

1. UVOD

Tehnika hlađenja je grana tehnike koja se bavi postupcima i pojavama hlađenja tijela. Zadatak tehnike hlađenja je postizanje temperatura nižih od okoline i njihovo održavanje. Ona obuhvaća sve procese i postupke, kao i uređaje, postrojenja i komponente koji služe postizanju, održavanju i korištenju temperatura nižih od okolišne temperature.

1.1. PODRUČJE PRIMJENE TEHNIKE HLAĐENJA

Tehnika hlađenja ima široku primjenu u raznim granama ljudske djelatnosti:

- **u prehrambenoj industriji:** Pored konzerviranja hrane djelovanjem topline, sušenjem ili fizikalno-kemijskom modifikacijom, hlađenje je još jedan, često korišten način konzerviranja.
- Konzerviranje hlađenjem dijelimo na hlađenje (do oko 0°C) i smrzavanje (ispod 0°C). Dok hlađenje ne utječe na promjenu okusa ili kvalitete namirnica, pri smrzavanju i ponovnom otapanju se oni mijenjaju. Brzina smrzavanja utječe na kvalitetu robe organskog porijekla. Brzim smrzavanjem u robi se stvara veći broj manjih kristala, pa se stijenke stanica pri smrzavanju manje oštećuju. Polaganim hlađenjem na temperaturama do -15°C u robi se stvara manji broj velikih kristala koji uzrokuju trganje staničnih stijenki, što nepovoljno utječe na kvalitetu robe. Osim veličine kristala na kvalitetu namirnica nakon odležavanja utječe dehidracija proteina prilikom smrzavanja. Promjena kvalitete proteina uslijed dehidracije ovisi također o brzini smrzavanja i manja je kod brzog smrzavanja.
- Hlađenje i smrzavanje se koriste u mnogim fazama pripreme, prerade i distribucije životnih namirnica. Mesna industrija, mliječna industrija, proizvodnja i distribucija voća i povrća, proizvodnja piva i vina, brodovi – tvornice za preradu ribe...
- Primjeri: U voćarstvu je potrebno u najkraćem mogućem vremenu ohladiti voće nakon berbe. Cilj je sačuvati kvalitetu, izbjeći gubitak uslijed kvarenja, produžiti vijek trajanja. U proizvodnji vina mošt se hladi radi postizanja što bolje kvalitete vina. Na brodovima – tvornicama za preradu ribe, kao i u mesnoj industriji cilj je u skladu s tehnološkim zahtjevima ohladiti i smrznuti proizvod.
- Uređaji za smrzavanje mogu se podijeliti na:
 - uređaji za smrzavanje u struji zraka
 - pločasti uređaji za smrzavanje
 - uređaji za smrzavanje špricanjem proizvoda hladnom tekućinom ili uranjanjem u hladnu tekućinu (npr. solna otopina)
 - uređaji za smrzavanje špricanjem proizvoda tekućinom koja isparuje ili umakanjem u takvu tekućinu (npr. tekući N₂ koji kod tlaka 1 bar isparuje kod temperature -196°C, pa se površina proizvoda praktički trenutno smrzne)

Za smrzavanje u struji zraka, pri temperaturama oko -35°C, koriste se tuneli s prisilnom cirkulacijom zraka u kojima se proizvodi ne kreću (šaržni tuneli, uobičajenih kapaciteta 5- 30 tona na dan), kao i tuneli u kojima se proizvodi kreću na transporteru ili u fluidiziranom sloju (kontinualni tuneli, kapaciteta 2 – 6 tona na sat).

Nakon smrzavanja roba se skladišti u skladištima za smrznute namirnice. Ovisno o uvjetima temperature, vlažnosti i brzine strujanja zraka biti će i kvaliteta, odnosno vrijeme trajanja takvih namirnica.

