

Sintetičke alternative za rashladno sredstvo R404A

Synthetic alternatives for R404A refrigerant replacement

Milan STOJANOVIĆ, Florida Int. System, limited company, Beograd,
Uroš MILOVANČEVIĆ, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

Ključne reči:
alternativa R404A;
zamene R404A

Od uvođenja rashladnih sredstava HCFC baziranih na R22 traže se rešenja koja će biti trajnijeg karaktera. Prva zamena za HCFC – R22 bazirana na HFC R404A u Evropi je prevaziđena uvođenjem propisa EN 517/2014 (sa važnošću od 1.1.2015) kao naslednika prethodne direktive EN 862/2006. Servisna zabrana rada sa R404A i R507A od 2020. godine u Evropi će otežati servisierima potragu za budućim zamenama i obeležavanjima za šta se treba spremati već danas. Alternative koje su danas predložene za R404A (GWP 3922) jesu: R407A (2107), R407C (1774), R407F(1825), R410A (2088), R442A (1888), R449A (1397), HFO – R452A (2140) i radi poređenja R32 (675). U radu će biti odabrane najperspektivnije alternative i navedene uporedne termodinamičke karakteristike na koje inženjeri koji projektuju sisteme i servisieri u eksploataciji treba da obrate pažnju.

Key words:
alternatives to R404A;
R404A replacements

Since the introduction of HCFC refrigerants based on R22, researches have searched for permanent solutions. The first replacement for HCFC – R22 based on HFC R404A was replaced by EN 517/2014 Directive (in force since January 1st 2015), following the EN 862/2006 Directive. Starting from 2020, R404A and R507A will be prohibited and new replacement refrigerants are to be introduced. The following alternatives for R404A (GWP 3922) are proposed: R407A (2107), R407C (1774), R407F (1825), R410A (2088), R442A (1888), R449A (1397), HFO-R452A (2140) and for comparison R32 (675). This paper will show the most perspective alternatives and a comparison of thermodynamic characteristics important for system designers and servicing personnel.

1. Uvod

Najznačajnije pitanje u budućim razmatranjima postali su troškovi održavanja i energetska efikasnost, posmatrajući životni vek industrijskih rashladnih sistema u periodu od 20 godina (prema literaturi [1] i do 97% troškova). U ovom radu izračunavane su karakteristike mašina za definisane uslove rada i prikazane razlike u zavisnosti od korišćenog rashladnog fluida, pod istim uslovima.

U kom smeru se razvijaju rashladni fluidi, pregledno je prikazano u literaturi [2]. Detaljno sagledavajući istoriju, postavljaju se pitanja vezana za probleme sa vrednošću GWP i ODP, kao i sa zapaljivošću zeotropskih i azeotropskih mešavina, temperaturskim klizanjima. Nameću se razna potencijalna konstruktivna rešenja koja su u uskoj sprezi sa izborom rashladnih fluida u rashladnim sistemima.

Dalji razvoj mogao bi da ide u smeru koji diktiraju velike svetske kompanije za proizvodnju rashladnih fluida, npr. Honeywell [3]. U istoj literaturi se vidi da bi dosadašnja merenja karakteristika kompresora (opisanih u standardu AHRI 540) trebalo modifikovati tj. vršiti osrednjavanje posmatranih pritisaka u kondenzatoru i isparivaču zbog poznatog temperaturskog klizanja.

2. Sintetičke alternative za HFC R404A

Nabrojimo samo neke od predloženih zamena koje su već komercijalno dostupne ili se danas ispituju u laboratorijama.

Hanywell-ov R448A (vrednost GWP je 1374) koji se na testovima pokazao da je odgovarajuća zamena za R404A (testovi na temperaturama od 90 °C i 110 °C po JIS 8623 (std) definisani u [1])

Linde-ov R442A (vrednost GWP je 1754) takođe se preporučuje kao direktna zamena (drop in) prema literaturi [5]. R407A (vrednost GWP je 1923) takođe se nudi kao zamena.

Danfoss je napravio čitav niz predloženih zamena za R404A i to sa rashladnim fluidima sa vrednošću GWP manjom od 2500: R452A (koji se još može naći i pod nazivom XP44), R407A, R407F, za vrednosti GWP ispod 1500: R449A (poznat kao XP40), R448A (ili drugačije N40), dok su za vrednosti GWP ispod 700 na spisku: DR7, R445A (L40), R444B (L20). Za fluide ispod 150 tu je DR3.

