

## Увод у енергетику

### Лекција 9

Проф. Др Франц Коси, дипл.маш.инг.

Катедра за термотехнику, кабинет 134/1, [frankkosi@gmail.com](mailto:frankkosi@gmail.com)

## 1.1 ЗАДАТАК МАШИНА ЗА ХЛАЂЕЊЕ; ПРИРОДНО И ВЕШТАЧКО ХЛАЂЕЊЕ

Задатак машина за хлађење јесте да охлади извесна тела или предмете до температуре ниже од температуре околине и да их на тој температури одржавају.

Хлађењем се назива процес при коме се од неког тела (хлађени објекат) одводи топлота и предаје неком другом телу (топлотни понор). Ако се при томе хлађеном објекту не доводи технички рад, његова енталпија ће опадати, а када нема ни промене фазе<sup>1</sup> опадаће и његова температура.

Топлота одведена од хлађеног тела назива се топлотом хлађења (J или kJ), а одведена топлота хлађења у јединици времена назива се расхладним учинком (W или kW).

Пошто се трајно хлађење може обезбедити једино понором бесконачног топлотног капацитета, најпре ће бити размотрен случај када је околина топлотни понор. Ако је температура  $t_h$  хлађеног објекта виша од температуре  $t_{ok}$  околине процес се може одвијати спонтано (сам од себе), тј. без утрошка рада и без икаквих промена на телима ван система хлађени објекат - околина (топлотни понор). Такво хлађење назива се природним хлађењем; како се оно одвија само од себе, оно се једино може убрзавати (интензивирањем размене топлоте) или успоравати (нпр. постављањем топлотне изолације између хлађеног објекта и топлотног понора).

Међутим, када је  $t_h < t_{ok}$ , из искуства је познато да хлађење не може бити спонтано, тј. не може се одвијати само од себе<sup>2</sup>, већ се мора укључити у неки погодан компензациони процес.

Када компензациони процес обавља нека радна материја, прелаз топлоте са извора ниже на понор више температуре се може трајно (непрекидно) одвијати једино ако се та радна материја периодички враћа у почетно стање, тј. ако машина обавља **кружни компензациони процес**.

Компензациони процес је најчешће неки од класичних левокретних кружних процеса (левокретних циклуса) са утрошком механичког рада. По таквим циклусима раде тзв. **компресорске машине**; оне према врсти радне материје могу бити *гасне* (када радна материја током кружног процеса не мења агрегатно стање) или *парне компресорске машине* (чији се циклус највећим делом одвија у подручју влажне паре). Ако се у компензационом процесу користи топлота, расхладна машина ради по неком комбинованом (интегрисаном) циклусу, који у ствари представља спрегу деснокретног и левокретног циклуса. По комбинованим циклусима раде **ејекторске и сорпционе машине**.

Као компензациони процес се може искористити и отворени процес код кога се расхладни ефекат остварује услед трајне промене физичког стања и/или хемијске структуре неке материје (тзв. расхладне смесе). Пошто је за одвијање отвореног процеса потребно потрошити одређене количине такве расхладне материје, отворени процеси се још називају и потрошним процесима.

Разматрања слична претходним се могу спровести и када неком телу (грејани објекат) треба доводити топлоту из неког извора топлоте. Ако је температура извора виша од температуре грејаног објекта, процес грејања се одвија спонтано, тј. сам од себе; такво је нпр.

<sup>1</sup> Ако не настаје кондензација, односно десублимација или очвршћавање (залеђивање).

<sup>2</sup> Ова искуствена спознаја представља један од исказа II закона Термодинамике.

традиционално грејање када су топлотни извор продукти сагоревања фосилних горива или биомасе.

Међутим, ако се за грејање жели користити топлота из околине, при чему је температура грејаног објекта виша од температуре околине, у такво грејање се мора укључити у неки погодан компензациони процес (нпр. левокретни) са утрошком рада. Уређаји помоћу којих се то остварује називају се топлотним пумпама.

Топлотна пумпа је, у суштини, машина истоветна са машином за хлађење; само код ње је жељени (користан) ефекат топлота предата околини на вишој температури од температуре топлотног извора. У неким случајевима се може истовремено користити и ефекат хлађења, што само повећава укупни технички и економски ефекат уређаја.