- **u domaćinstvu:** hlađenje i smrzavanje namirnica – kućanski hladnjaci i zamrzivači (riječ frižider dolazi od imena tvornice Frigidaire)
- **u trgovini:** dio hladnog lanca, tu su rashladne komore i vitrine u prodajnim prostorima.
- **u procesnoj i kemijskoj industriji:** kontrola brzine odvijanja procesa, postizanje odgovarajućih otopivosti kod smjesa, ukapljivanje plinova i njihovo skladištenje, hlađenje u naftnoj industriji u cilju uklanjanja voska, proizvodnja sintetičke gume, petrokemija, farmaceutska industrija.
- **proizvodnja i obrada metala:** razvlaživanje zraka za visoke peći, toplinska obrada, sklapanje dijelova s dosjedima da bi se izbjeglo grijanje
- **laboratoriji:** za ispitne stanice strojeva, vozila i uređaja koji rade pri niskim temperaturama, umjetna atmosfera
- **u klimatizaciji:** u cilju održavanja temperature i vlažnosti zraka, hlađenjem ili grijanjem (toplinske crpke) zraka ili medija za prijenos topline u klimatizacijskim postrojenjima.
- **u medicini i biologiji :** za lokalnu anesteziju, olakšavanje stanja bolesnika, usporavanje metabolizma, konzerviranje krvi ili dijelova tijela namijenjenih transplantaciji, kriokirurgija
- **u transportu:** Dio hladnog lanca kojeg čine proizvodnja, transport, distribucija i potrošnja. U cilju očuvanja kvalitete tijekom transporta namirnice se moraju održavati na željenoj temperaturi. Brodski rashladni uređaji služe za hlađenje skladišta robe, provijanta, kontejnera ili spremnika za transport ukapljenih plinova.
- **u sportu:** klizališta, bob staze, proizvodnja umjetnog snijega
- i dr.

1.2. TOPLINSKO OPTEREĆENJE HLADIONICE

$$\dot{Q}_o = \sum_{i=1}^8 \dot{Q}_i \text{ [kW]}$$

1. Toplinsko opterećenje uslijed dovođenja topline kroz stijenke
2. Toplinsko opterećenje uslijed hlađenja i smrzavanja proizvoda
3. Toplinsko opterećenje uslijed hlađenja vanjskog zraka (namjerno i nenamjerno provjetranje)
4. Toplinsko opterećenje uslijed odvijanja bioloških procesa u uskladištenim proizvodima (toplina disanja)
5. Toplinsko opterećenje uslijed rada ljudi
6. Toplinsko opterećenje uslijed rasvjete
7. Toplinsko opterećenje uslijed stvaranja inja na isparivaču
8. Toplinsko opterećenje uslijed rada ventilatora

1.3. TEMPERATURE U TEHNICI HLAĐENJA

Temperature korištenja K	Područje primjene
400 ... 355 (123 ... 80 °C)	Dizalice topline (toplinske crpke) – visoke temperature
353 ... 323 (80 ... 50 °C)	Dizalice topline (toplinske crpke) – srednje temperature
323 ... 293 (50 ... 20 °C)	Dizalice topline (toplinske crpke) – niske temperature
293 ... 283 (20 ... 10 °C)	Hlađenje u postrojenjima klimatizacije
283 ... 273 (10 ... 0 °C)	Hlađenje namirnica u tzv. hladnom lancu
273 ... 263 (0 ... -10 °C)	Proizvodnja leda za potrebe transporta, klizališta, kristalizacija u industriji kalija
263 ... 240 (-10 ... -33 °C)	Smrzavanje namirnica, sušenje smrzavanjem, ukapljivanje propana, butana i amonijaka
240 ... 223 (-33 ... -50 °C)	Specijalni postupci smrzavanja
223 ... 200 (-50 ... -73 °C)	Simulacijske i ispitne komore, kruti ugljični dioksid
200 ... 150 (-73 ... -123 °C)	Ukapljivanje etana i etilena, kriomedicina
150...100 (-123 ... -173 °C)	Ukapljivanje zemnog plina
100...50 (-173 ... -223 °C)	Ukapljivanje zraka, razdvajanje zraka, plemeniti plinovi visokotemperaturna supravodljivost
50...20 (-223 ... -253 °C)	Ukapljivanje neona i vodika, izdvajanje deuterija
20...4 (-253 ... -269 °C)	niskotemperaturna supravodljivost, ukapljivanje helija
4-10 ⁻⁶ (-269 ... -273 °C)	mjerna tehnika, fizikalna istraživanja

