BIBLID 0350–1426 (206) 43:1 p. 85–90

UPOTREBA AMONIJAKA U HLAĐENJU I PRIMENI TOPLOTNIH PUMPI. PREDNOSTI, NEDOSTACI I CRNE RUPE

GERT NIELSEN, Multiconsult, Div. Industry, Oil and Gas, Nesttun, Norway, gert.nielsen@multiconsult.no

Primena komfornog hlađenja i toplotnih pumpi u administrativnim zgradama, naglo se povećava. Potrošnja energije u takvoj primeni je često zanemarena. Dobar izbor rashladnih fluida i projekta postrojenja obično se ne prihvata, jer se prednost daje kratkoročnom ulaganju. Tome doprinosi i sveopšte odsustvo kompetencije društava za KGH u pogledu rada i projekta postojećeg rashladnog postrojenja.

KLJUČNE REČI: komforno hlađenje; toplotna pumpa; amonijak kao rashladni fluid; administrativne zgrade; primena

USE OF AMMONIA IN COMFORT COOLING AND HEAT PUMP APPLICATIONS. ADVANTAGES, DRAW-BACKS AND BLACK HOLES

The use of comfort cooling and heat pumps in office buildings is rapidly increasing. Energy consumption in these applications is often neglected. A good choice of refrigerant and plant design is more often than not discarded in favour of short term investment considerations. This is not helped by an overall lack of competence in the HVAC societies with regard to the actual running and design of refrigeration plant.

KEY WORDS: comfort cooling; heat pump; ammonia as a refrigerant; applications; office buildings

1. Uvod

Zahvaljujući mnogim pogrešno projektovanim rashladnim postrojenjima koja i rade loše, u celoj Norveškoj, mi u Multiconsult-u smo sastavili niz smernica koje treba poštovati pri projektovanju sistema komfornog hlađenja. Osnovna teza je da su „prirodni rashladni fluidi prirodan izbor“, koji će u najvećem broju slučajeva biti amonijak.

Naravno, to se ne događa preko noći ili bez sukoba, posebno onih sa inženjerima koji veruju da znaju kako se projektuje postrojenje, ali se često pokaže da su njihove sposobnosti u ovoj oblasti ispod proseka. Zbog toga radimo neprekidno na podizanju svesti svojih kolega o implicitnim koristima od primene prirodnih radnih fluida u toplotnim pumpama i komfornom hlađenju. Industrijskim hlađenjem, na primer, danas dominiraju rashladni sistemi sa amonijakom.

2. Demitologizacija

Mit: amonijak je eksplozivan.

Činjenica: To je toliko pogrešno da predstavlja besmislicu. Amonijak je zapaljiv, ali ne i eksplozivan. LFL/UFL amonijaka je 15%vol/29%vol. Da bi došlo do paljenja, njegov izvor treba da ima temperaturu iznad 629 °C. Energija razvijena u vatri amonijaka je toliko mala, da vatra nije u stanju da se održi. Do vatre može doći samo u zatvorenom prostoru.

3. Idealna termodinamička svojstva rashladnih fluida

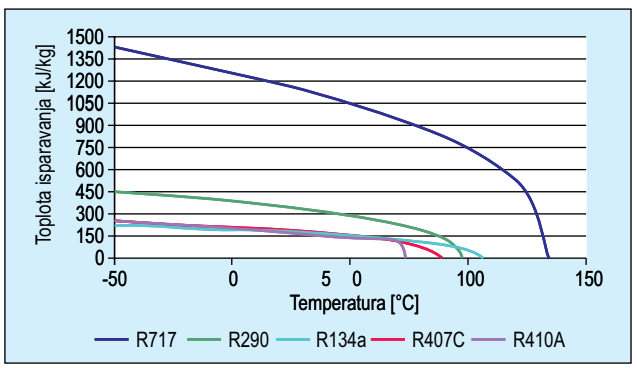
1) Visoka toplota isparavanja.
2) Velika gustina pare, da bi se smanjila radna zapremina kompresora.
3) Mala gustina pare, da bi se dostigao najbolji mogući proces kompresije.
4) Mali toplotni kapacitet tečnosti u odnosu na toplotu isparavanja, da bi se smanjila količina pare koja nastaje prilikom naglog sniženja pritiska (fleš-gas).
5) Veliki toplotni kapacitet pare, da bi se snizila temperatura na izlazu iz kompresora.
6) Visok kritični pritisak.
7) Visoka kritična temperatura.
8) Hemijska stabilnost na visokim temperaturama.
9) Dobra toplotna provodljivost i u tečnoj i u parnoj fazi.

