

Hűtő körfolyamat

Ennek a fejezetnek a tanulmányozásához javasoljuk a következő sorrendet követni

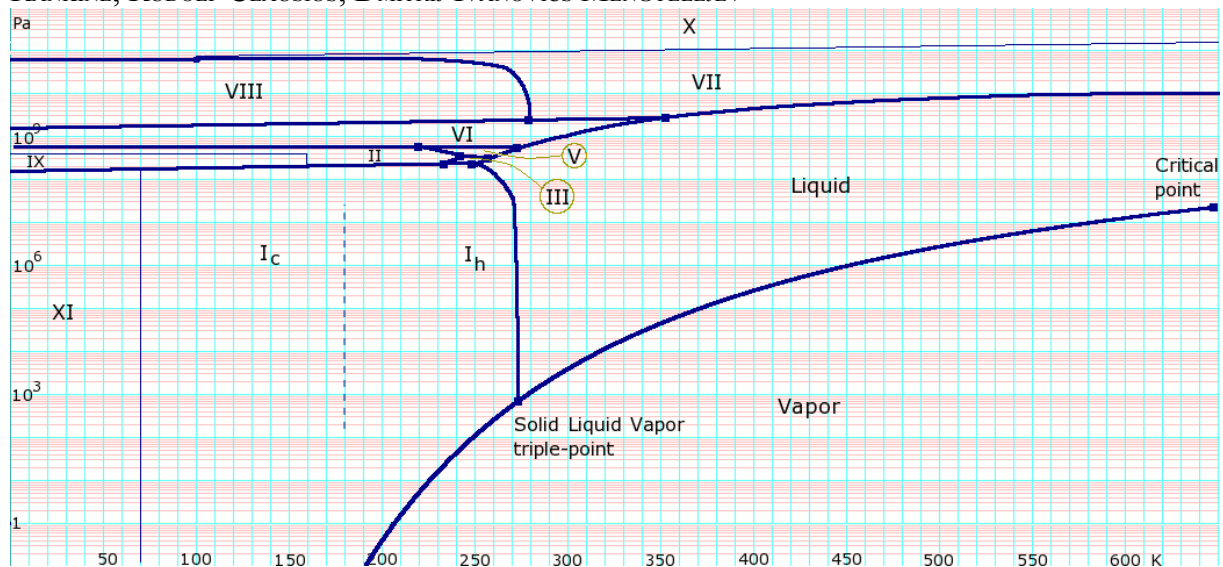
- A kezdetek
- Carnot körfolyamat
- Linde-elv
- Halmazállapotát változtató hűtőközeg
- Termodinamikai diagramok
- A kompresszoros hűtőgép
- A kompresszoros hűtőgép üzemének kiegészítései
- A hűtőközegek és közvetítő közegek
- Hűtőközegeként használatos elegyek
- A Föld légkörét károsító közegek
- Az abszorpciós hűtőgép

A kezdetek

A XVIII. századig csupán egyetlen lehetőség állt rendelkezésre a hűtött tárolásra: a szalmával bélelt *jégverem*. WILLIAM CULLEN volt az első, aki nyilvánosság előtt megtartott előadásában *éter* elpárologtatásával jeget állított elő. Az éter rendkívül nagy párologáshője képes jelentős nagyságú hő elvonására, de ipari folyamatként még nem használható.

A *gépszerkezeti* alapokat szintén a XVIII. század teremtette meg. Létrejött a dugattyús gőzgép, az ehhez szükséges szerkezeti elemek: a tolattyúk, szelepek, forgattyús mechanizmus THOMAS NEWCOMEN, JAMES PICKARD, JAMES WATT.

A XIX. század elején elkezdődött a körfolyamatok *elméletének* megfogalmazása ROBERT BOYLE, EDME MARIOTTE, JAMES PRESCOTT JOULE, JAQUES CHARLES, JOSEPH LOUIS GAY-LUSSAC, ÉMILE CLAPEYRON, JOHN DALTON, LORD KELVIN (eredetileg William Thomson), WILLIAM JOHN MACQUORN RANKINE, RUDOLF CLAUSIUS, DMITRIJ IVÁNOVICVS MENGYELEJEV



A fenti ábra ($T-p$ diagram) a legismertebb közeg, a víz tulajdonságait szemlélteti. Figyelemre méltó például végig követni a 100 °C-os (373 K-es) *hőmérséklet vonalát alulról-felfelé*. 10⁵ Pa nyomás alatt légnemű (vapor). Felette cseppfolyós, kb. 3·10⁹ Pa nyomásig, ott *megszilárdul*, és a VII-es számmal jelzett kristálytani állapotba megy át. Kövessük végig a fagyási görbét is! A víz egészen -20 °C-ig cseppfolyós lehet (liquid), ott átmegy a III jelű kristálytani állapotba (kb. 7 MPa nyomás hatására).

Az itt következő leírásokban a hűtőközeg elméleti modellje az ideális gáz

A Carnot körfolyamat

NICOLAS LÉONARD SADI CARNOT azt a körfolyamatot kereste, amellyel a lehető legtöbb hőenergiát lehet mechanikai munkává átalakítani. *Réflexions sur la puissance motrice du feu (Válaszok a tűzzel működő gépek munkavégző képességére)*. Tisztázta azt, hogy

- nem lehet a hőenergiát teljes egészében munkává alakítani,
- meghatározta, hogy milyen állapotváltozások adják a legnagyobb hatásfokú körfolyamatot és
- mekkora lehet az így optimalizált rendszer maximális hatásfoka

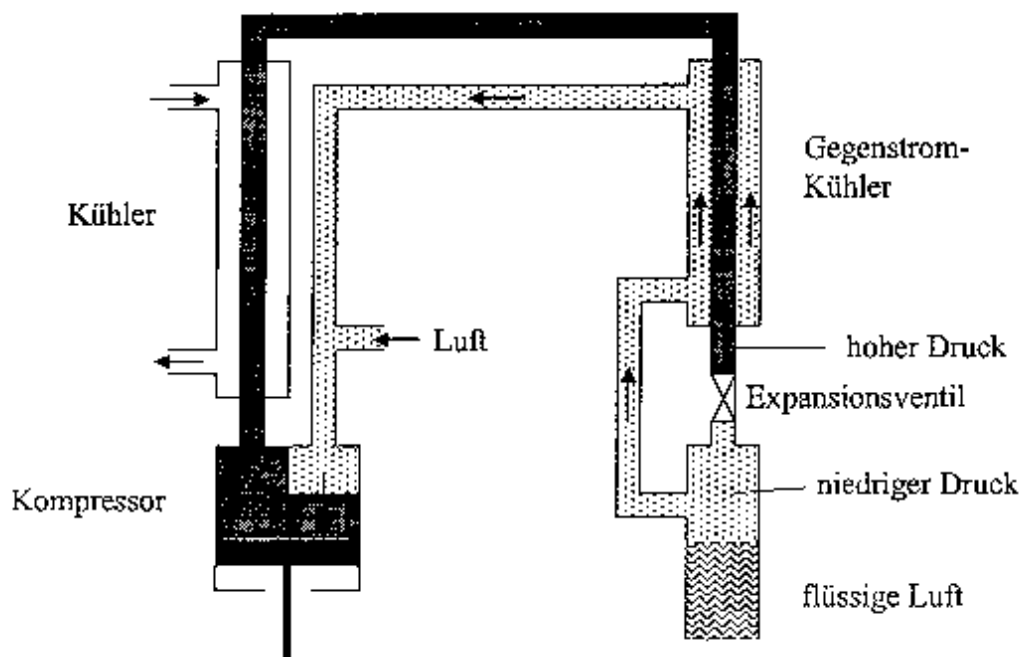
A körfolyamat négy elemi lépésből áll: izotermikus hőelvonás, adiabatikus kompresszió, izotermikus hőleadás, adiabatikus expanzió (ez a munkavégző ütem)

Ezeket az elveket a XIX. században a gőzgépek tervezéséhez használták fel. Ugyanebben az évszázadban megindultak az első kompresszoros hűtőgépek széndioxid, kéndioxid, ammónia, metilklorid, metiléter, és egyéb hűtőközegek felhasználásával.

A Linde-elv

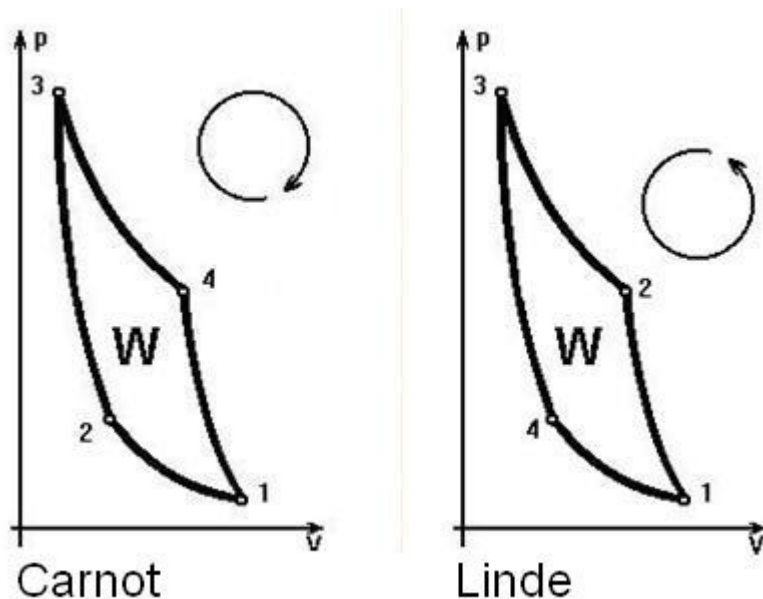
CARL PAUL GOTTFRIED VON LINDE 1871-ben gyárat alapított; ez a mai Linde AG elődje. A gyár lehetőséget adott új gépszerkezetek kifejlesztésére. Ekkoriban ismert volt már Mengyelejev munkáiból a kritikus pont fogalma. Linde a svájci Politechnikumban tanult, ahol felvetődött, hogy elméletileg bizonyítható, de kísérletileg bizonyítani még senkinek sikerült, hogy a levegő (és a gázok) cseppfolyósíthatóak.