1.4. FIZIKALNE POJAVE I OSNOVNI PROCESI U TEHNICI HLAĐENJA

Za ostvarivanje hlađenja mogu se iskoristiti razne fizikalne pojave:

1. Promjena agregatnog stanja (kopnjenje krute tvari, isparivanje kapljevine, sublimacija)
2. Ishlapljivanje kapljevine
3. Desorpcija plinova
4. Strujanje velikim brzinama u vrtložnoj cijevi
5. Termoelektrični efekt
6. Ekspanzija komprimiranih plinova uz dobivanje mehaničkog rada
7. Prigušni efekt (Joule – Thomsonov efekt)
8. Termomagnetski efekt
9. Elektrokaloški efekt

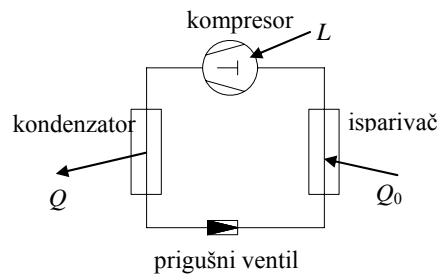
Hlađenje odvojenim procesima (kopnjenje leda, isparivanje kapljevine, sublimacija suhog leda – krutog CO₂) može trajati dok na raspolaganju stoji određena tvar. Nakon toga zalihu te tvari treba obnoviti. To su odvojeni procesi (diskontinuirani).

Neprekidno hlađenje može se postići tako da se radna tvar pogodnim kružnim procesom nakon ostvarivanja efekta hlađenja ponovno vrati u prvobitno stanje uz utrošak energije.

Tako npr., koristeći efekt hlađenja koji nastaje uslijed isparivanja, rade kompresijski rashladni uređaji, apsorpcijski rashladni uređaji i rashladni uređaji s mlaznim duhaljkama (ejektorski).

1.4.1. Kompresijski rashladni uređaji (proces s mehaničkom kompresijom pare)

Ovi uređaji rade s parom radne tvari, tj. proces pada u zasićeno područje. Dovođenje topline Q_0 odvija se kod $T_0 = konst$ i $p_0 = konst$ a odvođenje topline Q je kod $p = konst$ i u većem dijelu kod $T = konst$. Za rad uređaja troši se mehanički rad L . Faktor hlađenja ili rashladni množilac je $\varepsilon_0 = \frac{Q_0}{L}$.



Sl. 1.1. Jednostupanjski kompresijski rashladni uređaj

Radne tvari: halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika (CFC, HCFC, HFC, trgovački naziv koji je vrlo čest je freoni), anorganske tvari (voda, CO_2 , amonijak), ugljikovodici (propan, izobutan), smjese radnih tvari.

CFC – clorofluorocarbons, potpuno halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika, uglavnom metana i etana (npr. R12)

HCFC – hydrochlorofluorocarbons, djelomično halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika koji sadrže vodik i klor (npr. R22)

HFC – hydrofluorocarbons, djelomično halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika koji sadrže vodik i ne sadrže klor (R407C je smjesa triju HFC-a)