Kao što se može videti, neka od ovih željenih svojstava međusobno se isključuju.

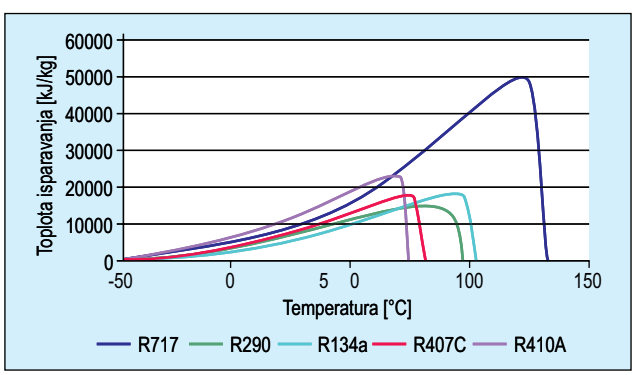
U nastavku ćemo uporediti dva prirodna rashladna fluida, amonijak (R717) i propan (R290), jedan jednokomponentni veštački rashladni fluid, R134a, i dve zeotropne mešavine, R407C i R410A.

3.1. Visoka toplota isparavanja i velika gustina

Na sl. 1 se vidi specifična toplota isparavanja ovde pomenutih supstanci.



Slika 1. Toplota isparavanja u odnosu na temperaturu isparavanja



Slika 2. Zapreminska toplota isparavanja u odnosu na temperaturu isparavanja

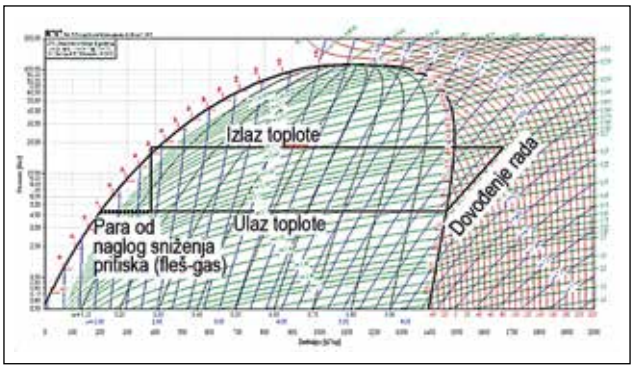
Sasvim je jasno da je toplota isparavanja amonijaka mnogo veća od drugih supstanci. U proseku je za propan faktor 3–4, a za veštačke supstance, 6–8. Međutim, kada gledamo na toplotu isparavanja u odnosu na specifičnu zapreminu, vidimo zašto je poželjan zapreminski protok kojim kompresor i postrojenja manipulišu.

3.2. Mali toplotni kapacitet tečnosti u odnosu na toplotu isparavanja

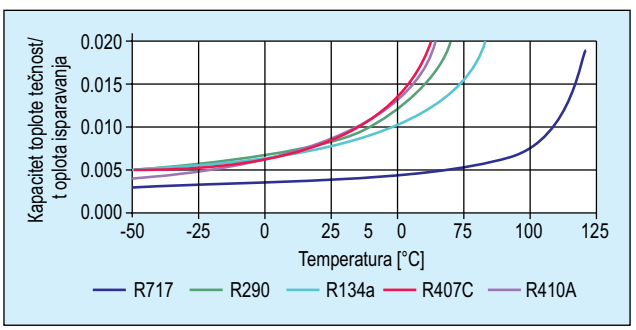
Proizvodnju pare (fleš-gas) pri prelasku sa jednog nivoa pritiska na drugi, pokojni Gustav Lorencen, sa norveškog NTNU, nazvao je „unutrašnje krvarenje u hlađenju“. Kao što se vidi na sl. 3, para od naglog sniženja pritiska ozbiljno utiče na karakteristike rashladnog ciklusa, jer kompresor mora da manipuliše ne samo sa isparelim gasom, već i sa parom od naglog sniženja pritiska.

Proizvodnja ove pare je određena nagibom linije zasićene tečnosti u odnosu na toplotu isparavanja (nagib izražava toplotni kapacitet tečnosti). Što je linija niža, toplotni kapacitet je veći.