Nove generacije rashladnih fluida često se dobijaju mešanjem dva nova fluida R1234yf i R1234ze i četiri postojeća: R32, R134a, R125 i R152A [6].

U tabeli 1 je navedena lista najčešće korišćenih rashladnih fluida kao direktne zamene za R404A. Bitno je skrenuti pažnju na kolonu „glide“, gde su navedene vrednosti klizanja temperatura pri isparavanju rashladnog fluida.

3. Postupci zamene postojećeg freona R404A odabranim drugim [3, 9]

Važna servisna napomena je da se zamene ne smeju mešati sa drugim gasovima, pa ni sa R404A. Mora se precizno postupiti sledećim koracima:

Rad je izložen na 47. Međunarodnom kongresu o KGH, Beograd, 29.11. – 1.12.2016.

* E-mail: milan.stojanovic@thermoking.co.rs

Tabela 1. Karakteristike sintetičkih rashladnih fluida kao zamene za R404A

Rashladno sredstvo		ODP	GWP	Kritična temperatura [°C]	Temperatura isparavanja na 0 bar [°C]	Sigurnosna klasa	Glide [°C]	Kompresorsko ulje	Sastav	Komercijalni naziv
HFC	R404A	0	3943	73	-45,5	A1	1,1	POE	R125/R143a/134a (44/52/4)	HP-62, FX-70
HFC	R407C	0	1624	87	-36,6	A1	7,4	POE	R32/125/134a (23/25/52)	Klea 66, AC9000
HFC	R410A	0	1924	72	-51,4	A1	0,1	POE	R32/125 (50/50)	AZ20, Suva 9100
HFC	R442A	0	1754	82,4	-46,5	A1		POE	R32/125/134a/152a/227ea (31/31/30/3/5)	RS-50
HFC/HFO	R448A	0	1273	83,7	-44,8	A1	8,5	POE	R32/R125/134a/1234ze/1234yf (26/26/21/7/20)	Hanywell Solstice N40
HFC	R449A	0	1282	81,5	-46	A1	8	POE	R32/125/1234yf/134a (24.3/24.7/25.3/25.7)	Opteon XP40
HFO	R452A	0	1945	77,9	-47	A1	3,82	POE	R32/R125/134a/1234yf (11/59/30)	DuPont Opteon XP44
HFO	R455A	0	146			A2L		POE		Hanywell-L40
HFC	R32	0	677	78	-52,6	A2		POE	jednogasni – nije mešavina	Daikin R32

Tabela 2. Iz programa za Apple – Danfoss Low GWP Tool ver. 2.

Konverzija R404A	Zamenjen sa	Originalni ekspanzioni ventili	Super heat	Rashladni kapacitet na -20 °C [%]	R. K. -20 °C do 0 °C	R. K. > 0 °C
	R449A	T2/TE2	1 x cw	38	37	41
	R407F	-	1/4 cw	66	53	57
	R422A	-	-	-12	-10	-8
	R407A	-	1/2 cw	40	30	34
	R444B	Te5-55	-	-12	-10	-8
	R448F	T2/Te2	1/4 cw	39	39	42
	R452A	-	1/4 cw	4	6	9

- Provera na rashladnom sistemu, šta je napisano, koje je rashladno sredstvo, kompresorsko ulje, koliko treba da ga ima po zahtevu proizvođača, zabeležiti. Pitati korisnika za dosadašnje iskustvo u ispravnosti rada i ranijim bliskim popravkama. Ubeležiti temperature i pritiske postignute na probnom radu 10–15 minuta i na grejanju da bi se vratilo ulje u kompresor i izbeglo raslojavanje sastavnih komponenti rashladnog sredstva, izvlačenje rashladnog sredstva rastvorenog u ulju.
- Izvlačenje postojećeg R404A, primenjujući dobru servisnu praksu – recovery – u već vakuumiranu rezervnu bocu. Obično je uređaj u ispravnom – radnom stanju – i treba prikupiti rashladno sredstvo u tačnoj fazi u prijemnik do postizanja -0,8 bar vakuuma (25 inča). Zabeležiti izvučenu količinu starog rashladnog sredstva.
- Zamena sušača i filtera komp. ulja – kada već otvaramo sistem, da ne bismo opet samo zbog toga otvarali sistem. Sistem je vrlo osetljiv na vlagu.
- Ne ostavljati sistem otvoren duže od 10 minuta jer je POE ulje vrlo higroskopno, pa da ne bismo i njega morali da menjamo. Proveriti i imati u rezervi odgovarajuće ulje koje preporučuje proizvođač kompresora (npr. Co-

peland preporučuje Emkarte RL32-3MAT ili Mobil Artic EAL 22CC). Ulje proveriti na kiselost ili na promenu boje.