A bizonyítás a következőképpen sikerült. A kompresszor által összesűrített levegőt egy ellenáramú hűtőn keresztül fojtószelepbe (Expansionsventil) vezette, ahol az adiabatikus expanzió következtében a levegő annyira kiterjeszkedett, hogy lehűlt a kondenzációs hőmérsékletére. A szedőedény felső részén megmaradt légnemű levegőt visszavezette az ellenáramú hűtőn, majd a külső hűtőn (Kühler) át a kompresszorba. Az edény alján gyűlt össze a cseppfolyós levegő (flüssige Luft).

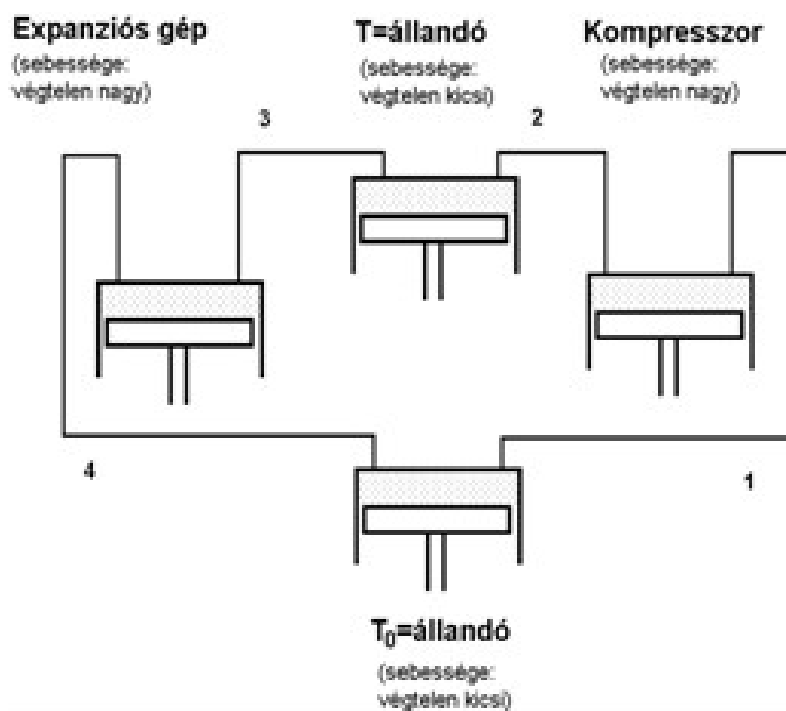


Ezzel párhuzamosan megfogalmazta a gépi hűtés alap gondolatát. Lényege: fordítsuk meg a Carnot körfolyamatot. Ennek eredményeként olyan hőerőgéphez jutunk, amely

- hőt szállít alacsony hőmérsékletű helyről magas hőmérsékletű helyre és
- mechanikai munkát fogyaszt a körfolyamat fenntartásához
- a lehető legnagyobb jóságú tényezővel



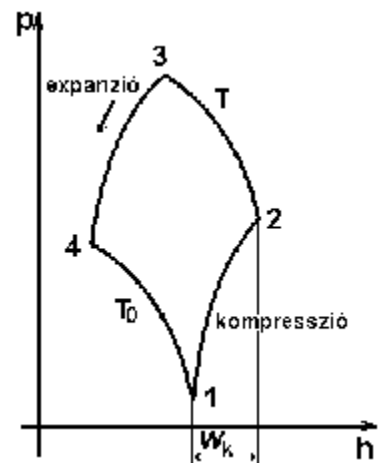
A görbék által körbezárt terület (a körintegrál) a körfolyamat munkája, a körüljárási irány ellentétes, tehát a munkavégzés előjele is ellentétes. $W = \oint p \cdot dV$; egységnyi tömegű közegre: $w = \oint p \cdot dv$, ahol w az egységnyi tömegű közeg munkavégzése, v a fajlagos térfogat. A részfolyamatok munkavégzése egyenként is felírható. Például az 1–2 adiabatikus kompresszió munkája $W_{12} = \frac{1}{\kappa - 1}(p_1V_1 - p_2V_2)$, ahol κ az adiabatikus kitevő. Az izotermikus kompresszió munkája $W_{23} = Q_{23} = RT \cdot \ln \frac{V_3}{V_2}$ egyenlő a leadott hőmennyiséggel. Négy állapotváltozásra írható fel a munkavégzés, azonban a valóságos hűtőgépek munkafolyamatát csakis az adiabatikus kompresszió W_{12} munkája tartja fenn. Izotermikus kompresszió (és expanszió) csak képzeletben létezik. Az ilyen gép például négy dugattyús gépből állna.



Sajnos, az izotermikus állapotváltozás létrehozásához a dugattyú sebességének végtelenül kicsinek kell lennie. Ezért az ilyen gép teljesítőképessége végtelenül kicsi. Másrészt, az az állapotváltozás, amelynél a dugattyú sebessége tart a végtelenhez, valóban adiabatikus volna, de ennek is van korlátja: a hangsebesség az adott közegben (gőzturbináknál a lefűtatás sebessége túllépheti a hangsebességet, ezt Laval-fűvókával érik el).

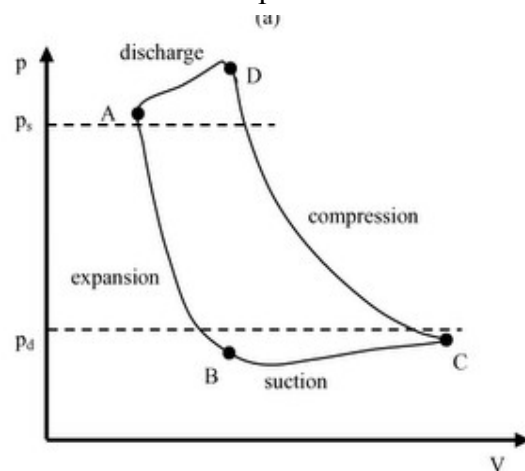
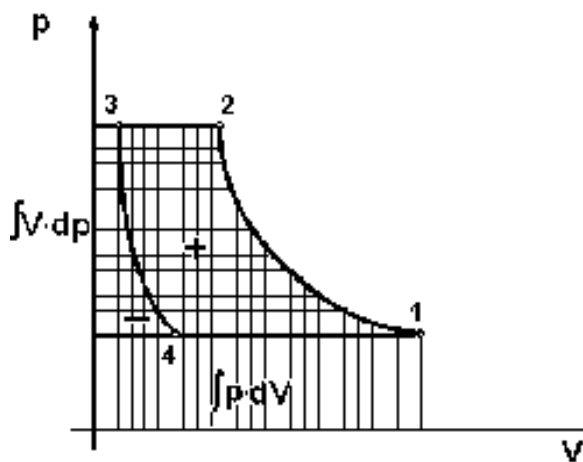
Ábráinkon a kompresszió kiindulópontjától sorszámozzuk a közeg állapotát. Ez tehát az 1-es pont, ilyen állapotú közeget szív a kompresszor. Így az adiabatikus kompresszió munkafolyamata az 1–2 állapotváltozás. A kompresszor 2-es állapotú közeget ürít, amely a környezetnek adja át a hőt a 2–3 izotermikus kompresszióval. (Hőleadás egy elméletileg végtelen hőkapacitású hőtartályba). A 2–3 folyamat alatt eltávozik a hűtőben felvett hő és a kompresszorba bevezetett mechanikai munka összege. A 3-as állapotú közeg egy expanziós gépben adiabatikus expanziót szenved a 3–4 folyamatban. Eközben hőmérséklete jelentősen csökken, egészen a hűtő hőmérsékletére. A 4-es állapotú közeg belép a hűtőbe, és a 4–1 folyamat alatt izotermikusan terjeszkedik, ugyanakkor elvonja a hőt a lehűtendő anyagtól.

Ugyanezt a körfolyamatot ábrázoltuk a hűtéstechikában használatos nyomás–entalpia-diagramon is. Ez az ábra eltér az ideális gázok p – h -diagramjától, ugyanis a 2–3 és a 4–1 izotermikus folyamatot függőleges egyenes írja le. Ugyanis az entalpia $dh = du + pdv + vdp$, és izotermikus állapotváltozásnál $pdv = vdp$; **ellentétes előjellel**. Így marad $dh = du = c_v dT$; ennek viszont az a következménye, hogy izotermikus állapotváltozásnál nem változik a belső energia, tehát az entalpia sem. Az ábrán ettől eltérő eset látható. Reális gázoknál ugyanis eltér egymástól az izotermikus és az izentalpikus állapotváltozás, úgy, ahogy az ábrán látható. Reális gázoknál a telítési határ közelében a VAN DER WAALS állapotegyenlettel számolunk. Az adiabatikus állapotváltozás vonala logaritmikus.



Ugyanezt a körfolyamatot ábrázoltuk a hűtéstechikában használatos nyomás–entalpia-diagramon is. Ez az ábra eltér az ideális gázok p – h -diagramjától, ugyanis a 2–3 és a 4–1 izotermikus folyamatot függőleges egyenes írja le. Ugyanis az entalpia $dh = du + pdv + vdp$, és izotermikus állapotváltozásnál $pdv = vdp$; **ellentétes előjellel**. Így marad $dh = du = c_v dT$; ennek viszont az a következménye, hogy izotermikus állapotváltozásnál nem változik a belső energia, tehát az entalpia sem. Az ábrán ettől eltérő eset látható. Reális gázoknál ugyanis eltér egymástól az izotermikus és az izentalpikus állapotváltozás, úgy, ahogy az ábrán látható. Reális gázoknál a telítési határ közelében a VAN DER WAALS állapotegyenlettel számolunk. Az adiabatikus állapotváltozás vonala logaritmikus.