## 9.2. ПОСТИЗАЊЕ НИСКИХ ТЕМПЕРАТУРА

Одвођење топлоте од хлађеног објекта могуће је само његовим довођењем у термички контакт са неком радном материјом ниже температуре. Најважнији процеси који су нашли значајнију примену за постизање ниских температура у пракси су:

Експанзија гасова и пара (са одвођењем рада). Највеће снижавање температуре при експанзији од датог почетног до датог крајњег притиска се постиже у случају када је та експанзија адијабатска и квазистатичка (тј. изентропска).

Експанзија без одвођења рада (адијабатско пригушивање);

Термоелектрични ефекат (пропуштањем електричне струје кроз спој два различита проводника у погодном смеру може се постићи хлађење тог споја);

Ефекат растварања (расхладне смеше) (при адијабатском мешању две материје, температура раствора може бити и знатно нижа од почетне температуре компонената).

## 9.3. ЛЕВОКРЕТНИ ПРОЦЕСИ СА УТРОШКОМ РАДА

Левокретни циклуси са утрошком рада су компензациони процеси који омогућавају трајно пребацивање топлоте из извора ниже у понор више температуре. Када су и извор и понор бесконачних топлотних капацитета, промене стања извора и понора су изотермске. Повратан циклус у том случају може бити левокретни циклус **Carnot** који сачињавају две изентропе и две изотерме.

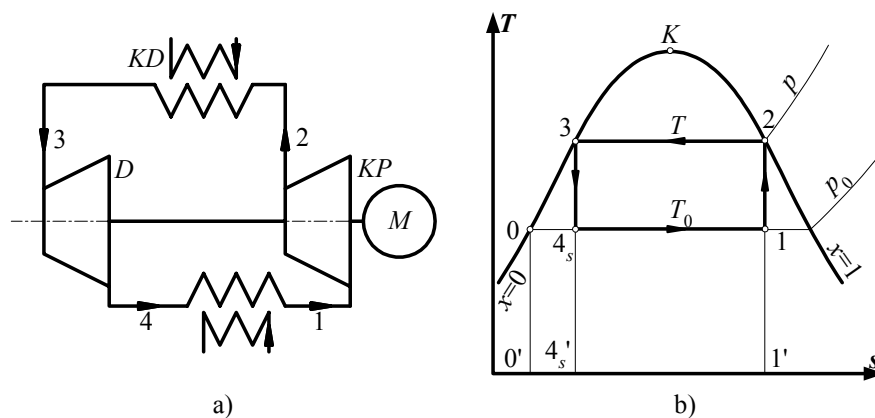
Процесе изотермског довођења односно одвођења топлоте левокретног циклуса **Carnot** је релативно лако остварити када се ради о влажној пари једнокомпонентне радне материје. Тада се ти процеси поклапају са изобарским процесима испаравања, односно кондензације. Шема парне компресорске машине која ради по левокретном циклусу **Carnot** и циклус у  $T-s$  дијаграму приказани су на сл. 1.а и сл. 1.б; машина се састоји од компресора (процес 1-2), кондензатора (процес 2-3), експанзионе машине (процес 3-4) и испаривача (процес 4-1).