- Vakuumiranje do 500 mmHg (Emerson 0,3 mbar) vakuuma sa obe strane rashladnog sistema istovremeno. Zatim isključimo vakuum-pumpu i ako se posle 5 minuta ne podigne iznad 1000 mmHg, tek onda punimo sistem. Ako se pritisak podigne iznad 1000 mmHg, ponavljamo postupak dok ne zadovolji uslov.
- Provera narušenosti potrebnog rashladnog kapaciteta – da ne bi uređaj radio duže i samim tim skratio vek trajanja kompresora, izborom novog rashladnog sredstva.
- Zbog različite gustine i masenog protoka proveriti dimenzije cevi na pad pritiska i brzinu protoka gasa, zbog potrebnog povratka ulja u kompresor. U slučaju značajne promene masenog protoka moguće je da postoji potreba za zamenom i ekspanzionog ventila. Primer je R444B – za koje Danfoss u svojoj aplikaciji "Danfoss low GWP Tools – ver. 2" zahteva zamenu ekspanzionog ventila T2/TE2 za TE5 – za klasu veći protok fluida.
- Napunite instalaciju, bez pokretanja rashladnog uređaja, zamenom za R404A – prvo punjenje je oko 85% predviđenog punjenja. Sačekati da se rashladno sredstvo rasporedi u instalaciji i tek onda dodati predviđeni ostatak po pokretanju rashladnog uređaja u rad. Obavezno koristiti vagu za merenje težine usipane količine rashladnog sredstva. Videti da li proizvođač predviđa različitu količinu (npr. R448A +4%, R452A +2%) i to obavezno samo u tačnoj fazi. Da ne bismo uništili kompresor, dozvoljeno je usisni pritisak podići do 25 psi (za oko 1,7 bar) najviše i da se ne čuju pločice na izduvnim ventilima na pločici kompresora.
- Proveriti na curenje rashladnog sredstva iz instalacije. Postoje novi detektori curenja (i za R448A).
- Proveriti/podesiti TEX na pregrevanje gasa na ulasku u kompresor radi njegove sigurnosti, superheat Δt [K] po tablici pritisak/temperatura rose. Ako vidimo da se usisna cev u kompresor ledi, zatvoriti TEX ekspanzioni ventil za 1/2 kruga. Pothlađivanje se posmatra po tablici u odnosu na temperaturu ključanja. Provera projektovane temperature kondenzacije – osrednjena temperatura [(ulazna + izlazna temperatura na kondenzatoru)/2] na pritisku kondenzacije. Temperatura isparavanja je osrednjena temperatura ulaza i izlaza iz isparivača na pritisku isparavanja.

11. Proveriti i podesiti ostale prekidače: sigurnosne, automatu, presostate, na nove temperature, pritiske itd.
12. Na instalaciji obavezno označiti koje je novo rashladno sredstvo i koliko je uneto u sistem, tip kompresorskog ulja; regulativa EU F-gas 842/2006+ EU1494/2007.

4. Provera energetske efikasnosti nekih sintetičkih rashladnih sredstava izračunavajući COP pri hlađenju i pri grejanju – COP_g kao toplotna pumpa

U sledećim tabelama (od 3 do 9) dati su rezultati proračuna za definisane uslove rada rashladne mašine. Temperatura kondenzacije iznosila je 50 °C, dok su temperature prethlađivanja kondenzata i pregrevanja pare rashladnog fluida 2 °C, odnosno 5 °C. Izračunate vrednosti dobijene su na osnovu podataka iz programa Bitzer za fluide koji su bili na raspolaganju, uz važnu napomenu da je rashladna snaga kompresora označena sa F_{i0} , potrebna toplotna snaga kondenzatora sa F_{ikd} , efektivna snaga na vratilu kompresora sa P_{ef} . COP predstavlja koeficijent hlađenja rashladne instalacije, dok je COP_g koeficijent grejanja, tj. korisnosti rashladnog sistema koji radi kao toplotna pumpa.