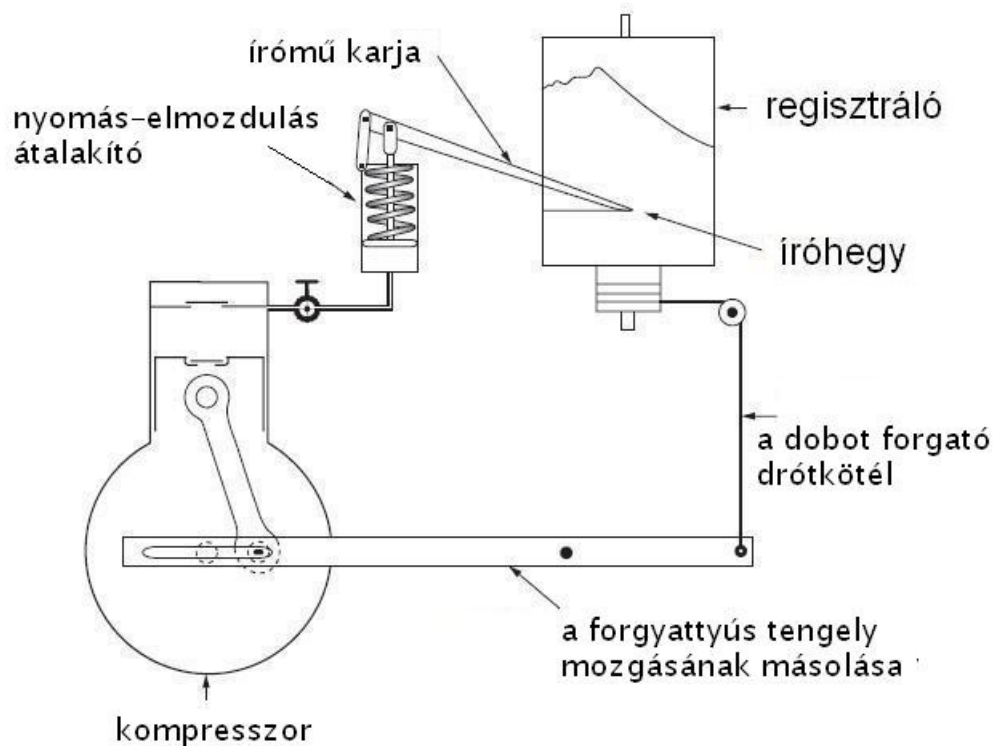
Új jelölésként megjelent az ábrán a w_k kompressziómunka is. Ennek az a magyarázata, hogy az entalpia fenti egyenletének jobb oldalán szereplő két első tag összege azonos a közölt hőmennyiséggel. Így az egyenletből csak ennyi marad: $dh = vdp$, s ennek a neve *technikai munka*. A következő ábrán megmutatjuk, hogyan kapcsolódik egymáshoz a fizikai munka és a technikai munka. A kompresszió folyamata az 1–2 adiabata. A görbéje alatti terület a vízszintes tengelyre vetítve a fizikai munka. A függőleges tengelyre vetítve a technikai munkát kapjuk. A vízszintes tengelyen most *nem* a fajlagos térfogat áll, hanem a térfogat. Ezért az ilyen ábra lehetővé teszi a teljes kompresszor munkafolyamat leírását (baloldalt az elméleti, jobboldalt a valóságos). Ennek részletei: 1–2 adiabatikus kompresszió. 2–3 a sűrített



közeg kitolása a nyomószelepen keresztül. A 3-as térfogat elméletileg nulla. Ha ez teljesül, akkor az 1–2 görbe alatti terület ténylegesen a technikai munka. A valóságban ez nem teljesül, szerkezeti okok miatt (a dugattyú beleütköznék a hengerfedélbe). Így a V_3 nagyobb nullánál, és ez némi hibát okoz a kompresszormunka kiszámításánál. Ezt a hibát elhanyagoljuk; ha ugyanis a kompressziómunka egyenlő a technikai munkával, akkor az egyenlő az entalpia megváltozásával. *Ezért a kompressziómunka értéke bármely entalpia-diagramról egyszerűen leolvasható (csak adiabatikus állapotváltozás esetén).*

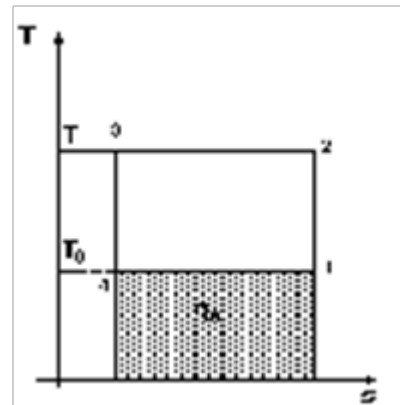
A V_3 neve: a kompresszor káros tere. A 3–4 (A–B) állapotváltozás a káros térben maradt közeg adiabatikus expanziója. Ezért a kompresszor nem nulláról, hanem csak a 4-es állapotból származó közeget tudja beszívni a szívóütemben, ezzel romlik a szállítóképessége. Az ábrán látható előjelek utalnak arra, hogy mikor van szüksége külső munkavégzésre a kompresszornak. Ha az 1–2 és a 2–3 folyamat munkavégzésre pozitív, akkor a 3–4 és a 4–1 folyamat munkavégzése negatív; annak megfelelően, hogy csökken-e, vagy növekszik a térfogat. Egyszerűsítve tehát feltételezzük, hogy a $w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41} \approx w_i$ értékével.

A szívás és a kiürítés folyamata egyebekben is eltér ettől; ezt a valóságos hűtőkörfolyamat ismertetésénél találjuk. Az ábrán egy nyomásindikátor vázlatát látjuk. Az indikátordiagram felvételét azért lehetséges mechanikus szerkezettel felvenni, mert a hűtőkompresszorok



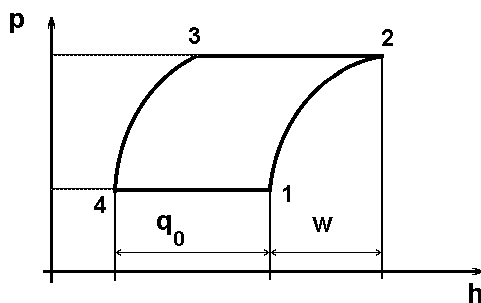
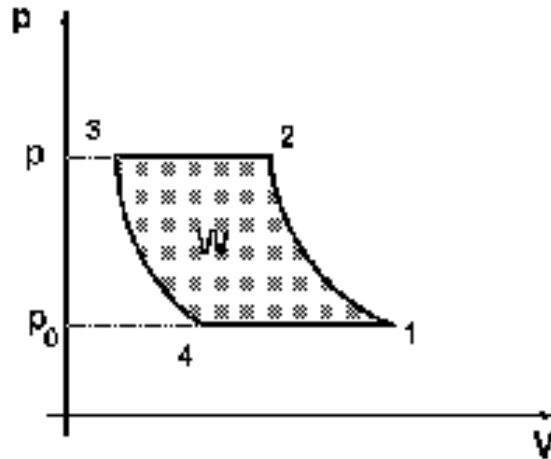
fordulatszáma jelentősen kisebb a belső égésű motorok fordulatszámánál. A rudazat és a drótkötél jobbra-balra forgatja a regisztráló dobra rögzített papírt. Ennek elmozdulása arányos a hengerűrtartalom változásával, tehát a térfogattal. Az ábra érdekessége, hogy *egyenáramú kompresszort* láthatunk. Ennek a szívószelepe a dugattyúfedélben van, és a forgattyúházból szívja a hűtőközeget. Megfigyelhető az is, hogy ezek nem vezérelt szelepek: a szelepnyitást a hűtőközeg nyomáskülönbsége végzi. Mindkettő jelentős eltérés a belsőégésű motorokhoz képest. Azokat a gépeket, – ezek a korszerűbbek, – amelyeknél mindkét szelep a hengerfedélben van, váltakozó áramú kompresszornak nevezzük. A legkorszerűbb gépek a turbokompresszorok és a csavarkompresszorok.

Az előzőekhez és a továbbiakhoz is meg kell jegyezni, hogy az extenzív mennyiség intenzív mennyiséggé válik, ha tömegegységre vonatkoztatjuk. A fenti egyenletek közül például: $dH = dU + pdV + Vdp$, $dH = dU = mc_v dT$, $W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} \approx W_t$



Következő ábránkon a megfordított Carnot-körfolyamatot a $T-s$ diagramon ábrázoltuk. (Ezt a diagramot gyakran használják belső égésű motorok vizsgálatára.) Első előnye, hogy valamennyi adiabata és izoterma egyenes vonal, ezért ezek értéke könnyen leolvasható. (Az adiabaták esetében a fajlagos entrópia értékére gondoltunk.) Ez az állítás bármilyen halmazállapotú közegre érvényes, sőt még akkor is, ha a közeg valamely folyamat során halmazállapot-változáson megy keresztül. A diagram legfontosabb tulajdonsága, hogy bármely görbe alatti terület azonos a hőközlés nagyságával. Az ábrán q_0 a hűtőben elvont hő; ezt a fajlagos entrópiából számítható hőmennyiséget jelöltük meg mintázattal. Ez a 4-1 állapotváltozást görbéje alatti terület.

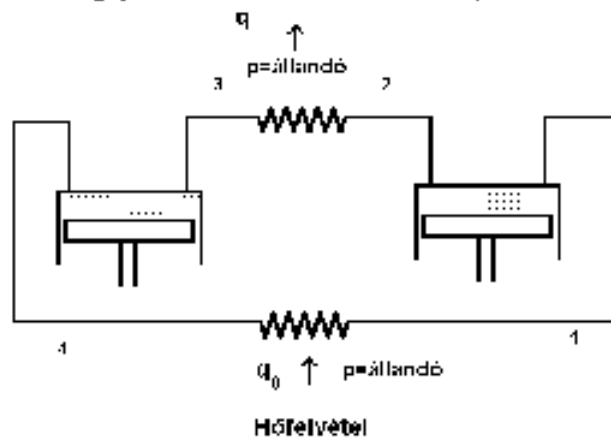
Mint láttuk, a körfolyamatnak van egy olyan kritikus része, amely akadályozza a realizálását. Ezért ezt a részt (az izotermikus állapotváltozást megvalósító gépet) megkíséreljük olyan szerkezeti elemmel felváltani, amely igen könnyen megépíthető és működtethető. Ez az elem csövekből, vagy egyéb módon megépített hőcserélő. A hőcserélőkben ideális esetben (ha kicsi az áramlási ellenállás, elméletileg nulla), az állapotváltozás izobár. Ez voltaképpen nem más, mint a Joule-körfolyamat megfordítását megvalósító gép. A 2-3 izobár állapotváltozás alatt p nyomáson leadja a hűtőben felvett hő és a bevezetett mechanikai munka összegét, a q hőmennyiséget. A körfolyamat másik újdonsága, hogy a 4-1 állapotváltozás



is izobár, ezalatt veszi fel p_0 nyomáson a lehűtendő anyagtól a q_0 hőmennyiséget.

