

REKUPERACIJA

TOPLOTE U INDUSTRIJSKOM HLAĐENJU

Poslednjih godina, koncept održivosti je umnogome dobio u značaju unutar ASHRAE-a. Ovaj članak ispituje jedan vid održivosti u kontekstu industrijskih amonijačnih rashladnih sistema. U članku se ispituju pristupi koji podrazumevaju povećanje iskorišćenja primarne energije utrošene tokom rada rashladnog sistema. Naročito se razmatraju i ocenjuju pristupi prikupljanju i korišćenju energije koja se obično izbacuje iz sistema

KLJUČNE REČI: industrijsko hlađenje; amonijačni rashladni sistem; rekuperacija toplote; hladnjak ulja

Prof. dr DOUGLAS T. REINDL i dr TODD B. JEKEL,
University of Wisconsin – Madison's Industrial Refrigeration Consortium in Madison, Wis., U.S.A

HEAT RECOVERY IN INDUSTRIAL REFRIGERATION

During the past year, concepts of sustainability have received a great deal of emphasis within ASHRAE. This article explores one aspect of sustainability in the context of industrial ammonia refrigeration systems. In this article, we explore approaches of increasing the use of primary energy consumed during the course of refrigeration system operation. Specifically, approaches of gathering and using heat normally discarded from a refrigeration system are discussed and evaluated

KEY WORDS: industrial refrigeration; ammonia refrigeration system; heat recovery; oil cooler

Mnogi krajnji korisnici industrijskih rashladnih sistema su sve više usredsređeni na otkrivanje principa rada i tehnologija koje bi mogle efikasno da poboljšaju stepen korisnosti i ekonomsku isplativost njihove infrastrukture. Oni krajnji korisnici koji aktivno tragaju za mogućnostima poboljšanja energetske efikasnosti svog poslovanja, imaće trenutnu korist zahvaljujući poboljšanoj konkurentnosti, ali će pored toga biti i jedinstveno pozicionirani za nadmetanje u budućnosti, imajući u vidu cenu energije, koja će zasigurno rasti. Kako je hlađenje često najveći pojedinačni potrošač u postrojenjima

za proizvodnju i skladištenje hrane, ono predstavlja prirodnu metu prilikom poboljšanja stepena korisnosti.

Sa cenom energije koja neprekidno raste, sada je trenutak da se ponovo razmotre mogućnosti i ocene pristupi pomoću kojih je moguće bolje iskoristiti primarnu energiju u cilju postizanja radnih parametara postrojenja.

Ovde ispitujuemo mogućnosti rekuperacije toplote u sistemima industrijskog hlađenja. Korišćenje otpadne toplote nudi mogućnost smanjenja potrošnje direktne primarne energije vezane za rad industrijskog rashladnog sistema, kao i po-



Potraga za toplotom koja se može rekuperisati iz industrijskih rashladnih sistema često započinje u kompresorskoj sali

trošnje primarne energije koja se neposredno koristi za zadovoljenje potreba grejanja.

Moguće primene otpadne toplote iz industrijskih rashladnih sistema su: podno grejanje (npr. kod tunela za zamrzavanje proizvoda), predgrevanje vode koja se koristi za čišćenje, grejanje vode za potrebe domaćinstva, grejanje vode za dopunu kotla i grejanje prostora (za kontrolu i temperature i vlažnosti).

Onoliko koliko pojam rekuperacije toplote zvuči privlačno, toliko je moguća i nepravilna primena i/ili upravljanje opremom za rekuperaciju toplote, a otuda i povećanje ukupne potrošnje energije rashladnog sistema u odnosu na rad bez rekuperacije toplote. Počecemo sa upoznavanjem osnova na kojima se ova mogućnost zasniva, a zatim ćemo pružiti informacije koje bi pomogle u utvrđivanju da li rekuperacija toplote može naći primenu u datom postrojenju ili objektu.

Opšti pregled rekuperacije toplote

U svrhu ovog članka, definišemo rekuperaciju toplote kao prikupljanje i korišćenje toplote koju bi u normalnim okolnostima sistem predao okolini. Na nivou osnovnih principa, rashladni sistem prima toplotu od prostorije i proizvoda, gde je ona nepoželjna, i predaje toplotu okolini na višem energetskom nivou. Strategije rekuperacije toplote pokušavaju „da nađu mesto“ za deo otpadne toplote koja bi se u normalnim okolnostima izbacila iz sistema. Neki od ključnih parametara koje je potrebno razmotriti u oceni mogućnosti rekuperacije toplote za datu primenu obuhvataju:

- potrebnu količinu toplote, kJ;
- toplotnu snagu, kW;
- „kvalitet“ potrebne toplote, °C; i
- doba dana kada postoje potrebe za grejanjem (podudarnost raspoložive toplote i potreba).

Teorijski, bilo koja količina toplote koja se može rekupe- risati iz industrijskog rashladnog sistema nudi mogućnost poboljšanja stepena korisnosti sistema. Praktično, količina rekupe- risane toplote mora biti dovoljno velika kako bi se opravdala ulaganja u glavnu opremu, kao što i svaki dodatni eksploatacioni trošak (npr. održavanje) ili usložnjavanje instalacije zahtevaju dodatno iskorišćenje otpadne toplote.