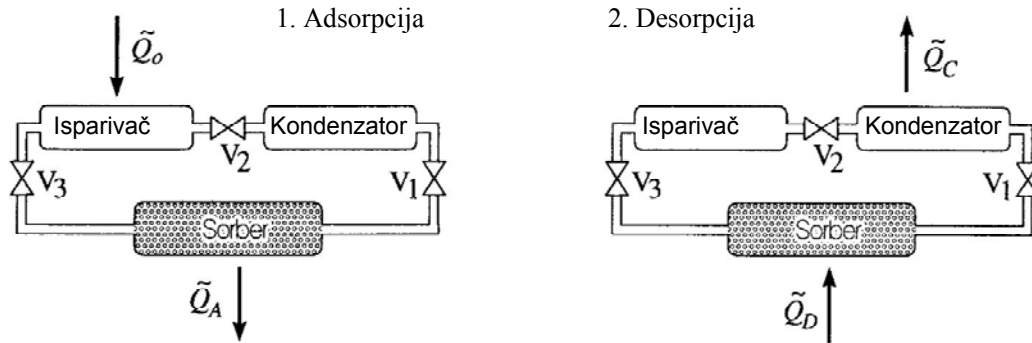
1.4.2. Sorpcijski rashladni uređaji

Razlikuju se uređaji s kontinuiranim (tu se najčešće koriste adsorpcijski uređaji) i diskontinuiranim pogonom (najčešće adsorpcijski uređaji).

Adsorpcijski rashladni uređaji

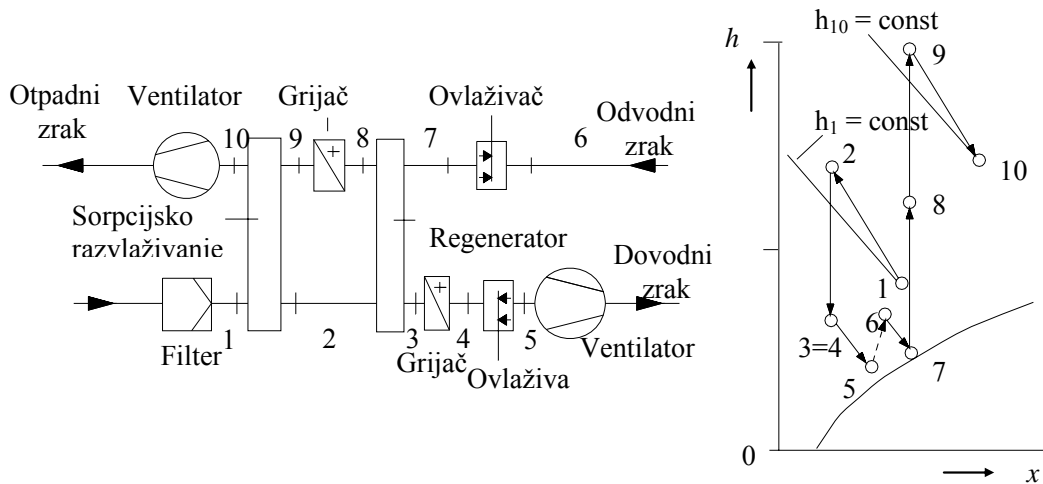
Kod uređaja s diskontinuiranim pogonom često se koristi kruti adsorbent. Kod ovih uređaja se koriste procesi adsorpcije para ili plinova u krutim adsorbentima. Izvedba prikazana na slici sastoji se od isparivača, kondenzatora, sorbera (adsorber-desorber) u kojem je adsorbent i tri ventila. Obzirom da je adsorbent kruta tvar mora se proces odvijati naizmjenice s krutom ili plinovitom radnom tvari. Tijekom jednog kompletnog procesa adsorpcije adsorbent veže na sebe adsorbat pri čemu odaje toplinu Q_A . Adsorbat koji isparuje oduzima od okoline toplinu Q_0 , pa se ostvaruje hlađenje. Udio adsorbata u adsorbentu mijenja se od početne vrijednosti x_R do konačne x_A

Tijekom procesa desorpcije dovođenjem topline Q_D (npr. grijanje plinom) adsorbat se “istjeruje” iz adsorbenta. Odavanjem topline Q_C okolini ili grijanom mediju adsorbat se ukapljuje u kondenzatoru. Ventili služe za određivanje vremena pogona u određenom režimu.