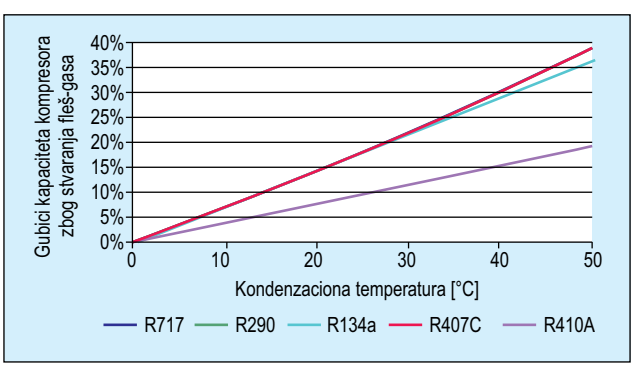
Kada ovo detaljnije ispitamo, nalazimo da je, u odnosu na toplotu isparavanja, amonijak supstanca koja trpi manji uticaj nego druge. Preostali deo je sasvim sličan svuda u normalnom polju rada.



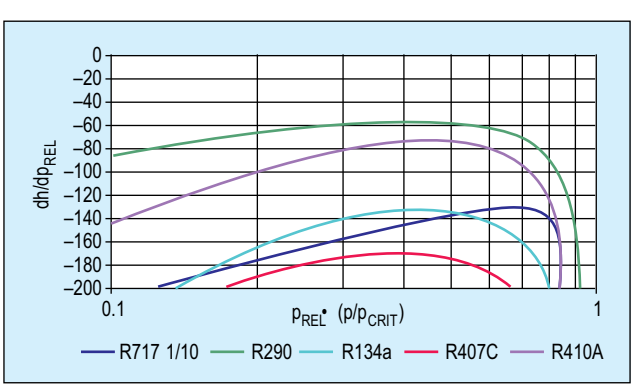
Slika 3. Teoretski rashladni proces sa izentropskom kompresijom



Slika 4. Toplotni kapacitet tečnosti u odnosu na toplotu isparavanja



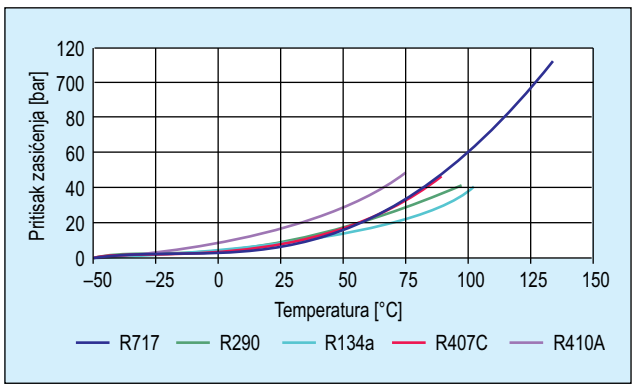
Slika 5. Gubitak kapaciteta kompresora zbog isparavanja prilikom prigušivanja



Slika 6. Smanjenje toplote isparavanja u odnosu na kritični pritisak

Da bismo uporedili smanjenje toplote isparavanja različitih rashladnih fluida, menjamo pritisak u relativni pritisak. Na

taj način se sasvim jasno daje obrazac do kog maksimalnog pritiska bi trebalo projektovati jedan normalan proces isparavanja/kondenzacije. Ispostavilo se da bi gornja granica trebalo da bude približno polovina kritičnog pritiska. Za R410A, rezultat se neznatno razlikuje, dostižući maksimum na oko 2/3 kritičnog pritiska.



Slika 7. Krive zasićenja za različite rashladne fluide

Upoređujući to sa krivama zasićenja, prikazanim na sl. 7, dostižemo maksimum preporučljivih temperatura kondenzacije.

Tabela 1. Maksimum pritiska i temperature kondenzacije

Rashladni fluid	Maksimalni relativni pritisak	Maksimalni pritisak kondenzacije [bar]	Maksimalna temperatura kondenzacije[1)] [°C]
R717	0,50	56,5	95
R290	0,50	21,2	59
R134a	0,50	20,3	68
R410A	0,67	33,2	55
R407C	0,45	20,8	52

[1)] *Pošto kod R410A i R407C postoji temperaturno klizanje, kao našu radnu tačku koristimo tačku rose.*

To takođe objašnjava zašto su poželjni visoka kritična temperatura i pritisak, jer pružaju veću prihvatljivu oblast rada.

3.3. Efikasnost procesa

Efikasnost procesa je opisana jednim brojem – koeficijentom hlađenja (COP). Kada uporedimo idealni i stvarni COP za izabrane rashladne fluide, nalazimo da je razlika između idealnog i stvarnog procesa veoma velika.

To treba učiniti sa svojstvima različitih rashladnih fluida, posebno sa molarnom masom. Što je supstanca lakša, unutrašnji gubici usled kompresije biće manji. Ili, da pojednostavimo, „što je masa manja, lakše će se proći kroz kompresor“.