Uslovi rada rashladne mašine, tj. toplotne pumpe su:

$$t_{\text{pothlađivanja}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{pregrevanja}} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{kondenzacije}} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabela 3. Karakteristike rashladnog sistema sa fluidom R404A

404A	F_{i0}	P_{ef}	COP	F_{ikd}	COP _g	t_{disch}
-20	5,52	4,32	1,28	9,84	2,28	82,1
-15	7,19	4,85	1,48	12,04	2,48	78,5
-10	9,22	5,35	1,72	14,57	2,72	75,40
-5	11,64	5,81	2	17,45	3,00	72,9
0	14,53	6,22	2,34	20,7	3,33	70,7
5	17,94	6,57	2,73	24,5	3,73	68,8

Tabela 4. Karakteristike rashladnog sistema sa fluidom R407A

407A	F_{i0}	P_{ef}	COP	F_{ikd}	COP _g	t_{disch}
-20	5,28	3,62	1,46	8,9	2,46	101,4
-15	7,05	4,18	1,69	11,22	2,68	95,2
-10	9,19	4,72	1,95	13,92	2,95	90
-5	11,77	5,24	2,25	17,01	3,25	85,6
0	14,85	5,71	2,60	20,6	3,61	81,7
5	18,51	6,13	3,02	24,6	4,01	78,4

Tabela 5. Karakteristike rashladnog sistema sa fluidom R407C

407C	F_{i0}	P_{ef}	COP	F_{ikd}	COP _g	t_{disch}
-20	4,86	3,2	1,52	8,06	2,52	106,1
-15	6,55	3,73	1,76	10,28	2,76	99,1
-10	8,6	4,26	2,02	12,86	3,02	93,6
-5	11,05	4,78	2,31	15,84	3,31	88,9
0	13,98	5,28	2,65	19,26	3,65	85,1
5	17,45	5,74	3,04	23,2	4,04	81,7

Tabela 6. Karakteristike rashladnog sistema sa fluidom R407F

407F	F_{i0}	P_{ef}	COP	F_{ikd}	COP _g	t_{disch}
-20	5,82	3,85	1,51	9,68	2,51	108,8
-15	7,73	4,45	1,74	12,18	2,74	101,6
-10	10,03	5,03	1,99	15,06	2,99	95,6
-5	12,78	5,58	2,29	18,36	3,29	90,3
0	16,06	6,08	2,64	22,1	3,63	85,8
5	19,92	6,52	3,06	26,4	4,05	81,8

Tabela 7. Karakteristike rashladnog sistema sa fluidom R410A

410A	F_{i0}	P_{ef}	COP	F_{ikd}	COP _g	t_{disch}
-20	4,45	3,13	1,42	7,58	2,42	117,1
-15	5,75	3,54	1,62	9,29	2,62	109,5
-10	7,27	3,92	1,85	11,19	2,85	103
-5	9,04	4,26	2,12	13,29	3,12	97,5
0	11,08	4,55	2,44	15,63	3,44	92,5
5	13,42	4,8	2,80	18,2	3,79	88

Tabela 8. Karakteristike rashladnog sistema sa fluidom R448A

448A	F_{i0}	P_{ef}	COP	F_{ikd}	COP _g	t_{disch}
-20	5,59	3,8	1,47	9,39	2,47	101,9
-15	7,4	4,36	1,70	11,76	2,70	95,7
-10	9,59	4,9	1,96	14,49	2,96	90,4
-5	12,22	5,4	2,26	17,62	3,26	85,9
0	15,35	5,84	2,63	21,2	3,63	81,9
5	19,05	6,22	3,06	25,3	4,07	78,4

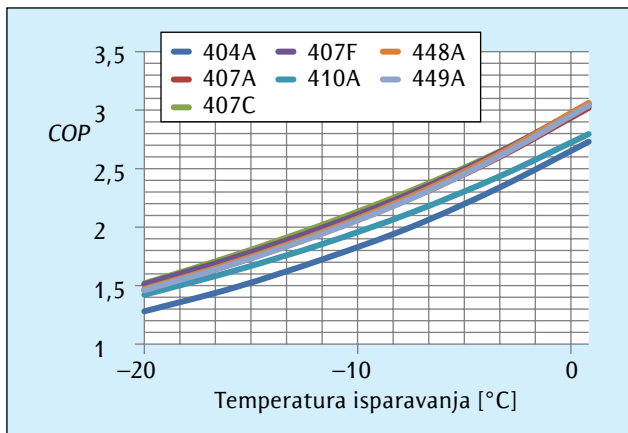
Tabela 9. Karakteristike rashladnog sistema sa fluidom R449A