Sl. 1.2. Sorpcijski sustav za hlađenje, diskontinuirani pogon

Među takve uređaje spadaju i otvoreni sorpcijski rashladni uređaji koji kombiniraju sorpciju i hlađenje ishlapljivanjem. Za pogon koristimo toplinu, može i sunčevu energiju.



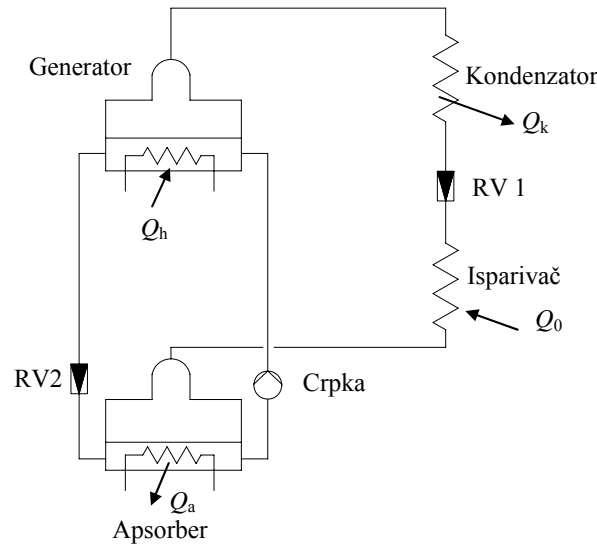
Sl. 1.3. Otvoreni sorpcijski sustav za hlađenje, shema i h,x -dijagram

Apsorpcijski rashladni uređaji

Radne tvari za apsorpcijske rashladne uređaje su smjese, najčešće dvojne.

Umjesto kompresora tu imamo tzv. termokompresor, koji se sastoji iz generatora, apsorbera, prigušnog ventila i crpke). Za pogon uređaja se troši toplina, a ne mehanički rad kao kod kompresijskih uređaja.

Jednostavni apsorpcijski rashladni uređaj



Sl. 1.4. Jednostavni jednostupanjski apsorpcijski rashladni uređaj

Uobičajene radne smjese su:

voda – amonijak ($\text{H}_2\text{O} - \text{NH}_3$)

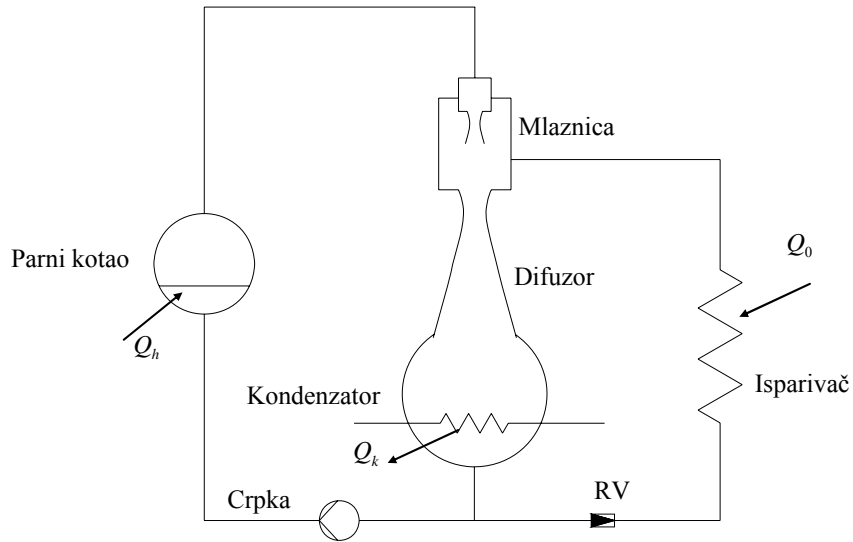
litijev bromid - voda ($\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$)

Umjesto faktora hlađenja (rashladnog množioca) definira se toplinski omjer hlađenja $\zeta = \frac{Q_0}{Q_h}$

Svaki bolji uređaj opremljen je izmjenjivačima topline.