A $p-v$ -diagramon most megjelenik a 2-3 és a 4-1 vízszintes állapotváltozások vonala. A diagram fő jellegzetessége, t.i. hogy a w munkavégzés mindig a

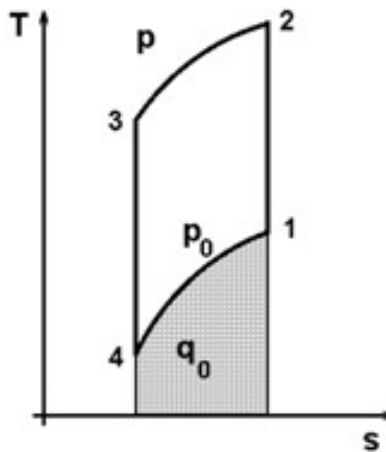
Expanziós gép Hőleadás Kompresszor



görbe alatti terület (ezúttal: a görbe által közbezárt terület), most is megfigyelhető.

A $p-h$ -diagramon a hőleadás és hőfelvétel most vízszintes egyenessé vált. Ha felidézzük a fajlagos entalpia egyenletét, látjuk, hogy **izobár** (de csakis izobár) állapotváltozásnál a közölt, vagy elvont hő teljes egészében

az entalpiát növeli, illetve csökkenti (vdp ugyanis nulla). Ennek hasznos következménye,



hogy az entalpia-diagramokról a hőmennyiség könnyedén leolvasható. Az ábrán q_0 -al jelöltem azt az entalpiaváltozást, amely a hűtőben elvont hőmennyiséggel egyenlő: $q_0=h_1-h_4$. (Ismét megemlítem: a kisbetűvel jelölt mennyiség a tömegegységre vonatkozik, ezért q_0 az egy kilogramm hűtőközeggel elvonható hőmennyiség.)

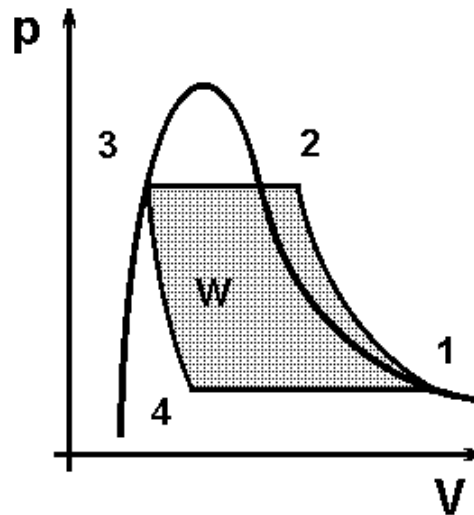
A T - s -diagram változott az előzőhöz képest; most már nem egyszerű téglalap a körfolyamat képe, mert az izobár állapotváltozás görbéje logaritmikus. A közölt hő azonban most is a görbe alatti terület. Példaképpen az ábrán jelölt állapotváltozás: p_0 nyomáson a hűtőközeg q_0 hőmennyiséget vesz fel a lehűtendő anyagtól, mialatt a hőmérséklete T_4 -ről T_1 -re, fajlagos entrópiája s_4 -ről s_1 -re növekszik. (Növekvő entrópia *bevezetett* hőmennyiséget jelent.)

Halmazállapotát változtató hűtőközeg alkalmazása

Minden eddigi leírás az ideális gázok jól megismert tulajdonságaira épül. Erre alapozva, de ezt meghaladva egy lépéssel tovább megyünk a realizálható hűtőkörfolyamat megismeréséhez

A Carnot után megismert Joule-körfolyamat is rendelkezik hátrányokkal. Ezek tételes felsorolásától itt most eltekintünk. Csupán egyet érdemes megemlíteni: a légnemű hűtőközeg rendkívül nagy térfogatú, s ezért a megvalósításához rendkívüli gépméretet szükségesek. Tudjuk azonban, a folyadékok térfogata általában három nagyságrenddel kisebb a gázok térfogatánál. A körfolyamat gépi megvalósításához nem kell új ábrát rajzolnunk, az ugyanis tökéletesen azonos azzal, amit már a Joule-körfolyamatnál megismertünk. Az eltérés csupán annyi, hogy most a hőcserélőkben halmazállapot-változás játszódik le.

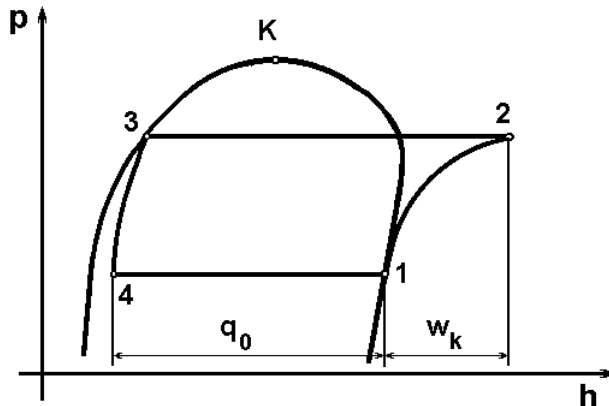
A p - v -diagramban új vonalak jelennek meg. Ezek a folyadékot és a légnemű anyagot választják el egymástól. A baloldali (ezzel érintkezik a 3 jelű pont) *folyadék határgörbének* nevezzük, mert tőle balra a hűtőközeg folyadékállapotban van. A jobboldali görbe (ezen látható az 1 jelű pont) *telített gőz-állapotot* jelent. Bármilyen kicsiny hőközlésre ennek az anyagnak a hőmérséklete növekszik, ezért ezt az állapotot (a görbétől jobbra) *túlhevített gőznek* nevezzük. Bármilyen kicsiny hőelvonás hatására az ilyen anyag elkezd cseppfolyósodni, és állapota balra tolódik el. Talán furcsa, de az ilyen állapotú anyagot *nedves gőznek* nevezzük, de ez most nem a víz jelenlétére utal, hanem arra, hogy a közeget egy része cseppfolyósodott. Ez lehet akár ammónia, akár freon, akár bármilyen hűtőközeg folyadéka.



A fentieket jobban megérthetjük, ha végigkísérjük a körfolyamatban a közeget állapotváltozásait. Az adiabatikus kompresszió az 1-es ponttól a 2-es pontig tart. Ennek képe a már jól ismert κ kitevőjű hiperbola. Ha a kompresszió telített gőz állapotból indul, a közeget kompresszió közben túlhevül (az 1-2 görbe meredekebb, mint a telített gőz vonala; a felső határgörbe). A kompresszorból távozó közeget bevezetjük a *kondenzátorba*. Mivel ez szerkezetileg hasonló egy hőcserélőhöz, benne az állapotváltozás csakis izobár lehet. Az ezt ábrázoló 2-3-vonal vízszintes. Ennek kezdetén a hűtőközeg mindaddig hűl, amíg a felső határgörbét eléri, majd elkezdődik a cseppfolyósodása. A közeget teljes egészében

cseppfolyósodik; ezért a V_3 a folyadék térfogata. (Ha a vízszintes tengelyre a fajlagos térfogatot mértük fel, az ábra pontosan ugyanígy néz ki. Ebben az esetben v_3 a folyadék fajlagos térfogata. Az ábra arányai torzítottak a szemléletesség kedvéért, ne felejtjük el, hogy a folyadék V_3 térfogata csaknem ezerszer kisebb a túlhevített gőz V_2 térfogatánál.)

A folyadékot egy (most még) dugattyús szerkezetű expanziós gépbe vezetjük, amelyben a hűtőközeg adiabatikusan terjeszkedik V_3 -ról V_4 térfogatra. Térfogat-növekedése abból adódik, hogy az anyag egy része ezalatt elpárolog, s, mint tudjuk, a gőz térfogata rendkívül nagy a folyadékéhoz képest. (Az expanzió után a közeg nagy része továbbra is cseppfolyós. Azonban a folyadékok inkompresszibilitása miatt ez a *folyadék-rész* csupán mintegy egymilliomodnyit növeli a térfogatát, míg a nyomása p_3 -ról p_4 -re csökken.)

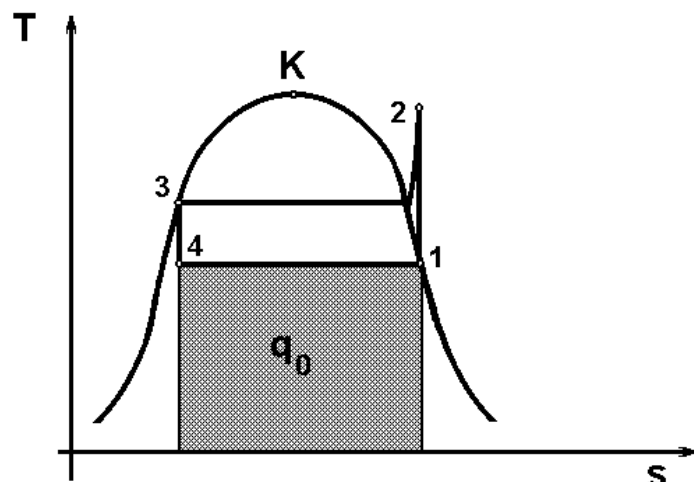


A 4–1-állapotváltozás során a hűtőközeg teljes egészében elpárolog, miközben térfogata V_4 -ről V_1 -re növekszik. *Elpárologatónak* nevezzük azt a szerkezeti elemet, amelyben ez a folyamat lejátsszódik. Ez a hűtőgép legfontosabb eleme. Ennek során hőt von el a lehűtendő anyagtól. Minthogy a forrás folyamata intenzív konvekcióval jár, ennek a folyamatnak a hőátadása igen jó. Azonban nem ez a legfőbb előnye! Legfőbb előnye abban jelentkezik, hogy a párolgás, ha izobár, *akkor egyben izoterm* is. Emiatt a

körfolyamat jósági foka elérheti a Carnot körfolyamat hatásfokát! Vagyis, egészen könnyen elérhető például, hogy 1 kW teljesítmény befektetése árán 2,5 kW hőáramot vonjunk el a hűtőben.