Tabela 2. Molarna masa rashladnih fluida

Rashladni fluid	R717	R290	R134a	R407C	R410A
Molekularna težina	17,03	44,1	102	86,2	72,6

Sudeći prema tabeli 2, očekivali bismo da će i R407C i R410A imati bolji učinak od R134a. Imajući na umu da su oba rashladna fluida mešavine, moramo da pogledamo supstance koje ulaze u sastav mešavina. R407C je mešavina koju čine R32 (23%), R125 (25%) i R134a (52%), dok je R410A sastavljen od R32 (50%) i R125 (50%). Molekularna težina ovih sastavnih delova kreće se od 52 (R32) do 120 (R125) i u rashladnom ciklusu, a naročito tokom kompresije, one nisu u ulozi jedne supstance, nego mešavine, što znači da deo R125 mešavine ozbiljno utiče na ukupan rezultat.

Zaključak, do sada, jeste da je amonijak termodinamički najbolji rashladni fluid u oblasti rada koji se odnosi na komforno hlađenje i toplotne pumpe.

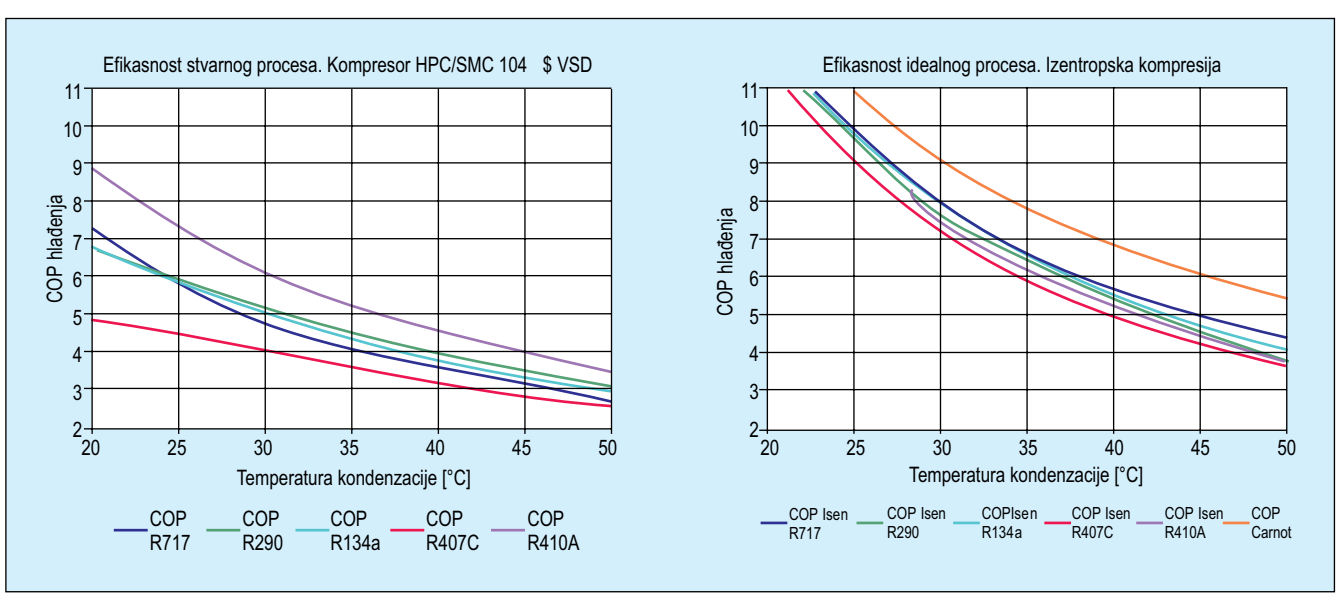
4. Razmatranje praktičnog projektovanja

4.1. Materijali

Amonijak je veoma korozivan u dodiru sa bakrom i legurama bakra. Zato su amonijačni sistemi obično izrađeni od čelika. To znači da će amonijačni sistemi koristiti zavarene cevne spojeve, dok će ostali rashladni fluidi obično imati lemljene bakarne cevovode. Već to amonijačnim sistemima daje neuglađen, robustan oblik, koji najčešće produžava život u odnosu na bakarne sisteme po faktoru 1,5 do 2.