По дефиницији, коефицијент хлађења расхладног циклуса је

$$\varepsilon = \frac{q_0}{w} = \frac{q_0}{w_c - w_d} = \frac{q_0}{q - q_0}$$

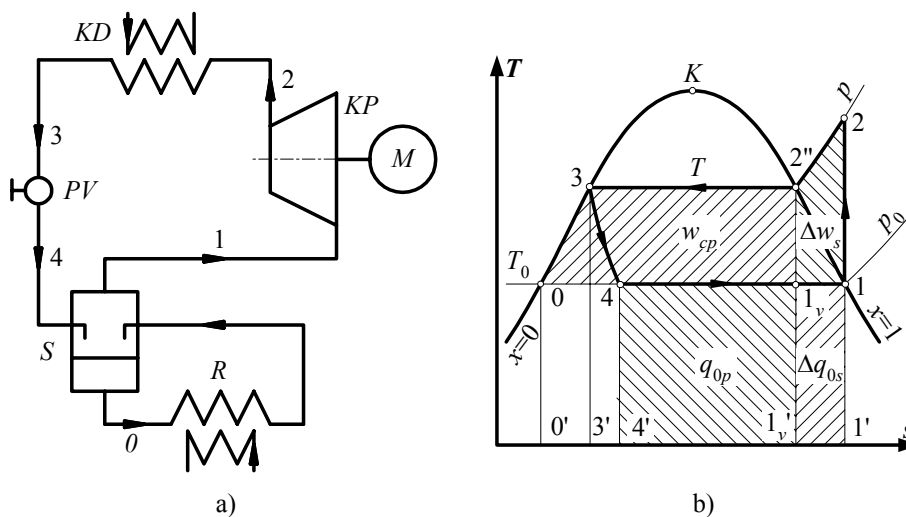
и представља топлоту хлађења (одведену од хлађеног објекта) по јединици утрошеног рада. За један одређени процес, коефицијент хлађења зависи од врсте расхладног циклуса, температура извора и понора и карактеристика расхладног флуида (радне материје са којом се изводи кружни процес).

Уколико је утрошени рад мањи за исту топлоту хлађења, процес је економичнији. Најекономичнији могући процес хлађења је када је расхладни циклус повратан и то без обзира на врсту циклуса и расхладног флуида.



Сл. 1. Парна компресорска машина која ради по циклусу **Carnot**:  
 а) шема (KP - компресор; KD - кондензатор; D – детандер (експанзиона машина) ;  
 R - испаривач); б) T-c дијаграм

Иако нема проблема при изотермској размени топлоте, циклус **Carnot** са влажном паром није погодан за практичну примену јер има техничких проблема при сабијању и експанзији. Зато се циклус технички поједностављује на следећи начин: 1) детандер се замењује неупоредиво јевтинијм пригушним вентилом, тј. изентропска експанзија се замењује адијабатским пригушивањем (сл. 2); пошто је то изенталпски процес ( $h = \text{const}$ ) биће  $h_3 = h_4 > h_{4s}$ ; 2) да би се избегли проблеми услед усисавања влажне паре уводи се тзв. суво усисавање; тј. компресор усисава сувозасићену пару стања 1 (сл. 2.б), која, након изентропског сабијања, у кондензатор улази као прегрејана пара стања 2, кондензује се и у пригушни вентил улази као кључала течност стања 3; после адијабатског пригушивања из пригушног вентила излази влажна пара стања 4.



Сл. 2. Парна компресорска машина са пригушним вентилом и сувим усисавањем: а) шема машине (S - сепаратор); б) циклус у „T-s“ дијаграму

Описани циклус са пригушивањем и сувим усисавањем при умереним разликама температуре кондензације и испаравања је технички изводљив и често има прихватљив коефицијент хлађења. Стога се он користи и као упоредни циклус са чијим се коефицијентом хлађења упоређују коефицијенти хлађења других модификованих циклуса.

Са порастом разлике између температура кондензације и испаравања долазе све више до изражаја основни недостаци упоредног циклуса (пригушивање и размена топлоте при коначним разликама температуре код хлађења прегрејане паре у кондензатору, падови притиска при струјању расхладног флуида. итд). па се примењују одређене мере у циљу повећања коефицијента хлађења. Оне се могу сврстати у три категорије:

- прехлађивање кондензата;
- вишестепено пригушивање;
- вишестепено сабијање са међухлађењем.

#### 9.4. ПРИМЕНА РАСХЛАДНИХ МАШИНА

Примене вештачког хлађења се разврставају у три групе :

- ◇ за одржавање квалитета материјала, тј. за успоравање непожељних промена хемијских, биохемијских структурних карактеристика разних производа, у првом реду за конзервисање намирница;
- ◇ за стварање и одржавање карактеристика амбијента, тј. да би се остварила климатизација простора у којима се живи, ради и/или обављају разне производне активности;
- ◇ када вештачко хлађење представља главни или споредни процес при остваривању неке активности (производња, истраживање, лечење, спорт итд.).