„Kvalitet“ toplote je drugi faktor koji može ograničiti mogućnost rekuperacije toplote u industrijskom rashladnom sistemu, i on će biti razmotren ukratko. Na kraju, poželjno je imati raspoloživost izvora otpadne toplote koja se podudara sa potrebama za grejanjem. Kada postoji vremenska nesaglašenost između snabdevanja otpadnom toplotom i potreba za grejanjem, biće potrebno jedan ili više skladišnih rezervoara da bi se akumulirao fluid zagrejan otpadnom toplotom (npr. skladištenje toplote vode).

Lokiranje otpadne toplote

U industrijskim rashladnim sistemima, broj mesta koja su pogodna za rekuperaciju toplote unutar sistema je ograničen. Značajno je prepoznati, oceniti i svesti na najmanju meru svaki nedostatak ili rizik u eksploataciji koji je povezan sa prisustvom opreme za rekuperaciju toplote (npr. pad pritiska na strani rashladnog fluida). Lokacije u okviru industrijskog rashladnog sistema na kojima je moguće uzeti otpadnu toplotu, koja je pogodna za rekuperaciju, jesu:

- hlađenje ulja (hlađenje ulja fluidom kod vijčanih kompresora);
- hlađenje glava cilindara (klipni kompresori);
- struja gasa na potisu u visokom stupnju:
 - klipni kompresori;
 - vijčani kompresori;
- struja gasa na potisu niskog stupnja (minimalne mogućnosti).

Savremeni vijčani kompresori koriste ulje za podmazivanje, regulisano pokretanje i zaptivanje rotora kako bi se održao volumetrijski stepen korisnosti tokom procesa sabijanja. Posledica korišćenja ulja u ovim mašinama je da ulje pri prolasku kroz kompresor apsorbira deo „toplote sabijanja“ od rashladnog fluida. Zato će ulje na izlazu iz kompresora biti na temperaturi približno jednakoj temperaturi rashladnog fluida na potisu. Izuzimajući različite verzije hlađenja ulja ubrizgavanjem tečnosti, održavanje pravilnog rada kompresora zahteva hlađenje ulja nakon kompresije, kako bi se ograničio porast temperature ulja. Kod termosifonskog hlađenja ulja i hlađenja ulja vodom (ili glikolom), u sklopu kompresorskih agregata nalaze se razmenjivači toplote, koji hlade ulje sa temperature na potisu do prihvatljive temperature na ulazu u kompresor (npr. 54°C). Stoga je toplota koja se odvede hlađenjem ulja potencijalni izvor rekuperacije toplote.

Kod klipnih kompresora koji rade sa umerenim ili velikim stepenima sabijanja postoji zahtev za snabdevanjem vodom, glikolom ili rashladnim fluidom u svrhu hlađenja glava cilindara. Fluid koji se koristi za hlađenje glava (voda ili glikol) drugi je potencijalni izvor toplote pogodan za rekuperaciju.

Rekuperacija toplote iz rashladnog fluida koji napušta kompresor na potisu je naredna lako uočljiva mogućnost u industrijskim rashladnim sistemima. Kvalitet toplote, koja je raspoloživa za rekuperaciju, zavisiće od tipa kompresora (klipni ili vijčani), radnih pritiska na usisu i potisu kompresora i opterećenja. Kod vijčanih kompresora, kvalitet toplote će se takođe menjati u zavisnosti od toga da li je hlađenje ulja unutrašnje (npr. ubrizgavanjem rashladnog fluida) ili spoljašnje. Po svojoj prirodi, kompresori opremljeni sistemom za hlađenje ulja ubrizgavanjem rashladnog fluida imaju niže temperature na potisu, a prema tome i niži kvalitet ili energetski nivo toplote raspoložive za rekuperaciju. Mašine sa ubrizgavanjem rashladnog fluida imaju veći maseni protok pare na potisu, tako da je količina toplote koju je moguće rekupe- risati najčešće veća nego kod agregata sa termosifonskim ili spoljašnjim hlađenjem ulja.

Pogledajmo koliko toplote je moguće rekupe- risati i kakav je kvalitet toplote koja nam je dostupna iz ovih izvora.

Potencijal za rekuperaciju toplote

Budući da se danas najčešće u industrijskim rashladnim sistemima koriste vijčani kompresori, usredsredićemo se na rekuperaciju toplote ove vrste kompresora. Ispitaćemo mogućnosti rekuperacije toplote iz pare na potisu kompresora i razmenjivača toplote koji se koriste za hlađenje ulja. Rekuperacija toplote kod klipnih kompresora (hlađenje glava cilindara i pare na potisu) ovom prilikom neće biti razmatrana, zbog ograničene upotrebe ove vrste kompresora.