4.2. Proces kompresije i uticaj na izbor isparivača

U poređenju sa izlaznim temperaturama drugih rashladnih fluida, vidimo da amonijak ima tendenciju da se znat-



Slika 8. COP idealnog procesa i COP stvarnog procesa

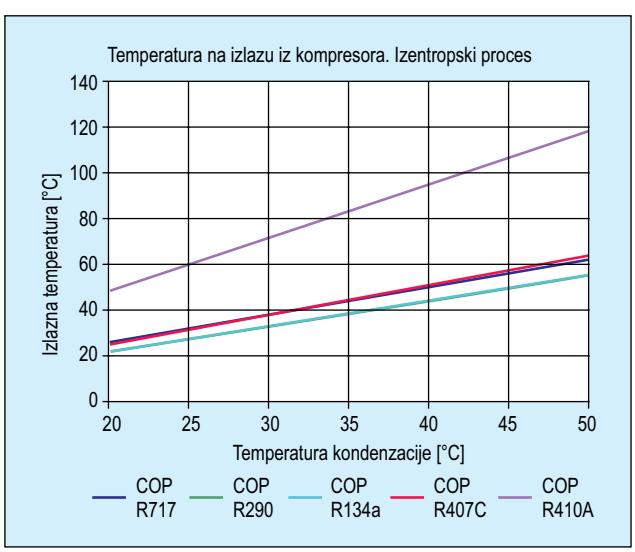
no ugreje, zbog činjenice da je zapreminski protok veoma veliki u poređenju sa masenim protokom . Kada se pogleda šta se događa kada se para u isparivaču pregreje s obzirom na COP, očigledno je da bi pregrevanje u isparivaču trebalo izbegavati, mada izgleda da je to korisno u sistemima koji koriste druge rashladne fluide. Što se tiče medijuma R4XX, pregrevanje je neophodno, da bi se obezbedilo da sve frakcije mešavine sasvim ispare.

4.3. Izbor isparivača

On ukazuje na deo projekta amonijačnih sistema koji će se razlikovati od projekta za ostale rashladne fluide, ne samo u pogledu izbora materijala. Kao što se može videti na sl. 9 i 10, biće korisno imati usisni gas što je bliže moguće zasićenoj pari. Zato će amonijačni sistem obično koristiti preplavljene isparivače sa separatorom tečnosti, obezbeđujući da tečnost ne uđe u kompresor i u isto vreme osiguravajući da para ne bude pregrejana, već uglavnom zasićena.

To čini da amonijačni sistemi izgledaju veliki i glomazni, u poređenju sa sistemima sa direktnom ekspanzijom (DX) gde se rashladni fluid pregreva u isparivaču. To smanjuje efikasnost isparivača, jer se prenos toplote u pregrejanoj zoni odvija preko gasa a ne preko tečnosti.

Preplavljeni isparivački sistemi su praktično imuni na curenje rashladnog fluida, dok su karakteristike i efikasnost sistema DX vrlo osetljivi na curenje. U bakarnom sistemu godišnje curenje iznosi približno 5% punjenja, što se smatra normalnim.

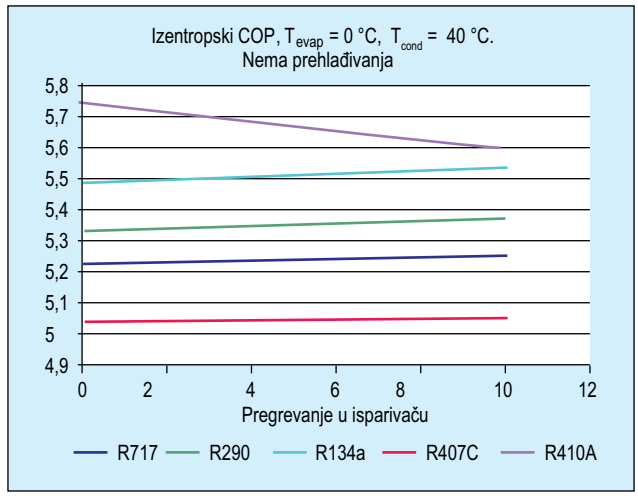


Slika 9. Temperatura na izlazu iz kompresora u odnosu na temperaturu kondenzacije

4.4. Ekspanzioni ventil

Sistemi DX koriste ekspanzione ventile za manipulisanje prenosom tečnosti sa strane visokog pritiska na stranu niskog pritiska. Svrha ekspanzionog ventila je dvostruka; on treba da osigura drenažu kondenzatora i dovoljno napajanje isparivača tečnošću. On vrši regulaciju merenjem temperaturske razlike između tečnosti, neposredno nakon pada pritiska i na cevovodu iza isparivača. Njegova svrha je da održava dato pregrevanje, obezbeđujući time dovoljno hlađenje, kao i isporuku gasa kompresoru.

