog proizvođača Sandler.