Para na potisu vijčanog kompresora

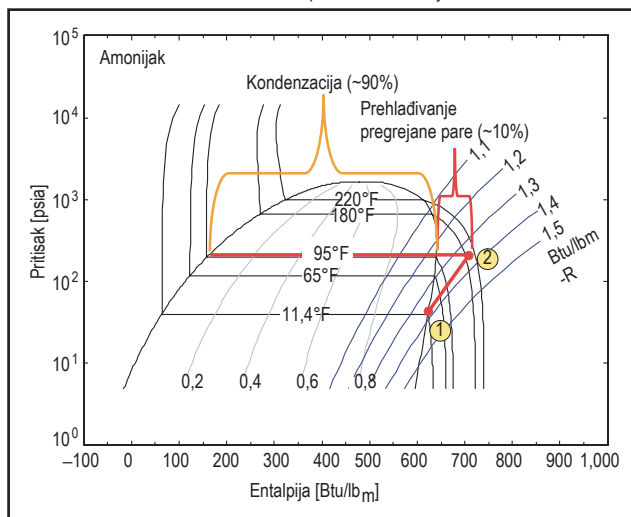
U ispitivanju mogućnosti rekuperacije toplote iz struje pare na potisu vijčanog kompresora, postoje četiri osnovna slučaja koja se mogu razmotriti:

- kompresor visokog pritiska:
 - hlađenje ulja ubrizgavanjem rashladnog fluida;
 - spoljašnje hlađenje ulja;
- kompresor niskog pritiska:
 - hlađenje ulja ubrizgavanjem rashladnog fluida;
 - spoljašnje hlađenje ulja.

Kod kompresora koji koriste ubrizgavanje rashladnog fluida za hlađenje ulja (u različitim verzijama), temperatura pare rashladnog fluida na potisu je ograničena kako bi se hladilo ulje koje napušta kompresor. U normalnim okolnostima, temperatura pare na potisu ovih kompresora kreće

se oko 54°C, dok kompresori sa spoljašnjim sistemom hlađenja ulja rade sa temperaturama na potisu i do 85°C. Pošto je temperatura pare na potisu kompresora sa hlađenjem ulja ubrizgavanjem tečnosti niža, ova tehnologija je manje atraktivna za rekuperaciju toplote, u smislu neispunjavanja ekonomskih kriterijuma za većinu krajnjih korisnika. Razmotrimo sada optimističniji slučaj vijčanog kompresora sa spoljašnjim hlađenjem ulja.

Toplota pare rashladnog fluida na potisu kompresora je u obliku osetne (toplote pregrevanja) i latentne toplote (toplote kondenzacije). Na slici 1 prikazan je proces sabijanja sa usisa (1') na potis (2') za tipični tečnošću hlađeni vijčani kompresor sa amonijakom kao rashladnim fluidom na pritisku isparavanja od 1,72 bar (temperatura zasićene pare -11,4°C) i pritisku kondenzacije 12,48 bar (temperatura zasićene pare 35°C). U najboljem mogućem slučaju, samo 11,5% ukupne otpadne toplote je raspoloživo u oblasti pregrevanja (visokokvalitetna), dok je 88,5% toplote na raspolaganju u oblasti promene faze iz pare u tečnost (niskokvalitetna). Nažalost, toplota najvišeg kvaliteta leži u oblasti pregrevanja, u kojoj je najmanji deo raspoložive toplote. Za date radne uslove, ukupna toplota koju je potrebno odvesti da bi se kondenzovala para na potisu i prešla u zasićenu tečnost je 1,2 kW_{toplote}/kW_{hlađenja}.

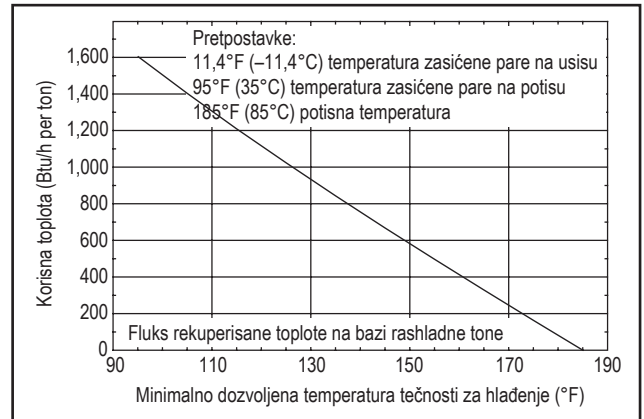


Slika 1. Raspoloživost energije prehladjivanja pregrejane pare i energije kondenzacije pare pri radu vijčanog kompresora bez ubrizgavanja rashladnog fluida sa pritiskom usisavanja 25 psig (1,72 bar) (temperatura zasićenja 11,4°F odnosno -11,4°C) i pritiskom kondenzacije 118 psig (12,48 bar) (temperatura zasićenja 95 F odnosno 35°C)

Sledi prirodno pitanje: „Kolika je količina toplote koja se može rekuperisati iz struje pare na potisu kompresora?“ Odgovor zavisi od minimalno dozvoljene temperature fluida koji prima toplotu pregrejane pare. U svrhu ispitivanja potencijala za rekuperaciju toplote pretpostavimo idealan razmenjivač toplote (sa beskonačno malom izlaznom temperaturnom razlikom). Ako se toplota može iskoristiti na temperaturama nižim od 35°C, celokupnu otpadnu toplotu (osetnu i latentnu) moguće je rekuperisati. Ako se zahtevaju više temperature fluida za hlađenje pregrejane pare, količina rekuperisane toplote se smanjuje sa povećanjem dozvoljene temperature kao što je prikazano na slici 2. Na primer, količina rekuperisane toplote za najnižu dozvoljenu temperaturu od 43°C, iznosi beznačajnih 0,11 kW_{toplote}/kW_{hlađenja} – što je samo delić osetnog dela otpadne toplote iz sistema.