Ovi ekspanzioni ventili se proizvode u dve osnovne verzije – kao elektronski ekspanzioni ventili i kao termostatski ekspanzioni ventili. Ovi drugi imaju veoma malu moć regulacije sistema u režimima koji odstupaju od projektovanog, posebno kada pritisak kondenzatora varira. To dovodi do



Slika 10. Izentropski COP u zavisnosti od pregrevanja na isparivaču

Slika 11. Klasično amonijačno rešenje

nepotrebno visokog pritiska kondenzatora i često nepotrebno niskih temperatura isparavanja u slučaju odstupanja režima od projektovanog.

Elektronski ekspanzioni ventil je u stanju da reguliše ceo sistem i omogući dobru i pouzdanu regulaciju u velikom opsegu radnih uslova.

Za obe vrste ventila, regulacija postrojenja je kombinacija regulacije ventilom i kompresorom. To često može dovesti do „hantovanja“ kada dve komponente ne mogu naći jedan uravnotežen režim rada.

Preplavljeni isparivački sistemi ne koriste ekspanzione ventile, nego ventile sa plovkom koji regulišu nivoe tečnosti, ili visokopritisne ventile sa plovkom koji će obezbediti drenažu tečnog rashladnog fluida iz kondenzatora, ili niskopritisne ventile sa plovkom koji reguliše nivo tečnosti u separatoru tečnosti. To znači da je regulacija postrojenja samo u kompresoru, čime se eliminiše izvor grešaka.

4.5. Ulje

Kao što je dr Endi Pirson često govorio: „Onoga dana kada budemo mogli otkloniti ulje iz rashladnih sistema, život će postati mnogo lakši.“ Nažalost, još nismo dotle došli. Zato je uljni sistem deo onoga što moramo razmatrati. Prvi deo manipulacije uljem je imati dobar separator ulja na potisu kompresora, koji smanjuje odnošenje ulja u instalaciju. Sa uljem koje ode u instalaciju moramo nekako izaći na kraj.

Opet vidimo razliku između amonijačnih i ostalih sistema. U neamonijačnim sistemima se obično koristi ulje koje se ne meša sa rashladnim fluidom i da bi se osigurao prenos ulja iz isparivača u kompresor, brzina pare rashladnog fluida treba da bude dovoljno velika da bi obezbedila povlačenje ulja. U amonijačnim sistemima, ulje se obično ne meša sa amonijakom, tako da će se ono zadržati u separatoru tečnosti. Pošto je ulje teže od tečnog amonijaka, ono će teći do najniže tačke u separatoru, odakle se vraća do usisne linije kompresora, obično pomoću ejektora koji koristi topli gas kao pogonski fluid.

4.6. Punjenje rashladnim fluidom

Kao što se vidi na sl. 1, specifična toplota isparavanja amonijaka je mnogo veća od specifične toplote bilo kog drugog rashladnog fluida. Ona se prenosi na uobičajeno manje amonijačno punjenje, čak i kada se koriste preplavljeni isparivači. Pravilo potvrđeno u praksi za amonijačne sisteme je približno 100 g/kW, dok neamonijačni sistemi obično imaju punjenje od 300 g/kW.

4.7. Kompresori

Sistemi sa neamonijačnim kompresorima mogu koristiti hermetičke i poluhermetičke kompresore, kao i otvorene kompresore, dok amonijačni sistemi obično neće biti u stanju da koriste ništa osim otvorenih kompresora. Poluhermetički i hermetički kompresori koriste usisnu paru za hlađenje kompresorskog motora, vodeći gas preko motora pre nego što dopre do usisnog otvora kompresora.

Kao što smo videli u prethodnom tekstu, to bi negativno uticalo na efikasnost ciklusa. Uticaj ovog načina hlađenja motora je kompromitovanje zapreminske efikasnosti kompresora, jer se para širi pri zagrevanju, tako da to ekstra zagrevanje pre usisnog otvora znači da je maseni protok kroz kompresor smanjen, a time i kapacitet.

4.7.1. Vijčani kompresori sa dva rotora/klipni

Vijčani i scroll kompresori su oni sa fiksiranom geometrijom, što znači da je njihov stepen sabijanja ugrađen. U slučaju vijčanih kompresora, zasuni za regulaciju kapaciteta i zapreminskog odnosa pomažu podešavanju rada kompresora, dok su skroll kompresor u tom pogledu fiksni.