1.4.3. Rashladni uređaji s mlaznim duhaljkama (ejektorski rashladni uređaji)

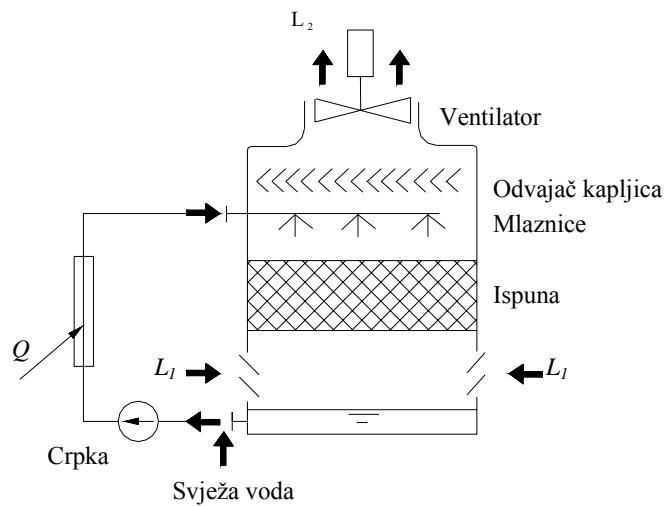
Najčešća radna tvar za ove uređaje je voda. U tom su slučaju ovi rashladni uređaji primjenjivi za temperature iznad 0°C . (klimatizacija, prehrambena industrija, kemijska industrija, mljekare, pivovare), posebno tamo gdje je na raspolaganju vodena para. Moguća je primjena drugih radnih tvari s pogodnim položajem kritične točke i omjerom tlakova, pa se uređaji mogu koristiti za iskorištavanje otpadnih toplina ili sunčeve energije u svrhu hlađenja i na nižim temperaturama. Kod ovih se uređaja za pogon troši toplina, nema pokretnih dijelova i jednostavno je održavanje. Nedostatak je niska korisnost u usporedbi s kompresijskim parnim procesima, a kod korištenja vode kao radne tvari i nemogućnost postizanja nižih temperatura.



Sl. 1.5. Rashladni uređaj s mlaznim duhaljkama (ejektorski rashladni uređaj)

1.4.4. Hlađenje ishlapljivanjem

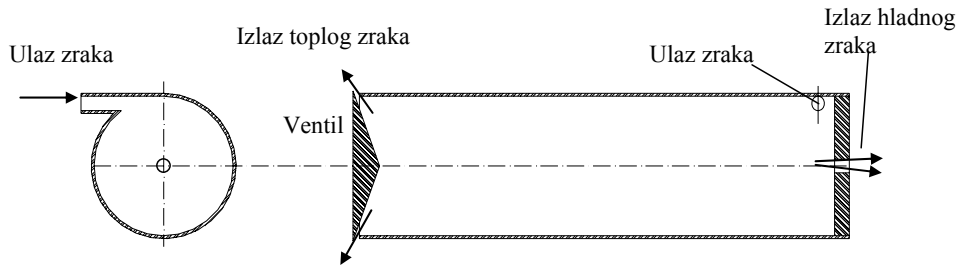
Kod ishlapljivanja prelaze molekule kapljevine preko granične površine između kapljevine i plina u nezasićeni plin koji struji iznad kapljevine. Pri ishlapljivanju se, ovisno o stanju granične površine i plina iznad kapljevine može pojaviti ugrijavanje ili ohlađivanje plina. Ishlapljivanjem se može postići relativno mali rashladni učinak ako je stanje zraka blisko zasićenju. Primjer primjene je hlađenje ishlapljivanjem u rashladnim tornjevima.