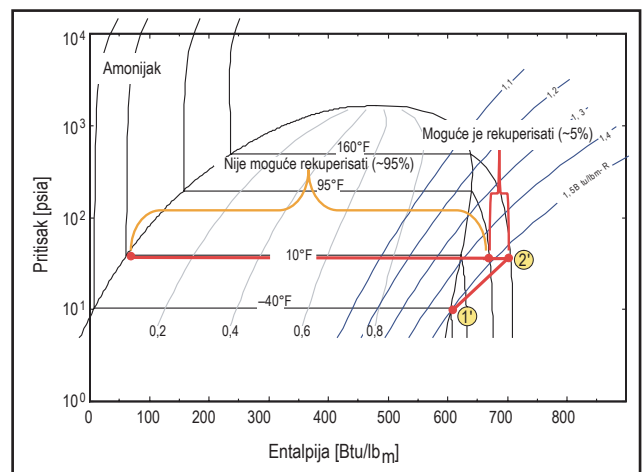
Pitanje koje se postavlja prilikom razmatranja rekuperacije toplote sa potisa vijčanih kompresora sa spoljašnjim sistemom hlađenja ulja je sniženje temperature pare na potisu

sa opadanjem potisnog pritiska. Za očekivati je da temperatura pare na potisu ovog tipa vijčanih kompresora opada sa sniženjem potisnog pritiska brzinom od oko 4,8°C/bar. Drugim rečima, kod mašine koja ima temperaturu pare na potisu 85°C pri pritisku od 12,4 bar može se očekivati da temperatura padne na 75°C pri pritisku od 10,3 bar. Prednost snižavanja potisnog pritiska u sistemu je poboljšanje stepena korisnosti kompresije. Ova prednost značajno prevazilazi smanjenje količine rekuperisane toplote iz pare sa potisa kompresora.



Slika 2. Osetna toplota koju je moguće rekuperisati u zavisnosti od minimalno dozvoljene temperature tečnosti za hlađenje pregrejane pare

Mogući izvor toplote za rekuperaciju je struja pare na potisu kompresora niskog pritiska. Mada rekuperisana toplota iz pare sa potisa kompresora niskog pritiska ima povoljan uticaj na smanjenje opterećenja kompresora visokog pritiska, korisna toplota je u vrlo uskom opsegu unutar oblasti pregrevanja. Slika 3 pokazuje da je ukupno pregrevanje na potisu veće, ali je udeo toplote koja se može iskoristiti za rekuperaciju manji u odnosu na kompresore visokog stupnja. U slučaju koji se razmatra, para na potisu napušta kompresor niskog pritiska sa temperaturom od 71°C i pothlađuje se do 35°C. Iako i dalje postoji energija koja je dostupna u oblasti pregrevanja, od temperature 35°C do temperature međuhlađenja -12°C, ova toplota je niskog kvaliteta; stoga se, uobičajeno, ne razmatra kao toplota koju je moguće rekuperisati. Samo mali deo ukupne toplote koju predaje kompresor niskog pritiska, od svega 5% smatra se korisnim



Slika 3. Toplota koju je moguće rekuperisati prilikom prehladjivanja pregrejane pare do 95 F (35°C) iz otpadne toplote vijčanog kompresora niskog stupnja pri radu sa temperaturama zasićene pare -40°F (-40°C) na usisu i 10 F (-12°C) na potisu

za rekuperaciju toplote. Dok ovaj procenat uopšte ne zvuči impresivno, uticaj smanjenja opterećenja kompresora visokog stupnja može ovaj pristup učiniti atraktivnim, ako se pad pritiska na strani pare u razmenjivaču toplote zadrži ispod 0,069 bar.

Izuzev termičkih razmatranja, rekuperacija toplote iz struje pare na potisu bilo kog kompresora donosi i dodatne brige koje uključuju:

- štetan uticaj pada pritiska na strani rashladnog fluida, usled prisustva opreme za razmenu toplote, što dovodi do povećanja snage kompresora niskog pritiska; i
- moguće opasnosti po rashladni sistem u slučaju havarije razmenjivača toplote (npr. prodiranje vode direktno u rashladni sistem).

Uočavajući da rekuperacija toplote iz pare sa potisa kompresora nudi relativno skromne mogućnosti da se ova niskokvalitetna energija iskoristi na način koji će biti ekonomski opravdan, razmotrićemo još jednu mogućnost.