A p - h -diagramban is fel kell már tüntetnünk a határgörbét, hiszen cseppfolyósodó hűtőközeget használunk. **K** jelzi a kritikus pont helyét. Az ábrán megjelöltük a diagram mindkét fontos tulajdonságát; tehát, hogy *izobár* állapotváltozásnál az entalpiaváltozás megadja a hőhözlés nagyságát (q_0), és, hogy *adiabatikus* állapotváltozásnál az entalpiaváltozás megadja a kompressziómunkát (w_k).

A T - s -diagramban a határgörbék harang-alakúak. Abból következően, hogy halmazállapot-változásnál az izobár állapotváltozás egyben izoterm is, a körfolyamat képe ismét a Carnot-körfolyamat képéhez hasonló. Attól csupán egy ponton tér el: az 1-2 kompresszió után a 2-3 kondenzáció meglehetősen meredek izobárral kezdődik, hiszen ilyenkor még csak a hűtőközeg hőkapacitása ellenében történik hőelvonás.

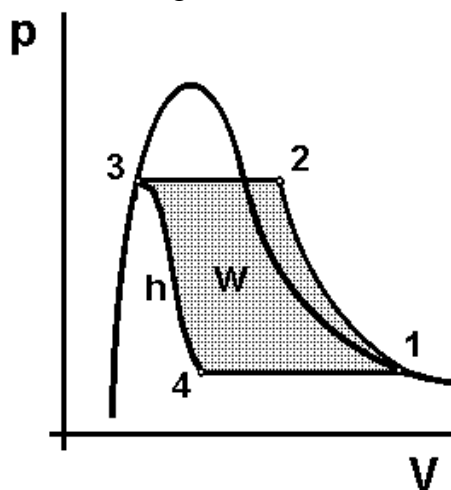
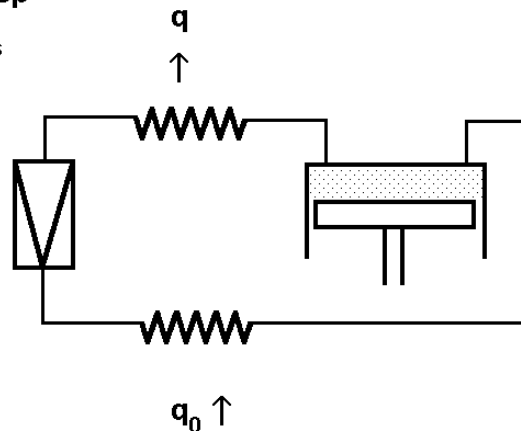


Fojtószelep alkalmazása

Az előzőekben megismert gépnek van egy nagy hátránya. Ez az expanziós gép szerkezetéből adódik. Ha megnézzük a 3-4 görbe alatti területet, láthatjuk, hogy az expanziós folyamat mechanikai munkát termel ugyan vissza, ez azonban nagyon kicsi a kompresszorban bevezetett munkához képest. Ha tehát ezt elhagyjuk, sokkal egyszerűbbé válik a gép, és a hatásfoka csak öt-tíz százalékkal romlik. Érdemes tehát elhagyni. Helyette egy fojtószelepet alkalmazunk, amelyben a hűtőközeg le tud expandálni a kondenzátor nyomásáról az elpárologtató nyomására. A fojtószelep a legegyszerűbb esetben (például a háztartási hűtőszekrényekben) egy kapilláris cső. Ipari hűtőgépekben bonyolultabb fojtószelepeket alkalmaznak, de erről a szakgéptan és a szaktechnológia feladata részletezést adni.

Fojtószelep

(izentalpikus
expanzió)

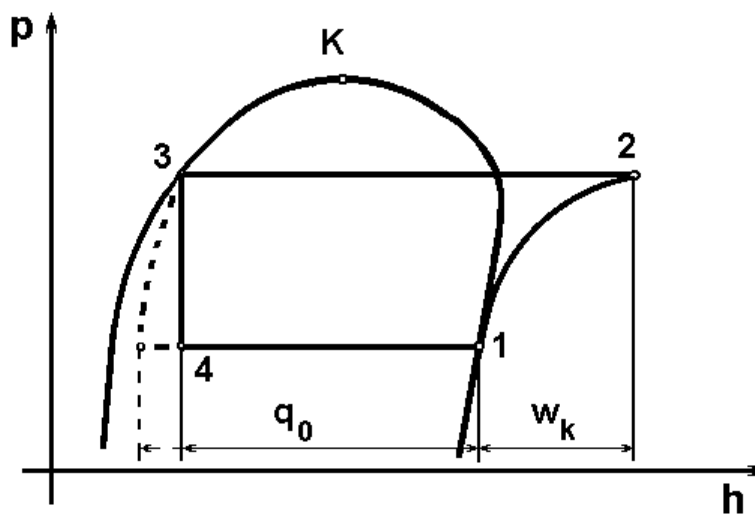


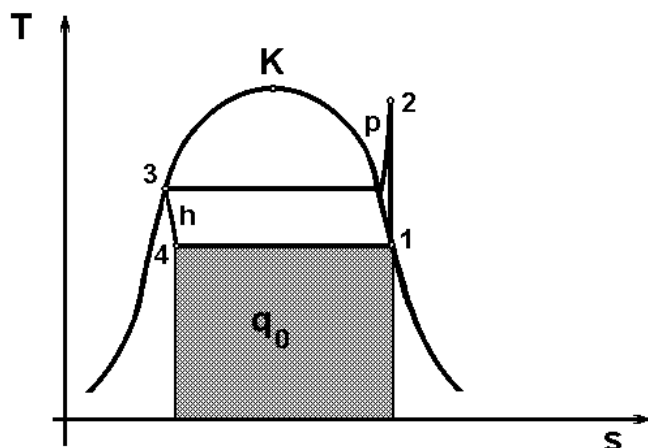
A fojtószelepes állapotváltozás, – sebességétől függően, – két véglet közé eshet. Ha az expandáló közeg sebessége igen nagy, akkor a folyamat adiabatikus. (Mint ismeretes, anyagi közegekben a hangsebességet túllépni nem lehet.) Így zajlik le az expanzió a gőzturbinákban. Hűtőgépekben ezzel szemben viszonylag lassú az expanzió, ilyenkor az állapotváltozás az izentalpikushoz közelít.

Az állandó entalpiájú állapotváltozás képe p - v -diagramban hasonló a mellékelt ábrán láthatóhoz (3-4). Ezt csak úgy tudtam ábrázolni, hogy eltúloztam a jellegzetességeit, mert ebben a diagramban az izotermikus, izentalpikus és adiabatikus (izentrópikus) állapotváltozások közti különbség alig

vehető észre a folyadékállapot közelében. A körintegrál értéke természetesen most is a w munkavégzés.

p - h diagramban mindennek újabb előnyét láthatjuk. Ez az, hogy az izentalpikus állapotváltozás függőleges egyenes, ezért könnyű megrajzolni, kiértékelni, és leolvasni. Ha összehasonlítjuk az expanziós gép munkafolyamatával, látjuk, hogy azt nagyobb h_4 entalpia-értéknél fejezi be, ezért kisebb az egy kilogram hűtőközeggel az elpárolog-





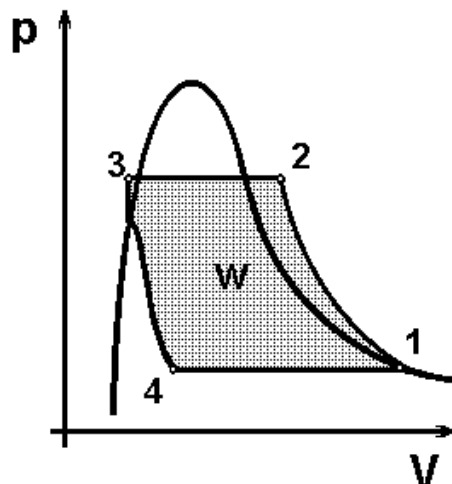
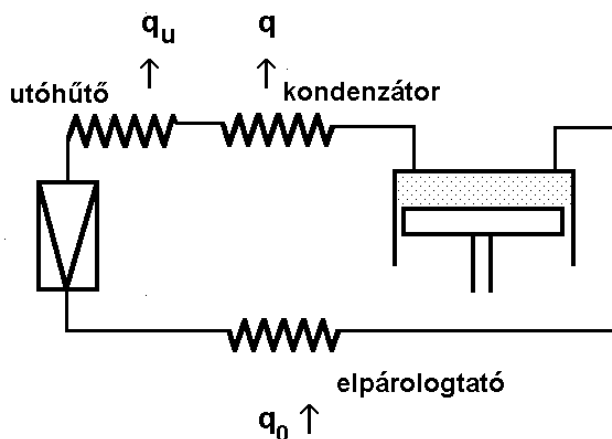
tatóban elvonható q_0 hőmennyiség; pont annyival, amennyi expanzíómunkát elveszítettünk azáltal, hogy elhagytuk az expanzíós gépet. Ezt a jellegzetes ábrát sokszor látjuk majd a hűtőgépekkel kapcsolatos könyvekben, annyi eltéréssel, hogy praktikus okokból a nyomást a függőleges tengelyre *logaritmikus* léptékben mérik fel.

A T - s -diagramban megjelenik a 3-4 izentalpikus állapotváltozás, amelyről eddig nem beszéltünk. Jól látható, hogy a lassú expanzió alatt nő a közeg entrópiája, ami hőbevezetést jelent; a

környezet fűti a terjeszkedő közeget. Ennek a hőnek kis része munkává alakul, tehát növekszik a közeg áramlási sebessége (pontosabban: a fajlagos mozgási energiája). A jelenségből számunkra a lényeg, hogy a q_0 görbe alatti terület kismértékben ugyan, de csökken.