#### 9.5. РАСХЛАДНИ ФЛУИДИ

Радна материја која у расхладној машини или топлотној пумпи обавља левокретни циклус назива се примарни расхладни флуид, или, краће, расхладни флуид. Секундарни расхладни флуид је флуид који одузима топлоту хлађења од хлађеног објекта (извора топлоте) и предаје је (обично испаравајућем) примарном расхладном флуиду. При томе секундарни расхладни флуид кружи као посредник, у затвореном току, између хлађеног објекта и расхладне машине (нпр: раствори разних соли или етилен гликола у води).

Увођењем у употребу халогених деривата парафинских угљоводоника (познатих под широко прихваћеним заједничким комерцијалним називом “**фреони**”), тридесетих година прошлог века, број расхладних флуида силно се повећао; за фреоне је (најпре у САД) уведен систем троцифрених бројчаних ознака иза заједничке ознаке **F** (“**Freon**”); касније, тај систем је међународно прихваћен, прилагођен је за све расхладне флуиде, а ознака **F** замењена је новом општом ознаком **R** („refrigerant”).

У новије време се понекад у литератури уместо ознаке **R** користи група од два до четири велика слова која указују на то који су елементи заступљени у молекулу, тј. указује на тзв. “тип” једињења. Нпр. **HC** (угљоводоници), **CFC** (потпуно халогенизовани хлорофлуороугљеници), **HCFC** (делимично халогенизовани хидрохлорофлуороугљеници), **FC** (потпуно халогенизовани флуороугљеници) и **HFC** (делимично халогенизовани хидрофлуороугљеници).

Неки примери означавања расхладних флуида:

- Бројевима од 400 до 499 означавају се разне зеотронске смеше.
- Бројевима од 500 до 599 означавају се разне азеотронске смеше.
- Бројевима од 600-699 обележавају се по произвољном редоследу разна органска једињења, која се користе или могу да се искористе као расхладни флуиди. Тако нпр. за n-бутан и изобутан користе се ознаке R 600 односно 600a.
- Бројевима од 700 па надаље означавају се неоргански расхладни флуиди, тако што се после прве цифре (7) која указује да је реч о неорганском расхладном флуиду додају

још две цифре које показују његову релативну молску масу. Нпр. амонијак ( $\text{NH}_3$ ) има ознаку R 717, угљендиоксид ( $\text{CO}_2$ ) има ознаку R 744 итд.

## 9.6. ОСНОВНЕ КОМПОНЕНТЕ РАСХЛАДНИХ МАШИНА

### 9.6.1. КОМПРЕСОРИ

Компресори су основни елементи оних расхладних машина чији се компензациони процес заснива на утрошку механичког рада. У њима се радна материја (расхладни флуид) сабија како би се достигли и у неопходној мери премашили: температура понора и притисак који влада у размењивачу топлоте са понором.

Расхладни компресори могу да се поделе према принципу рада, величини расхладног учинка, начину херметизације, броју ступњева сабијања, врсти расхладног флуида и тако даље.

**Према принципу рада** компресори могу бити:

**Компресори запреминског дејства** у којима се усисана пара (одн. гас) сабија услед смањивања затворене радне запремине (тзв. “ћелије”) у којој се пара налази. Према начину формирања (одн. облику) ћелија и кинематским карактеристикама које из тога произилазе, ови компресори се деле на:

- (класичне) клипне компресоре са транслаторним кретањем клипова,
- ротационе компресоре, код којих се радна запремина формира између (једног или више) ротора и зидова цилинд(а)ра (кућишта), и
- спиралне компресоре, код којих се радне запремине формирају између спрегнутих цилиндричних спиралних површи у захвату, при чему покретна спирала не ротира већ орбитира унутар непокретне спирале.

**Струјни компресори**, код којих је пораст притиска резултат размене енергије при опструјавању лопатица турбомашине (турбокомпресори) или при мешању са радном паром која са великом брзином долази из млазника (парни ејекторски компресори одн. парни ејектори).

**Према величини расхладног учинка** компресори се деле на мале (до 10 kW), средње (од 10 до 50 kW) и велике (од 50 до 500 kW и више).