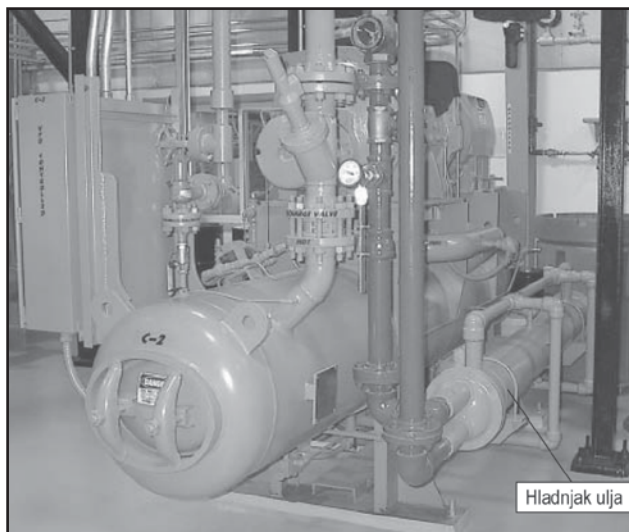
Hladnjaci ulja vijčanih kompresora

Mnogi stručnjaci smatraju termosifonsko hlađenje najsavremenijim rešenjem za hlađenje ulja kod vijčanih kompresorskih agregata. Kod termosifonskog hlađenja ulja zasićena tečnost rashladnog fluida koristi se kao rashladno sredstvo u razmenjivaču toplote rashladni fluid–ulje, koji je integrisan u kompresorski agregat. Tečnost rashladnog fluida u razmenjivaču toplote je niže temperature te stoga apsorbuje toplotu od toplijeg ulja i isparava. Para rashladnog fluida se zatim odvodi u kondenzator(e) gde se ponovo kondenzuje, što omogućava njeno dalje korišćenje za hlađenje ulja ili zadovoljavanje potreba rashladnog sistema za hlađenjem. Termosifonski hladnjaci ulja predstavljaju preplavljene isparivače sa gravitacionom cirkulacijom. Zahvaljujući svom principu rada, termosifonsko hlađenje ulja zahteva minimalnu količinu energije za razmenu toplote – samo je potrebna dodatna energija za pogon ventilatora kondenzatora i pumpi.

Termosifonsko hlađenje ulja je posebno efikasno kada je pravilno konstruisano; međutim, to je takođe i tehnologija koja u mnogim postrojenjima nije zadovoljila u eksploataciji. Nepravilno dimenzionisani termosifonski risiver, egalizacioni vodovi, povratni ili razvodni vodovi mogu pojedinačno ili zajedno izazvati mnogobrojne probleme u instalacijama. Pored toga, sistemi sa termosifonskim hlađenjem ulja nisu naročito pogodni za proširenja. Kada nastanu problemi u termosifonskim sistemima (što se dešava prilično često), njihovo rešavanje i otklanjanje je teško i frustrirajuće.

Ređe primenjavana tehnologija hlađenja ulja u razmenjivačima toplote je hlađenje vodom (ili glikolom). Po ovoj metodi, voda ili rastvor glikola se koriste kao sekundarni rashladni fluid koji prima toplotu ulja. Fotografija 1 prikazuje vijčani kompresorski agregat (niskog pritiska) sa hladnjakom ulja hlađenim glikolom. U ovom slučaju, glikol se vodi kroz hladnjak ulja primajući toplotu od ulja, a zatim se hladi, odnosno predaje toplotu u hladnjaku tečnosti zatvorenog tipa, koji je smešten napolju. Ova toplota se može rekuperisati i iskoristiti za zadovoljavanje relativno umerenih potreba grejanja u postrojenju.

Tipično je da razmenjivači toplote za hlađenje ulja prihvataju toplo ulje iz separatora vijčanog kompresora na temperaturi bliskoj temperaturi pare na potisu, koja je u opsegu od 71°C do 85°C, i hlade ga do temperature sa kojom se ono vraća u kompresor, koja najčešće iznosi 54°C. Sa uljem u ovom radnom opsegu temperatura imamo jasno toplotni izvor prihvatljivog kvaliteta (temperature). Sada se postavlja pitanje: „Koja količina toplote hlađenja ulja nam je dostupna?“

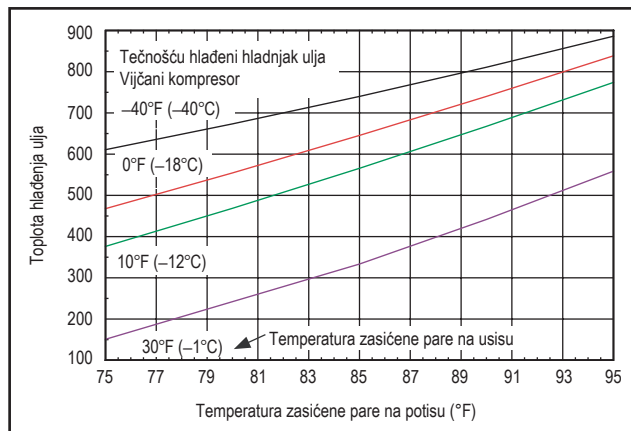


Fotografija 1. Vijčani kompresorski agregat sa hladnjakom ulja hlađenim glikolom

Količina toplote koja se može iskoristiti iz hladnjaka ulja zavisi od više faktora, uključujući:

- veličinu kompresora (kapacitet);
- pritisak na usisu;
- pritisak na potisu i
- stepen parcijalnog opterećenja.