449A	F_{i0}	P_{ef}	COP	F_{ikd}	COP _g	t_{disch}
-20	5,55	3,8	1,46	9,35	2,46	101
-15	7,34	4,36	1,68	11,7	2,68	95
-10	9,52	4,9	1,94	14,41	2,94	89,8
-5	12,12	5,4	2,24	17,52	3,24	85,4
0	15,23	5,84	2,61	21,1	3,61	81,5
5	18,91	6,22	3,04	25,1	4,04	78,1

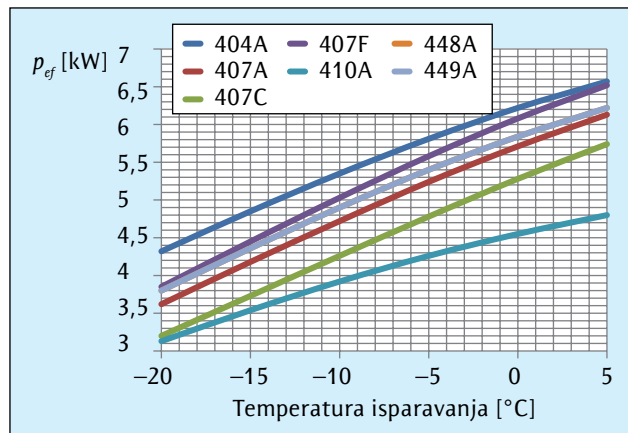
U nastavku rada dati su grafički rezultati proračuna, na dijagramima 1 do 4, na kojima se jasno vidi promena razmatrane karakteristike rashladnog sistema (toplotne pumpe) u zavisnosti od promene temperature isparavanja i u zavisnosti od korišćenog rashladnog fluida.

Na dijagramu 1 data je promena vrednosti COP pri hlađenju, pri čemu sa porastom temperature isparavanja raste vrednost COP. Takođe se vidi da je sistem koji je radio u ovako definisanim uslovima sa freonom R449A imao najlošije karakteristike (ispod R404A), dok su sistemi sa freonima R407C i R407F jako slični i imali su najveće vrednosti COP (iznad R404A). Instalacije sa R407A i 448A su jako blizu po vrednostima COP kao i R407C i R407F.

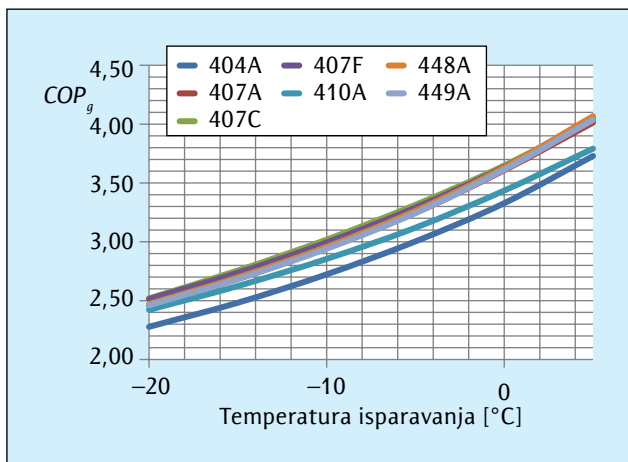
Dijagram 2 prikazuje promenu vrednosti COP_g u režimu grejanja, tj. kada rashladnu mašinu posmatramo kao toplotnu pumpu. Može se primeniti ista analiza kao i za prethodni dijagram.



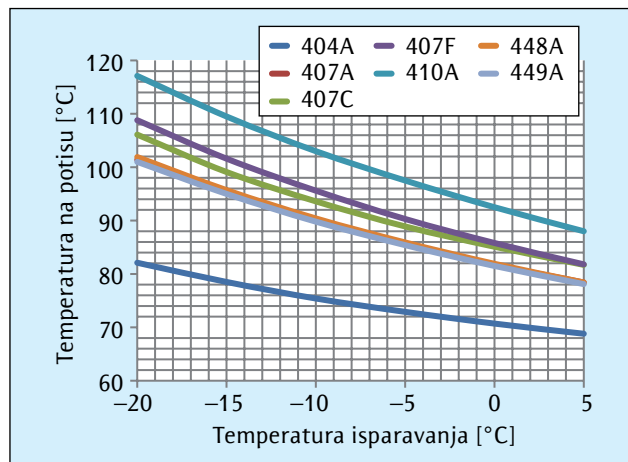
Dijagram 1. Vrednosti COP pri hlađenju



Dijagram 3. Električna snaga kompresora



Dijagram 2. Vrednosti COP_g pri grejanju (toplotna pumpa)



Dijagram 4. Temperatura na potisu kompresora

Na dijagramu 3 se vidi promena električne snage kompresora u zavisnosti od temperature isparavanja. Na osnovu analize i dijagrama jasno je da bi rashladni sistemi sa R410A i R407C trošili najmanje električne energije za pogon kompresora, dok su sistemi sa R404A i R407F u vrhu potrošnje.