### 9.6.2. КОНДЕНЗАТОРИ

Кондензатори парних компресорских расхладних машина су размењивачи топлоте у којима се расхладни флуид кондензује предајући топлоту средству за хлађење кондензатора. У зависности од конструкције кондензатора и прегрејања паре на улазу, у кондензатору се, осим зоне кондензације засићене паре, (понекад) могу уочити и зоне хлађења и кондензације прегрејане паре, као и зона прехлађивања кондензата.

Код уобичајених расхладних инсталација кондензатори се хладе ваздухом и/или водом, при чему се код комбинованог хлађења користи ефекат ветрења (исхлапљивања) воде у ваздух. Кондензатори топлотних пумпи намењених грејању, хладе се најчешће водом или ваздухом, док се код специјалних топлотних пумпи кондензатори хладе оним флуидом чијем је загревању топлотна пумпа намењена.

### 9.6.3. ИСПАРИВАЧИ

Испаривачи парних расхладних машина су размењивачи топлоте у којима се испаравајућем расхладном флуиду доводи топлота, било непосредно од хлађеног објекта, било посредно - од секундарног расхладног флуида. Због разноврсне примене расхладних уређаја, постоји и велики број разноликих конструкција испаривача.

Класификација (подела) испаривача се обично врши **према намени** (врсти хлађеног објекта), расхладном флуиду и према конструкцији. Најпогоднија је општа подела према намени са потподелама према конструкцији и врсти расхладног флуида (где је то сврсисходно):

- **Испаривачи за хлађење течности:** Испаривачи за хлађење течности се најчешће израђују као добошасте испаривачи са цевним снопом унутар добоша, као плочасте испаривачи, или као потопљени базенски испаривачи; постоје још и специјалне конструкције испаривача намењене за хлађење течности преко зида суда у коме се она налази; то су обично испаривачке цевне змије или плаштови око хлађеног суда.
- **Испаривачи за хлађење гасова (најчешће ваздуха;** израђују се од оребрених цеви. Расхладни флуид испарава унутар цеви; оребрење је са стране ваздуха; због велике висине (реда величине пречника цеви), ребра се најчешће израђују посебно, од лима или лимене траке, па се након тога навлаче односно намотавају на цеви и на погодан начин фиксирају на задатом међусобном растојању;
- **Специјални испаривачи;** поред наведених, у пракси се користе и испаривачи специјалне намене: за производњу љуспичастог леда, за брзу производњу леда у калупима (тзв. “rapid-ice” уређаји) итд.

Веома важна подела испаривача је према **количини расхладног флуида** која им се доводи:

- **суви,** када се у испаривач доводи онолико течности колико у њему може да испари (у ствари, због несавршености регулисања протока, доводи се незнатно мање, тако да из њега излази врло мало прегрејана пара), или
- **преплављени** (када им се доводи вишеструко више течности); при томе се коэффициент циркулације  $n$  (однос количине доведене према количини испарене течности расхладног флуида) бира у зависности од врсте хлађеног објекта. Циркулација течности кроз преплављене испариваче може бити пумпна или гравитациона.

#### 9.6.4. ПОМОЋНИ АПАРАТИ

За разлику од главних елемената инсталације, у којима се остварују основне промене стања које карактеришу циклус расхладног флуида (нпр. испаравање, сабијање, кондензација...), помоћни апарати су опционални елементи расхладне машине чији је задатак да побољшају њене термодинамичке (1) и/или експлоатационе карактеристике (2).

Прву групу помоћних апарата сачињавају разни размењивачи топлоте (спољашњи и унутрашњи прехлађивачи кондензата, међухладњаци, хладњаци уља и сл.), пригушни сепаратори и/или њихове комбинације које омогућавају модификовање циклуса у циљу повећања учинка и/или коефицијента хлађења.

Другу групу сачињавају разни помоћни апарати чији је основни задатак да спрече нежељене режиме рада, ублаже или елиминишу последице услед несавршености конструкције и/или поступака монтаже и тиме омогуће дуготрајан и несметан рад, као и лакше опслуживање (нпр. одвајачи уља, одвајачи ваздуха, филтери, сушачи...). При томе, поједини помоћни апарати из ове групе доприносе и уштеди енергије, зато што, интензивирајући размену топлоте, омогућавају повољније температурске режиме рада.