Slika 4 prikazuje tok promene toplote hlađenja ulja sa promenom uslova na usisu i potisu za tipični dvostepeni vijčani kompresorski agregat. Raspoloživost toplote iz procesa hlađenja ulja raste sa porastom temperature (pritiska) kondenzacije i/ili sa snižavanjem usisne temperature (pritiska). Slika 5 pokazuje specifičnu toplotu hlađenja ulja (toplotu hlađenja ulja po jedinici rashladnog kapaciteta) u istom opsegu uslova na potisu, odnosno kondenzacije za isti tipični vijčani kompresorski agregat.

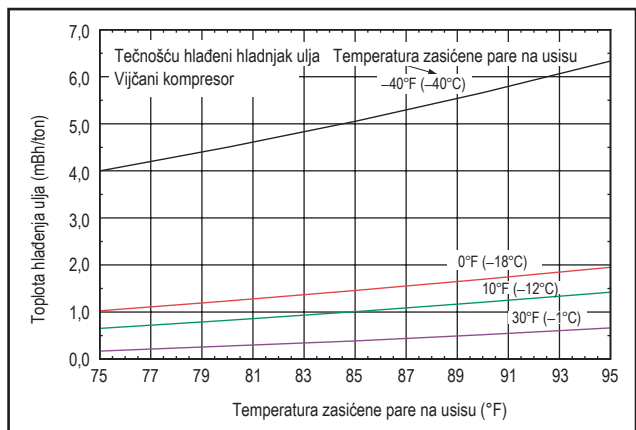


Slika 4. Toplota hlađenja ulja koja se može rekuperisati u zavisnosti od uslova na usisu i potisu

Za isti takav vijčani kompresor visokog stupnja, slika 6 prikazuje toplotu hlađenja ulja izraženu kao deo ukupne otpadne toplote u funkciji temperature zasićenja pare na usisu i temperature zasićenja pare na potisu (temperaturu kondenzacije).

Kod hladnjaka ulja hlađenog tečnošću, moguće je dostići temperature tečnosti koja prima toplotu od oko 43°C, za ulaznu temperaturu od 13°C. Za te temperature, protok tečnosti kojoj se predaje toplota zavisiće od vrste fluida (voda, etilen-glikol, propilen-glikol) i toplote koja se hlađenjem ulja

razmeni. Taj protok je u opsegu od 0,465 l/min po kW toplote hlađenja ulja (za vodu) do 0,465 l/min po kW (za 25% rastvor etilen-glikola i vode).

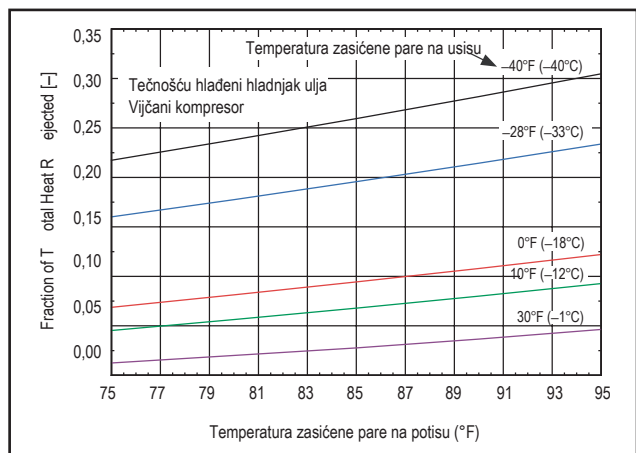


Slika 5. Specifična toplota hlađenja ulja u zavisnosti od temperatura na usisu i potisu

Da bismo sagledali dve gore navedene mogućnosti za rekuperaciju toplote, pogledajmo razmere rekuperisane toplote korišćenjem kompresora visokog pritiska, srednje veličine, sa spoljašnjim hlađenjem ulja. Tehničke karakteristike ove mašine u opsegu temperatura zasićene pare na usisu i temperatura zasićene pare na potisu date su u tabeli 1. Tehničke karakteristike kompresora, koje čine kapacitet, toplota hlađenja ulja i potisna temperatura pare, koriste se da bi se predvideli protoci tople vode koja prima toplotu hlađenja, pri čemu su pretpostavljene temperature vode na ulazu od 13°C i na izlazu od 43°C. Pretpostavljena temperaturska razlika na izlazu rekuperatora toplote je 11°C. U tabeli su date količine rekuperisane toplote predate toploj vodi hlađenjem pregrejane pare i hlađenjem ulja.