Dijagram 4 prikazuje vrednosti temperature na potisu kompresora u zavisnosti od primenjenih rashladnih fluida. Najviše vrednosti temperature na potisu imaju sistemi sa R410A i R407F. Freoni R407A, R448A i R449A su u srednjem opsegu sa veoma sličnim vrednostima, dok najniže temperature ima R404A.

5. Zaključak

Na osnovu prethodno rečenog vidi se da freoni R410A, R407F, R407A, R407C, R448A i R449A predstavljaju dobru (trenutnu) zamenu R404A uz postojanje tendencije vraćanja prirodnim rashladnim fluidima (ugljen-dioksid, amonijak i dr.). Takođe, mora se navesti i sledeće:

- Uvek se prvo treba posvetiti pripremanju, tj. šta se menja i čime menja, kao i analizi šta bi trebalo da se dobije. Dijagrami ili tablice rashladnog fluida spremite pre početka postupka konverzije.
- HFC rešenja se polako gube a tržište stižu nove zamene HFO ili ugradnja u nove instalacije.
- Veliki proizvođači još uvek traže i u laboratorijama i u praksi proveravaju nove mešavine. Samo dva nova molekula su do sada u igri (R1234yf i R1234ze). Treba sačekati firmu Daikin kao najvećeg svetskog proizvođača po količini rashladnih sredstava da ponudi nova rešenja kao

zamenu za R32 (najavljenu), za primenu u oblasti niskih temperatura.

- Iz dijagrama 1 i 2 se vidi da svako rashladno sredstvo ima svoje podatke, izračunavajući COP za hlađenje i COP_g za toplotne pumpe koje treba dalje istraživati.
- Direktiva EU 517/2014 sada obuhvata i sredstva u rashladnom transportu, gde se već dve godine uspešno koristi HFO R452A kojim je zamenjen HFC R404A.
- Direktive EU 2006/40/EC i EU307/2008 za putničke automobile traži korišćenje rashladnog fluida sa GWP manjim od 150, čime se onemogućava dalje korišćenje R134a (GWP od 1430), što se danas postiže sa R1234yf (<1).
- Uvoz u Srbiju samostalno za sva rashladna sredstva je komplikovan posao i ide preko dva ministarstva.
- Boja kontejnera je bela za povratne boce sa dvostrukim ventilom – tečnu i gasnu fazu, tako da ASHRAE-ove boje dolaze do izražaja samo na instalacijama – bocama riverse-ra rashladne instalacije.

6. Literatura

- [1] *** http://mnashrae.org/downloads/refrigerant_preso_ashrae_2016_rs.pdf
- [2] *** *Working Fluids for Mechanical Refrigeration*, Alberto Cavallini, Int. J. Refrig., Vol. 19. No. 8, pp. 485–496, 1996
- [3] *** <https://www.honeywell-refrigerants.com/americas/?document=retrofit-guide-convert-r-404a-r-507-to-solstice-n40&download=1>
- [4] **Yans Motta, S., M. Spatz**, *Low GWP Replacement for R404A in Commercial Refrigeration Applications*, Honeywell International, 20 Peabody Street, Buffalo, NY 14210

- [5] **Black, J.**, *EU F-Gas Regulation: Impact on R404A and Opportunity for R442A (RS-50)*, Jon Black, http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/R442A%20replacement%20for%20R404A%20Insight%20document17_122200.pdf?v=3.0
- [6] *** http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Guide%20to%20F-gas%20regulations17_130947.pdf?v=5.0
- [7] *** <http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/01/DKRCC.PB.000.B2.22.pdf>
- [8] **Akdemir, S., S. Arin**, *Determination of Cooling Effect of R12 and R404A*, *J. Biol. Sci.* (2003), 3, pp. 1114–1125.
- [9] *** http://www.emersonclimate.com/europe/ProductDocuments/CopelandLiterature/CC072603_1012_0515_E_Refrigerant%20change-over%20R404A%20to%20HFC%20R407AF%20R448A%20R449A_0.pdf
- [10] *** Program REF ProP. Verzija 9.2.
- [11] *** Danfoss-ova aplikacija samo za Apple – Low GWP Tool Ver. 2.

kgh