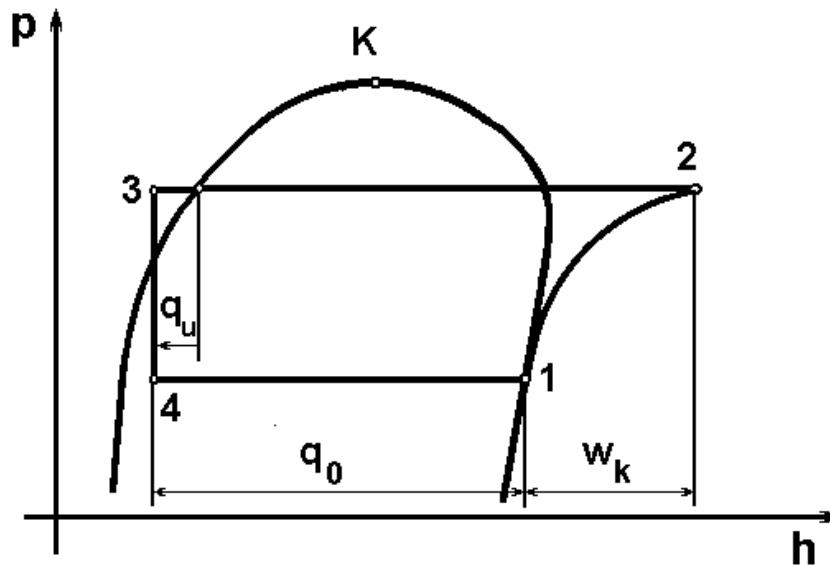
Hűtő körfolyamat utóhűtéssel

Az utóhűtés jelensége először még véletlenül jött létre. Téli üzemben a környezetnek sikerült annyira lehűtenie a hűtőközeget, hogy az teljesen kondenzálódott, és a folyadék még túl is haladta a kondenzációs hőmérsékletet. Kiderült, hogy ennek következtében megnőtt a hűtőgép teljesítőképessége. E jelenség kihasználása céljából aztán olyan hűtőgépeket kezdtek építeni, amelyeknek külön olyan utóhűtőjük is volt, amelynél biztosították, hogy a környezet hűtőhatása éppen az utóhűtőn érvényesüljön a leghatékonyabban. Ennek legegyszerűbb módja a hőcserélő felületének túlméretezése.

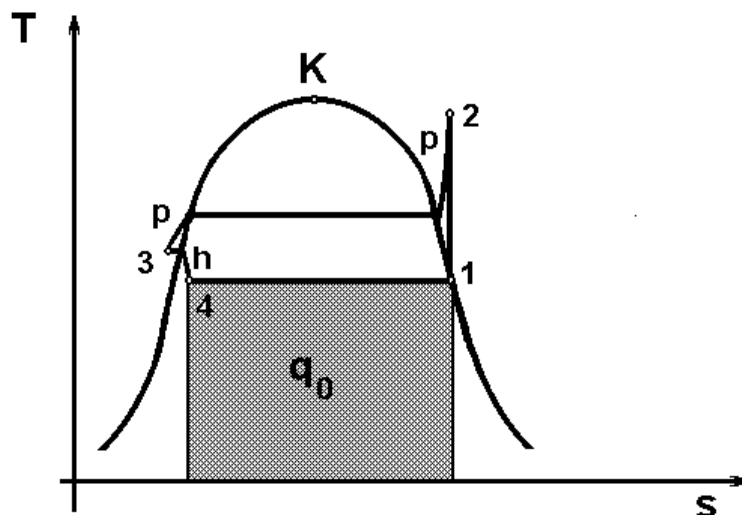


Ezen a ponton célszerű numerikus példával is megvilágítani a hűtőközeggel lezajló folyamatokat. A kompresszorból távozó közeg hőmérséklete lehet például $120\text{ }^\circ\text{C}$. Ez az anyag túlhevített gőz állapotban van. A kondenzátorba kerülve először lehül a kondenzációs hőmérsékletre; a hőelvonás ekkor a hőkapacitás rovására történik. Ha a környezet (pl. az üzemudvar) 35 fokos hőmérsékletű, a közeg 50 fokon elég hatékonyan képes a hőt leadni. Ez a hő most a *kondenzációs hő*. A kondenzátorból tehát a folyadékleválasztó $50\text{ }^\circ\text{C}$ -os hűtőközeg folyadékot enged átfolyni az utóhűtőbe. Ott a folyadékot még további 8 - 10 fokkal le lehet hűteni. Ha ezt a folyadékot a fojtószelepen leexpandáltatjuk, nem változik ugyan a párolgási hőmérséklet, de az elpárolgatóba olyan

hűtőközeg kerül, amelynek folyadéktartalma 5-10 százalékkal kisebb, mint utóhűtés nélkül lenne.

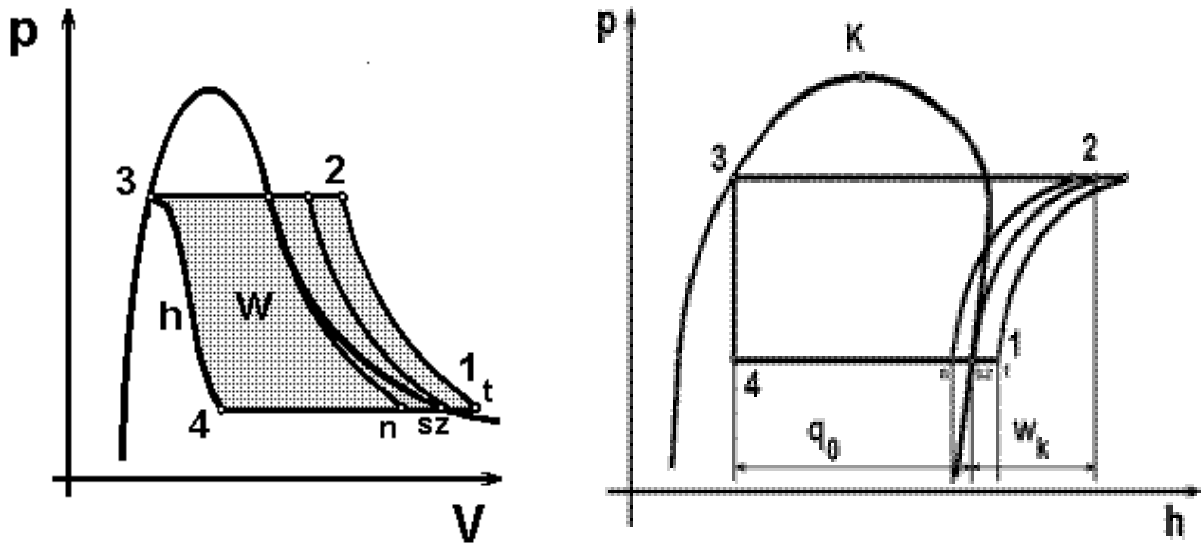


$p-v$ -diagramon ábrázolva megjelenik két állapotváltozásnak a folyadéktartományba eső része. Az utóhűtés a határgörbétől a 3 jelű pontig vízszintes egyenes, hiszen izobár állapotváltozás. Utána a fojtószelepes expanzió a 3-as ponttól lefele a határgörbéig gyakorlatilag függőleges egyenes, ugyanis a folyadékok izentalpikus állapotváltozása közel állandó térfogatú. A kompresszibilis folyadék entrópiája növekszik, ez látható a $T-s$ -diagramon. Ez azt jelenti, hogy a hőmérséklet-csökkenésből származó belső energia csökkenésnél nagyobb a kompresszibilis folyadék expanziómunkája. Az ábrán erősen eltúlzott arányban látható ez a jelenség. Az utóhűtőben leadott q_u hőmennyiséget az ábrán bejelöltük, ez a nyereség, amihez az utóhűtő alkalmazásával hozzájutunk. Ennyivel növekszik meg a q_0 , a hűtőben elvonható hőmennyiség.

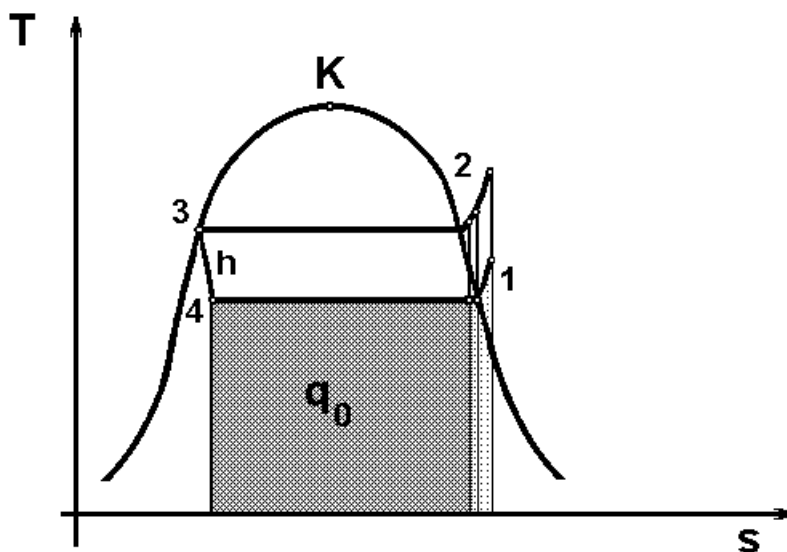


$T-s$ -diagramban az utóhűtést a már megismert formájú izobár mentén ábrázoljuk. A fojtószelepes expanzió kezdetben az izotermákhoz közel halad, a 3-as ponttól egészen a folyadék határgörbéig. A jelenséget olyan $p-h$ -diagramban figyelhetjük meg, ahol a folyadékmező adatait is megrajzolták. Ott a hőmérséklet-vonalak a folyadékmezőben függőleges egyenesek.