Pri niskim temperaturama na usisu, udeo toplote raspoložive za rekuperaciju iz hladnjaka ulja je dva do tri puta veći u odnosu na toplotu raspoloživu iz struje pare na potisu. Sa opadanjem potisnog pritiska opadaju i raspoložive količine toplote za rekuperaciju, kako iz struje pare na potisu, tako i iz hladnjaka ulja, kao što je za očekivati, kod poslednjeg je ovaj pad brži. U radu sa višim temperatururama na usisu, toplota koja se može rekuperisati iz struje pare na potisu

približava se onoj kod hladnjaka ulja tokom rada sa velikim potisnim pritiscima. Pri visokim usisnim temperaturama i niskim pritiscima kondenzacije, opterećenje hladnjaka ulja opada brzo, što bitno umanjuje toplotu koja se može iskoristiti, dok raspoloživa toplota iz struje pare na potisu ostaje nepromenjena. Takođe je korisno napomenuti da sa porastom usisnog pritiska opada odnos toplote koja se može rekuperisati prema rashladnom kapacitetu kompresora.



Slika 6. Deo ukupne otpadne toplote koji se javlja kao toplota hlađenja ulja u zavisnosti od uslova na usisu i potisu

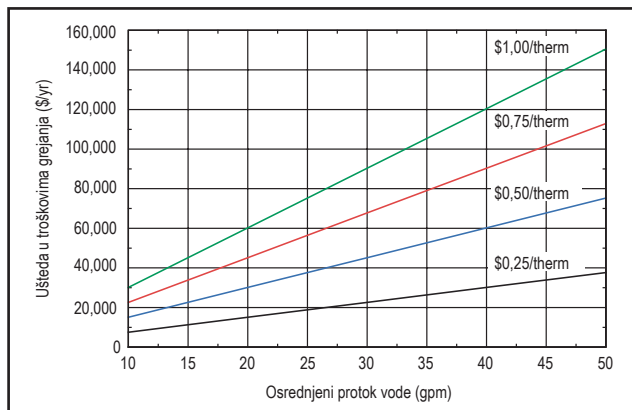
Na primer, protok fluida kojem se predaje toplota hlađenja ulja za radnim režim kompresora -23°C/35°C je 0,103 l/min po kW toplote hlađenja ulja. Kada temperatura na usisu poraste na -7°C, pri temperaturi kondenzacije 35°C, protok fluida, koji prima rekuperisanu toplotu iz hladnjaka ulja, opada trostruko na 0,0395 l/min po kW toplote hlađenja ulja. Konačno, ovde prikazani rezultati rekuperacije toplote iz struje pare na potisu ne uzimaju u obzir uticaj pada pritiska na strani rashladnog fluida na radne karakteristike kompresora.

Najvećem delu ušteda u eksploatacionim troškovima, pri gore navedenim načinima rekuperacije toplote, svojstveno je smanjenje primarne energije (prirodni gas ili propan) koja bi se uobičajeno utrošila za grejanje. Slika 7 pokazuje promenu troškova energije za grejanje (uštedu) zahvaljujući rekuperaciji toplote za različite cene primarnog goriva

Tabela 1. Poređenje potencijala za rekuperaciju toplote pri rekuperaciji toplote iz pare sa potisa kompresora i pomoću hladnjaka ulja vijčanog kompresora srednje veličine

Temperatura zasićene pare na usisu °F (°C)	Temperatura zasićene pare na potisu °F (°C)	Temperatura pare na potisu °F (°C)	Kapacitet kompresora tona (kW)	Toplota hlađenja ulja mBtu/h (kW)	Fluks rekuperisane toplote (gpm [LPM])	
					Prehlađivač pregrejane pare	Hladnjak ulja
-10 (-23)	95 (35)	181 (83)	419 (1474)	1102 (323)	13,5 (51)	40,1 (152)
	85 (29)	176 (80)	432 (1519)	881 (258)	11,8 (33)	32,0 (121)
	75 (24)	171 (77)	446 (1569)	677 (198)	10,3 (39)	24,6 (93)
0 (-18)	95 (35)	181 (83)	538 (1892)	1056 (310)	17,2 (65)	38,4 (145)
	85 (29)	175 (79)	555 (1952)	815 (239)	14,7 (56)	29,6 (112)
	75 (24)	168 (76)	571 (2008)	593 (174)	12,1 (46)	21,6 (82)
10 (-12)	95 (35)	179 (82)	682 (2399)	976 (286)	20,8 (79)	35,5 (134)
	85 (29)	172 (78)	702 (2468)	716 (210)	17,3 (66)	26,0 (99)
	75 (24)	163 (73)	722 (2539)	479 (140)	13,2 (50)	17,4 (66)
20 (-7)	95 (35)	176 (80)	854 (3003)	861 (252)	24,4 (92)	31,3 (118)
	85 (29)	167 (75)	878 (3088)	584 (171)	19,0 (72)	21,2 (80)
	75 (24)	156 (69)	902 (3172)	340 (100)	13,0 (49)	12,4 (47)
30 (-1)	95 (35)	171 (77)	1,058 (3721)	709 (208)	26,9 (102)	25,8 (98)
	85 (29)	161 (72)	1,087 (3823)	427 (125)	19,7 (74)	15,5 (59)
	75 (24)	149 (65)	1,117 (3928)	198 (58)	11,8 (44)	7,2 (27)

i protoke vode. Pretpostavljeno je da rekuperisana toplota nadomešćuje rad kotla, sa stepenom korisnosti od 80%, koji bi se u normalnim oklonostima koristio da obezbedi potrebe za grejanjem.