#### 9.6.5. ЦЕВОВОДИ

Цевоводи повезују све релевантне компоненте у јединствену расхладну инсталацију.

При струјању у цевоводима, енергија расхладног флуида опада због трења (односно пада притиска) и размене топлоте при коначним разликама температура. Међутим, пад енергије расхладног флуида и инвестициони трошкови нису једини параметри о којима треба водити

рачуна при избору брзине струјања (чиме се у ствари одређује унутрашњи пречник цеви): у неким случајевима брзина струјања мора бити довољно велика да обезбеди транспорт течне фазе или уља и тиме спречи њихово нагомилавање у цевоводу, док је у другим ограничена допуштеним падом притиска (нпр. у уисним водовима према компресорима).

## 9.7. АУТОМАТИКА РАДА РАСХЛАДНИХ ИНСТАЛАЦИЈА

Поуздан, економичан и енергетски ефикасан рад расхладне инсталације подразумева сталан надзор, одржавање релевантних параметара у задатим границама, као и благовремене интервенције у циљу отклањања непогодних радних режима који могу проузроковати опасности по људе, околину, ускладиштене производе и/или саму инсталацију. Без аутоматизације, остваривање тих циљева је неекономично или чак немогуће.

### 9.7.1. За аутоматизацију рада расхладних инсталација користе се:

- ◇ Уређаји за аутоматски надзор и сигнализацију, који служе за мерење, показивање и бележење релевантних параметара рада машине или хлађеног објекта. За приказивање радног стања инсталације и објекта користи се често тзв. сипонтичка шема на којој се лампицама разних боја означава погонско стање елемената инсталације.
- ◇ Уређаји аутоматске заштите и/или упозоравања, који аутоматски искључују из рада поједине делове или целокупну инсталацију и/или активирају одговарајући звучни и/или светлосни аларм ако неки од релевантних параметара рада изађе из предвиђеног опсега. Као заштитни уређаји се најчешће користе термостати и пресостати; то су термометри, односно манометри, са електричним прекидачем, који аутоматски прекидају рад штићене машине када предметна температура или притисак добију нежељене вредности;
- ◇ Уређаји за аутоматску регулацију, који служе за одржавање релевантних параметара рада расхладног постројења и хлађеног објекта, најчешће у унапред задатим границама или (ређе) по унапред задатом програму. У новије време расте тренд примене тзв. оптималних регулатора код којих је задата вредност регулисане величине функција измерених вредности једног или више утицајних параметара и одређује се рачунаром по задатом, претходно унетом програму.

### 9.7.2. Регулисани параметри

Најважнији релевантни параметри од чијег успешног контролисања битно зависи исправан рад расхладне машине и/или спрегнутог објекта (грејања и/или хлађења) су:

- Температура хлађеног објекта;
- Проток расхладног флуида кроз суве испариваче
- Притисак (температура) испаравања
- Притисак (температура) кондензације
- Температура паре на потису компресора
- Ниво течности расхладног флуида у преплављеним испаривачима или сепараторима

### 9.7.3 Врсте регулатора

У расхладним инсталацијама примењују се, како регулатори директног дејства (без појачивача), код којих се регулишући орган покреће непосредно од стране давача, тако и регулатори посредног дејства, који имају појачавач и код којих регулишући орган ради у серво спрези (за његово покретање се обично користи притисак расхладног флуида испред регулатора) или пак помоћна енергија доведена од споља (електромагнетни, електромоторни, пнеуматски или комбиновани регулатори); при томе регулатори могу бити било континуалног, било позиционог дејства (најчешће двопозициони, тзв. “on-off” регулатори).

Потребна тачност регулисања је обично таква да допушта примену статичких регулатора (тзв. Пропорционални, или P регулатори). Астатички регулатори (тзв. Интегрирајући, или, I регулатори), код којих је брзина промене регулишуће величине сразмерна одступању регулисане величине од задате вредности, су у принципу савршенији и тачнији, али су сложенији и скупљи, па се зато знатно ређе примењују.