Nedves, száraz, túlhevítéses kompresszorüzem

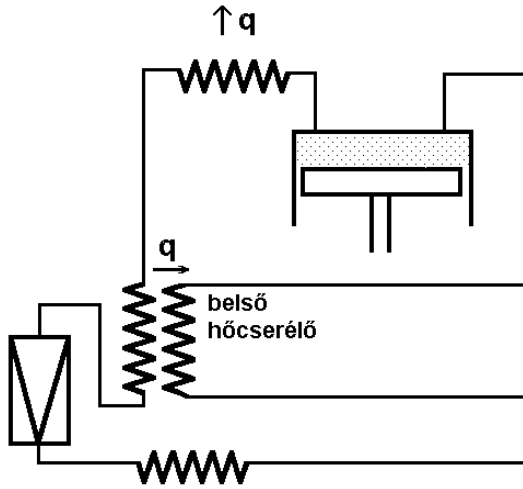


A kompresszor üzemét aszerint nevezzük meg, hogy milyen állapotú hűtőközeg-gőzt szív be. A p - V -diagramon ezt az n , sz és t betűkkel jelöltük. Ezek az esetek sokkal inkább spontán, mint előre tervezve jönnek létre. Így télen, ha kicsi a hűtőteljesítmény-igény, előfordulhat, hogy a kompresszor nedves gőzt szív (az 1-es pont az n pontba tolódik el), a hűtőközeg némi folyadékot tartalmaz. Ennek előnye, hogy a kompresszornak kicsi a hőterhelése, és kicsi a kompresszormunka. Hátránya, hogy a kompresszor folyadékütést kap; t.i. a folyadékcseppecskék nagy sebességgel a szerkezeti részeknek nekicsapódva ott eróziót okoznak. A száraz kompresszorüzem ilyen szempontból biztonságos. Ezt a nagy hűtőgépekben folyadék-elválasztó biztosítja. A túlhevítéses kompresszorüzem hátrányát leginkább a p - h -diagramon láthatjuk. Ez abban nyilvánul meg, hogy az adiabaták jobbra (a magasabb hőmérsékletek irányába) haladva egyre lejtősebbek, ami azzal jár, hogy egyre nagyobb mértékben növekszik a w_k kompresszormunka (a 2-es pont erősen jobbra tolódik), s ezzel a gép gazdaságossága folyamatosan romlik.



T - s -diagramon legfőként az figyelhető meg, hogy a hűtőben elvonható q_0 hőmennyiség növekszik, amint a túlhevítéses üzem felé haladunk. Észrevehető, hogy a felső határgörbétől jobbra eső vonal (az elpárologtatóban lejátszódó állapotváltozás) izobár, ezért nem vízszintes. A megnövekedett hőmérséklet miatt a hűtőközeg túlhevített gőz; más elnevezés szerint telítetlen gőz.

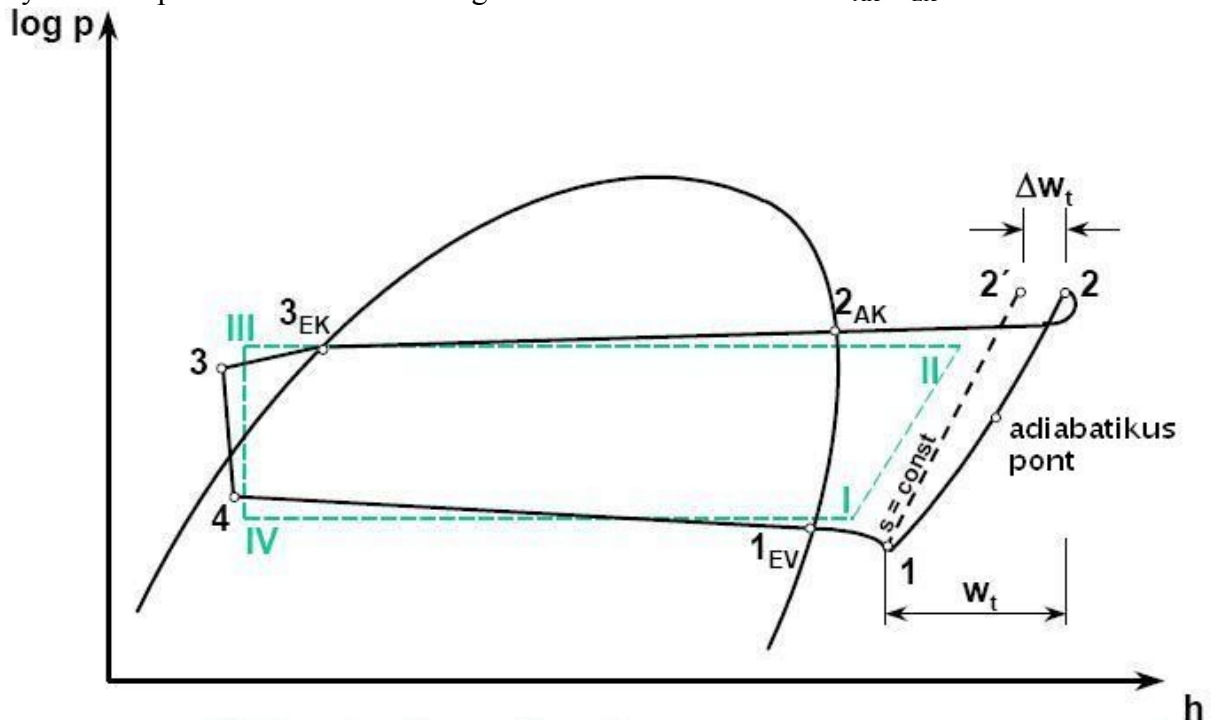
Belső hőcserélős üzem



Ez a szerkezeti elv megkísérli az utóhűtés és a túlhevítés előnyeit együttesen kihasználni. A belső hőcserélő egyik oldalán hűtőközeg áramlik. Az utóhűtő hőmérséklete kb. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, az elpárologtató hőmérséklete kb. $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. A belső hőcserélőnek a kondenzátor után kapcsolt része utóhűtőként működik, és hőt ad le az elpárologtatóból a kompresszorba áramló közegnek, ezáltal megakadályozva azt, hogy a kompresszort folyadékütés érje.

A valóságos hűtő körfolyamat

A valóságos körfolyamat az elméletitől több jellemzőjében eltér. Az ábrán szaggatott vonal jelzi az elméleti; folytonos vonal a valóságos körfolyamatot. Az 1–2 adiabatikus kompresszió ($s=\text{const}$) kezdetben fűtött, mert a kompresszor meleg, a beszívott hűtőközeg hideg. A kompresszió végén viszont már a hűtőközeg fűti a kompresszort, ezért a görbe lefelé tér el az adiabatikustól. A 2–2_{AK} pontok között a nyomás hirtelen esik, mert a kompresszor nyomószelepén áramlási veszteség keletkezik. Ezután a 2_{AK}–3_{EK} kondenzáció alatti

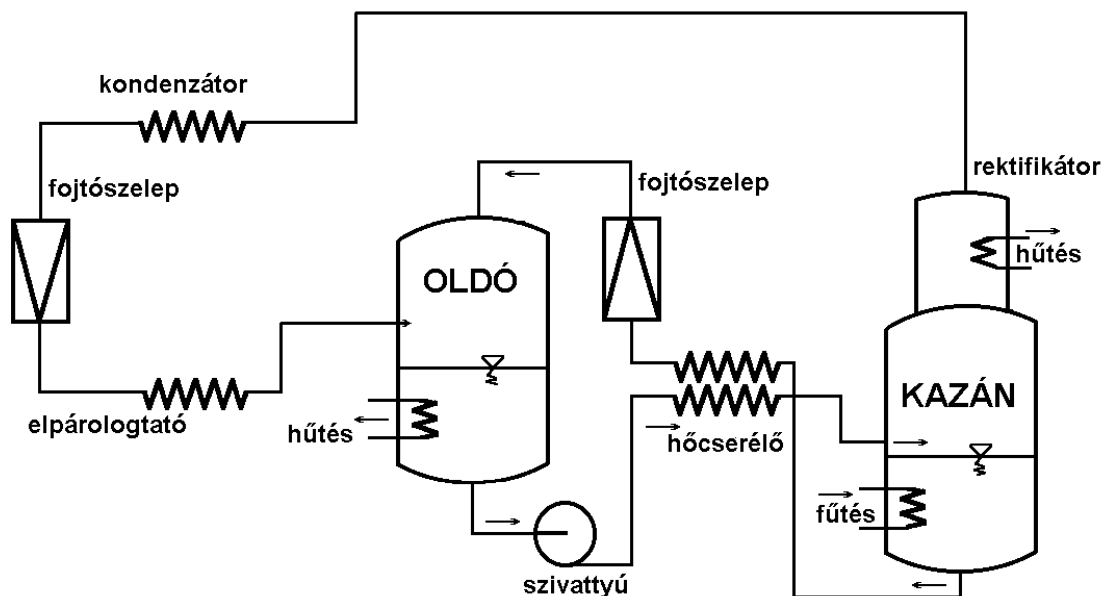


nyomásvesztéséget kell tekintetbe vennünk. Ez a nyomásvesztés a kondenzátor csöveiben jön létre, amelyek viszonylag kis átmérőjűek. A hátrányhoz előny is kapcsolódik, ugyanis az erőteljes turbulencia miatt épp a kondenzációnak legnagyobb a hőátadása. A nyomásvesztés főként a 2-es pont közelében számottevő, hiszen itt igen nagy a hűtőközeg fajlagos térfogata (a kondenzációs folyamaton belül).

A következő eltérés a 3–4 izentalpikus expanziónál figyelhető meg. Az eltérés oka, hogy terjeszkedés közben a hűtőközeg jelentősen terjeszkedik, (az a része, amely már elpárolgott), s ezért rohamosan nő az áramlási sebessége. Ezért az expanzió folyamata egyre inkább közelít az adiabatikushoz. A 4–1 elpárolgás alatt éppúgy nyomásvesztés jön létre, mint a kondenzáció alatt. Végül az 1-es pontnál, a kompresszor szívószelepénél ismét elég nagy nyomásesés jön létre, az egész körfolyamatot tekintve itt a legnagyobb a hűtőközeg térfogata.

Abszorpciós hűtőgépek

Tekintsük át röviden, hogyan is működnek ezek a gépek. Felépítésüket a következő ábrán tanulmányozhatjuk.