Slika 7. Godišnje uštede u troškovima energije za grejanje na nivou 31°C. Pretpostavljeno je da se nadomešćuje rad kotla, sa stepenom korisnosti od 80%

Dodatna korist prilikom rekuperacije toplote iz industrijskih rashladnih postrojenja je smanjenje toplote koja se razmenjuje na evaporativnim kondenzatorima, što utiče na uštedu primarne energije. Razumljivo je pretpostaviti da će postrojenje ostvariti dodatnu uštedu u energiji potrebnoj za pogon ventilatora evaporativnih kondenzatora sa smanjenjem toplotnog opterećenja kondenzatora. Sa druge strane, dodatna energija potrebna za pogon pumpi u sistemu za rekuperaciju toplote poništava efekat smanjenja pogonske energije pumpi za vodu evaporativnih kondenzatora.

Ostala razmatranja

U ocenjivanju mogućnosti rekuperacije toplote kod specifičnih primena u okviru postrojenja, brojni drugi faktori zahtevaju pažljivo razmatranje. Kao što je ranije napomenuto, potrebe za otpadnom toplotom potrebno je uporediti sa njenom raspoloživošću. U slučajevima gde postoji neusaglašenost, biće potreban neki vid akumulacije toplote. U vezi sa ovom problematikom je obezbeđivanje viška otpadne toplote. Ako razmatramo rekuperaciju toplote iz hladnjaka ulja, važno je obezbediti neki oblik viška kapaciteta za odvođenje otpadne toplote kao što je postavljanje jedne ili više rashladnih kula zatvorenog tipa, koje bi se koristile tokom perioda kada u postrojenju nema potreba za otpadnom toplotom. Sa sekundarnim fluidom, kao što je glikol, u ciklusu rekuperacije toplote, još jedan razmenjivač toplote biće neophodan ako se primenjuje u svrhu grejanja vode za piće.

Prilikom modifikacije kompresorskih agregata, potrebno je zajedno sa proizvođačem oceniti svaki pojedinačni zah-

tev u pogledu cirkulacije ulja, automatike, sigurnosnih vodova i sl.

Za prehladivače pregrejene pare, važno je proceniti rizik od havarije razmenjivača toplote u eksploataciji. Pad pritiska na strani rashladnog fluida potrebno je smanjiti na najmanju meru kako bi ova varijanta bila uspešna. Na kraju, potrebno je razmotriti i primenu obilaznog voda pare rashladnog fluida radi pouzdanosti.

Zaključci

Sa porastom cena goriva koje se koristi za grejanje, veće su mogućnosti da se ekonomično rekuperiše toplota iz industrijskih rashladnih sistema. Klasični pristupi rekuperaciji toplote usredsređuju se na rekuperaciju toplote iz struje pare na potisu kompresora visokog pritiska (prehladivač pregrejene pare). Druga mogućnost, koju ne treba prevideti, jeste rekuperacija toplote iz hladnjaka ulja vijčanih kompresorskih agregata.

Prednosti ove solucije uključuju:

- mogućnost rekuperacije toplote iz hladnjaka ulja, i kod kompresora niskog i kod kompresora visokog pritiska;
- omogućena je rekuperacija relativno visokokvalitetne otpadne toplote;
- rezultat pristupa hlađenju ulja koji je manje sklon problemima u poređenju sa termosifonskim hlađenjem ulja;
- korišćenje fluida koji prima osetnu toplotu i pumpe omogućava veću kontrolu nad hlađenjem ulja (odstranjuje uticaj „majke prirode“ iz klasičnog termosifonskog kruga);
- lakše se prilagođava dodavanju novih kompresora prilikom proširivanja postrojenja u odnosu na sisteme sa termosifonskim hlađenjem;
- velike mogućnosti za modifikaciju kod kompresora sa hlađenjem ulja ubrizgavanjem tečnosti rashladnog fluida;
- hlađenje ulja čini nezavisnim od pritiska u sistemu, što omogućava lakše puštanje u rad; i
- omogućava korišćenje pločastih razmenjivača toplote bez bojazni vezane za pad pritiska na strani rashladnog fluida.

Iako su prednosti privlačne, prilikom primene ovog načina rekuperacije toplote potrebno je razmotriti i ostale faktore. Prvo, svaki kompresorski agregat mora biti opremljen (ili modifikovan) odgovarajućim hladnjakom ulja. Drugo, potrebe za grejanjem treba da se poklapaju sa toplotom hlađenja ulja. Ako postoji neusaglašenost između potreba grejanja i dovedene toplote, potrebna je dodatna infrastruktura kako bismo se prilagodili ovoj neusaglašenosti. Konačno, ekonomičnost rekuperacije toplote iz hladnjaka ulja potrebno je oceniti za svaki pojedinačni slučaj.

kg