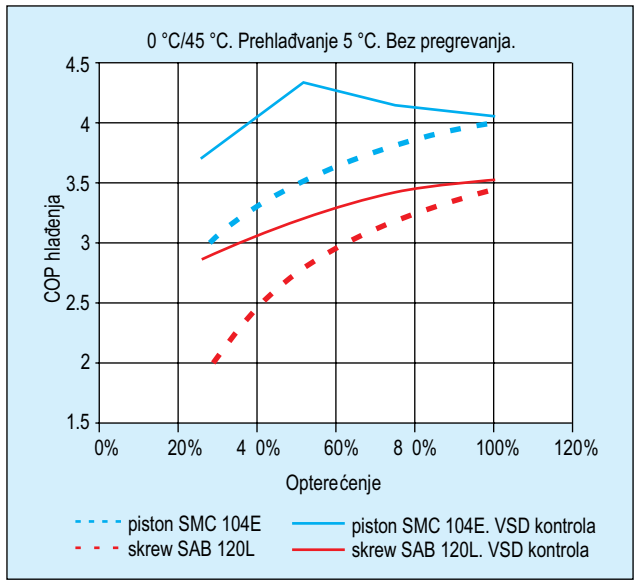
S druge strane, klipni kompresori se samopodešavaju prema okolnim nivoima pritiska, omogućujući time mnogo viši stepen fleksibilnosti.

Danas primena VSD (promenljive brzine pogona) omogućuje rashladnoj industriji mnogo precizniji i adaptabilniji režim regulacije. Kao što se vidi na slici 12, klipni kompresor će stvarno postati efikasniji pri parcijalnom opterećenju kada se reguliše pomoću VSD-a.

Kada se upoređuju sistemi sličnog rashladnog kapaciteta, često će se naći da amonijačni sistemi mogu koristiti klipne kompresore, gde R134a i R407c treba da koriste vijčani kompresor, pošto je zapreminski protok kroz te kompresore obično mnogo veći nego kroz klipne, pa su oni zbog toga, kada se koriste ovi rashladni fluidi, pogodniji za ostvarivanje zahteva za većim protokom. To, međutim, vodi ka daljem smanjenju efikasnosti sistema.

5. Životna sredina

Kao što tabela 3 pokazuje, fluorizovani gasovi su veoma „efikasni“ u pogledu efekta staklene bašte. To znači da 1 kg R410A ima uticaj na efekat staklene bašte koji odgovara 2088 kg CO_2. U Evropskoj uniji, sadašnji predlog u vezi sa F-gasom propisuje da jedno rashladno postrojenje od 2020. godine ne može da sadrži veću količinu F-gasa od one koja



Slika 12. Poređenje koeficijenata hlađenja vijčanog i klipnog kompresora

je ekvivalentna sa 5000 kg CO_2. To podrazumeva sledeća ograničenja (tabela 4).

Tabela 3. Potencijal globalnog zagrevanja rashladnog fluida tretiranog u ovom tekstu

	R717	R290	R134a	R407C	R410A
GWP – 100 god.	0	3,3	1430	1774	2088

Tabela 4. Maksimalno punjenje prema revidiranoj Direktivi o F-gasu

	R717	R290	R134a	R407C	R410A
Maksimalno punjenje [kg]	nije značajno	nije značajno	3,5	2,8	3,4
100 g/kW			35,0 kW	28,0 kW	24 kW
300 g/kW			11,7 kW	9,3 kW	8 kW

6. Ekonomija

Kada se sugeriše korišćenje amonijačnog postrojenja kao najbolje rešenje, često se dobija odgovor poput: „Jeste li ludi! To je isuviše skupo!“

Naš odgovor na ovo u osnovi je sledeći:

1) Amonijačno postrojenje će imati vek trajanja koji je više nego dvostruko duži od drugih rashladnih fluida.
2) Ako nastojimo da ostvarimo sličan kvalitet izrade na postrojenju sa R134a, to bi koštalo približno 180% troškova amonijačnog postrojenja. Velika zbrka pre nekoliko godina naučila nas je tome.
3) Kada stvarna ponuda iznosi 65–70% amonijačne cene, onda se prave izvesni kompromisi.
4) Šta mislite da je „skupo“:
   a) kupovina?
   b) ili posedovanje?

Kao što se vidi u tabeli 5, mada je ulaganje u jedno amonijačno postrojenje prilično visoko u poređenju sa ostalim (140–175%) – troškovi posedovanja su stvarno manji od troškova ostalih. Razlog tome je delimično dužina veka trajanja, a delom i veća energetska efikasnost. To će doprineti lakšem budžetiranju, jer se veći deo troškova odnosi na bankarske troškove a ne slobodno plivajuće troškove energije.