Sl. 1.6. Optočno hlađenje ishlapljivanjem u rashladnom tornju

1.4.5. Vrtložna cijev

Ako se u cijev kakva je prikazana na slici 1.7. tangencijalno upuhuje komprimirani zrak s temperaturom okoline, doći će uslijed pojava povezanih sa strujanjem veliki brzinama i djelovanjem centrifugalne sile do razdvajanja struje zraka na topliju i hladniju od okoline.

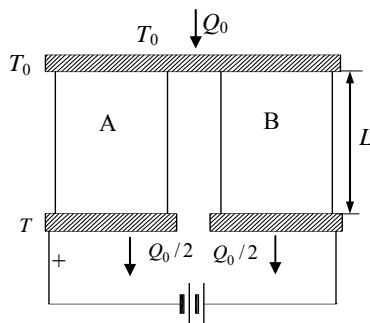


Sl. 1.7. Ranque – Hilschova vrtložna cijev

To je uočio *Georges Ranque* (1933.), dok *Hilsch* (1946.) opisuje konstrukcijske detalje. Često se naziva Ranque – Hilschova vrtložna cijev. Ovo hlađenje nije ekonomično. Primjenjuje se za male rashladne učinke, u rudnicima, vojnim vozilima, na alatnim strojevima.

1.4.6. Termoelektrično hlađenje

Koristi se za manje rashladne učinke, za hlađenje elektroničkih sklopova, u svemirskoj tehnici i za vojne namjene. Nema pokretnih dijelova i vibracija, a uređaji nisu osjetljivi na utjecaj gravitacije. Termoelektričnom pojavom naziva se međusobna ovisnost strujanja topline i električne struje.



Sl. 1.8. Termoelektrični modul

1.4.7. Ekspanzija plinova uz dobivanje rada

Jedna od primjena je *Stirlingov* rashladni stroj. Koristio se ponajviše za postizanje vrlo niskih temperatura (30-77 K) tamo gdje konvencionalni rashladni uređaji s parnim procesom nisu bili pogodni zbog ograničenja vezanih na radnu tvar i podmazivanje.

Pojačan interes je u zadnje vrijeme, jer je uobičajena radna tvar helij koji ne šteti okolišu, a ima visok faktor hlađenja (kao i *Carnotov*).

Nedostaci su vezani na složen konstrukciju, cijenu, pouzdanost i vijek trajanja.

Trenutno još u fazi istraživanja.

1.4.8. Termomagnetsko hlađenje

U tehnici niskih temperatura, za postizanje temperatura reda veličine $1 \cdot 10^{-3}$ do $1 \cdot 10^{-5}$ K. Koristi se ciklus adijabatske demagnetizacije paramagnetskih soli. Koristi se promjena entropije pri promjeni magnetskog polja. Primjenom Carnotova, Ericson ili Stirling procesa, može se uspostaviti razlika temperature.

1.4.8. Joule Thomsonov efekt

Kod realnih plinova moguće je prigušivanjem ostvariti rashladni efekt – promjenu temperature. O tome će biti riječi kod ukapljivanja plinova.

1.4.9. Desorpcija plinova

U laboratorijima, za postizanje niskih temperatura (20-4 K). Periodični rad: I faza adsorpcija plina (helija) u aktivnom uglju, pri čemu se toplina adsorpcije odvodi hlađenjem pomoću isparivanja tekućeg vodika pod vakuumom. II faza: helij se uslijed odsisavanja desorbira iz aktivnog uglja, toplina desorpcije namiruje se toplinom akumuliranom u aktivnom uglju, zbog čega temperatura uglja opada. Ova metoda je niske energetske učinkovitosti, ali je jednostavna, pa se u laboratorijima koristi za niske temperature (20-4 K).