Tabela 5. Godišnji troškovi posedovanja za pet različitih postrojenja koja imaju isti rashladni kapacitet

Potreba za hlađenjem	1 250 000	kWh			
„Smanjenje vršnog opterećenja indirektnim evaporativnim hlađenjem (IEH), skladištenje toplotne energije (STE) i kombinacija to dvoje“					
Proizvodni kapacitet	685	kW			
	R717	R290	R410A	R134a	R407c
Ulaganje (evra)	300 000	212 500	181 250	193 750	168 750
Vek trajanja (god.)	25	15	15	15	15
Proračunska kamata	8%	p.a.			
Godišnji troškovi kapitala (evra)	28 104	24 826	21 175	22 636	19 715
Prosečni COP	4,54	3,54	3,255	3,36	2,985
Potrošnja energije	275 330	353 107	384 025	372 024	431 779
Troškovi elektroenergije (evra/kWh)	0,1				
Godišnji troškovi energije (evra)	27 533	35 311	38 402	37 202	43 178
Godišnji troškovi održavanja (evra)	9 000	8 500	7 250	7 750	6 750
Ukupni godišnji troškovi (evra)	64 637	68 637	66 828	67 588	69 643

7. Zdravlje i sigurnost

Glavni problem u vezi sa korišćenjem amonijaka u naseljenim područjima je njegova otrovnost i paničan efekat oštrog mirisa koji on može izazvati. Kada se on proceni, potrebno je pogledati opasnosti koje amonijak predstavlja, spojene sa uobičajenim reakcijama ljudi.

Uzmimo jedan primer. Čiler sa rashladnim kapacitetom od 1000 kW ima punjenje od 100 kg. Najveći deo ovoga, odnosno oko 90%, nalazi se u tečnom obliku, u separatoru tečnosti. Isparivač ima temperaturu 4 °C, što je stanje u separatoru tečnosti. Iznenada ta tečnost je na podu, temperatura pada na –33 °C i oko 15% tečnosti će ispariti. Količina pare će zato biti 13,5 kg. Ona će zauzeti približno 20 m^3 kada naglo ispari. Prema norveškim propisima, mašinska sala mora da ima minimali broj izmena vazduha od 1100 m^3/h ili 18 m^3/minut. To znači da se amonijačna para uklanja iz prostorije u toku 2 do 3 minuta i provetrava preko krova.

Ovo samo izgleda da je lako primeniti. Ali, amonijak je otrovna materija i ne može biti spokojno tretirana. Njome treba rukovati pažljivo, ali bez straha.

8. Prednosti, nedostaci i crne rupe

Prednosti su sledeće:

– To je najefikasniji rashladni fluid.
– Ne izvaziva efekat staklene bašte.
– Omogućuje dug vek trajanja.

Tabela 6. Reakcije ljudi na amonijak (prilagođeno prema pok. Andersu Lindborgu, Ammonia Partnership)

Koncentracija gasa [ppm]	Uticaj na nezaštićenu osobu	Čovekova reakcija	Vreme izlaganja
5	Prag za određivanje		
20	Većina ljudi će primetiti	Upozorenje. Nema opasnosti	Bez ograničenja u većini zemalja
50	Veoma jak miris. Osobe koje nisu ranije upoznale miris amonijaka napustiće područje	Upozorenje. Nema opasnosti	U većini zemalja dozvoljeni maks. rada je 8 sati
100	Jak miris koji može izazvati paniku kod osoba nenaviknutih na amonijak	Nema opasnosti	Nemojte biti nezaštićeni duže od neophodnog vremena
300	Iskusno osoblje će napustiti područje	Nema opasnosti, ali je veoma neprijatno	
400–700	Momentalni nadražaj očiju i disajnih organa		U normalnim prilikama nema štete ako izloženost ovim koncentracijama traje kraće od 30 min.
1700	Povremeno slepilo		
3000	Ozbiljno oštećenje kože, očiju i disajnog sistema		
700–10000	Smrtonosno tokom nekoliko minuta		

Nedostaci su:

– potreban je poseban sistem za povratak izdvojenog ulja;
– otrovan je.

Crne rupe:

Do sada, nisam došao u dodir sa crnim rupama. Po mom mišljenju, crne rupe, kada dođe vreme rada sa amonijakom kao rashladnim fluidom, nisu deo tehnologije. Nema problema u vezi sa amonijačnim sistemima koji se ne mogu prevazići dobrim inženjerskim rešenjima i pažljivim održavanjem.

Najveći problem je u našim glavama, u našem strahu od onoga što ne znamo.

Nadam se da ovo može biti inspiracija za rad sa amonijakom u budućnosti.

kgh

steelsoft
tel.: 011. 3757 555 . 3757 107
fax: 3757 433
eml: office@steelsoft.rs
www.steelsoft.rs
Beograd. Autoput za Novi Sad 71
distribucija | veleprodaja | maloprodaja | projektovanje | inžinjering | instalacija | servis