A gép három szerkezeti eleme teljesen azonos a kompresszoros hűtőgépekével. Ezek: a kondenzátor, a fojtószelep és az elpárolgató. Következésképp az új szerkezeti elemek a kompresszort helyettesítik. Az elpárolgatóból érkező hűtőközeg az oldóba lép, ahol a vele összepárosított oldószerben feloldódik; azaz abszorbeálódik. (Ha ammóniát használunk hűtőközeggként, akkor a legmegfelelőbb oldószer a víz.) Az oldás alatt felszabaduló hőt csőkígyós hűtő veszi fel. A létrejött oldatot szivattyú szállítja egy hőcserélőn át a sokkal nagyobb nyomású kazánba.

A kazánban elhelyezett fűtő csőkígyó a hűtőközeget az oldatból kiűzi; a hűtőközeg a kazán felső részébe, a rektifikátorba áramlik, míg az oldószer a hőcserélőn és a fojtószelepen át visszaáramlik az oldóba.

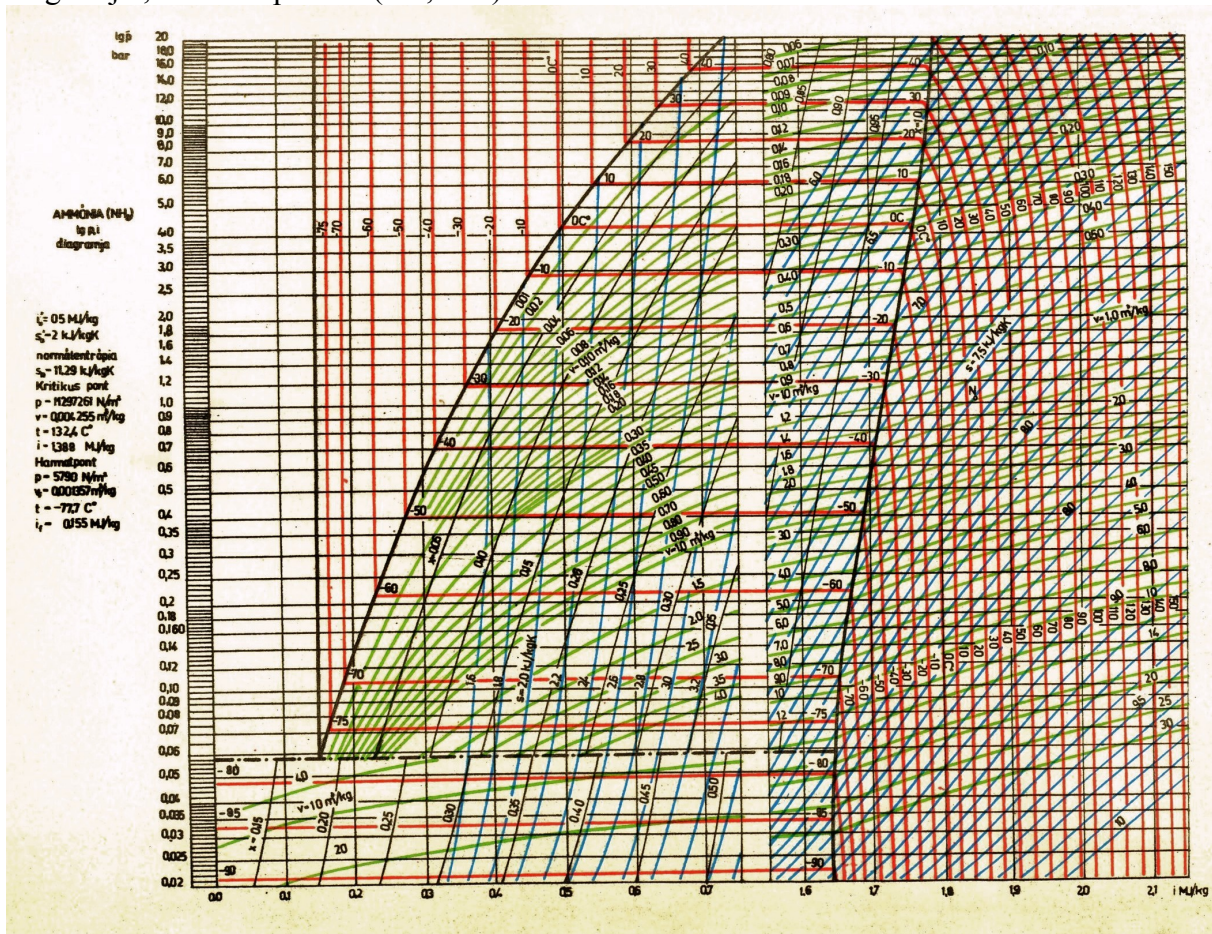
A rektifikátor szerepe, hogy a benne elhelyezkedő csőkígyóval lehűtse a hűtőközeg gőzöket, s így megakadályozza, hogy azok az oldószer cseppjeit ragadják magukkal. Ezek ugyanis jégdugót hoznának létre a gép alacsonyabb hőmérsékletű részeiben.

A hűtőközegek termodinamikai diagramjai

A fentiekben csak az alsó- és a felső határgörbét (a folyadék és a telített gőz határgörbét) tüntettük fel, az érthetőség kedvéért.

Az ammónia nyomás-entalpia diagramja.

Elkészítettük az egyik ismert hűtőközegnek, az ammóniának a legfontosabb hőtani diagramját, a hármasponttól (-77,7 °C) fölfelé.

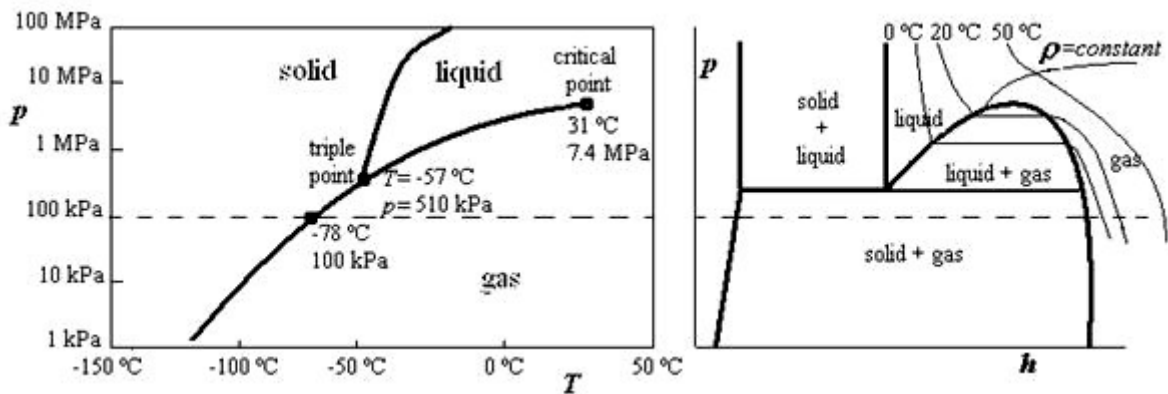


Ezen a diagramon a hármaspontnál alacsonyabb hőmérsékletek tartománya is látható. A három pont közül csak kettő látható; a folyadék és a légnemű állapot. A harmadik, a szilárd állapot határpontja a diagram területétől balra esik. x a kondenzált és a légnemű fázis részaránya (tömegtörtje). -75°-on például a folyadék-gőz arányt jelenti (balról az első vonal az $x=0,05$), -80°-on az $x=0,05$ jóval balrább látható, mert ott a gőz a szilárd anyaggal áll egyensúlyban. Az eltolódás magyarázata az, hogy entalpia-diagramot látunk, emiatt észrevehetővé vált a fagyáshő elvonásának következménye.

Keressük meg jobboldalt a +132° hőmérséklet (piros) vonalát! Ez a kritikus hőmérséklet. A kritikus hőmérséklet felett az anyagok gázállapotban vannak. Ez abból látható, hogy ezek az izotermák függőlegesek (az entalpia és a hőmérséklet egyszerre változik). A kritikus hőmérséklet vonalától balra, egészen a felső határgörbéig az anyag gőz állapotban van. Ez abból látszik, hogy az izotermák eltérnek a függőlegestől.

A gyakorlati alkalmazások számára készült diagramon nem szokás ábrázolni a kritikus pontot, de tudnunk kell, hogy ott az izotermák (csak a kritikus izoterma) vízszintes; pontosabban: vízszintes inflexiók érintője a határgörbéknek.

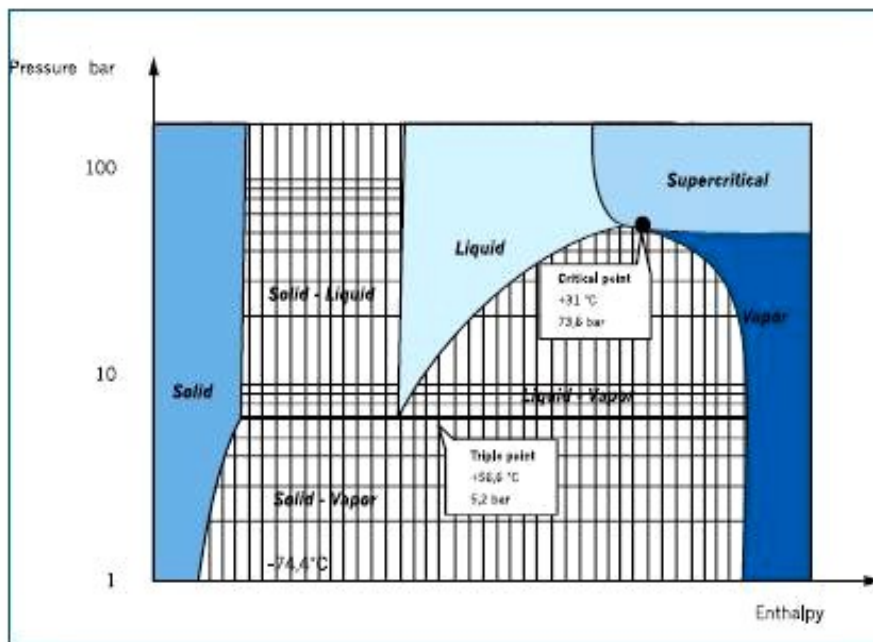
Diagramok a termodinamikában



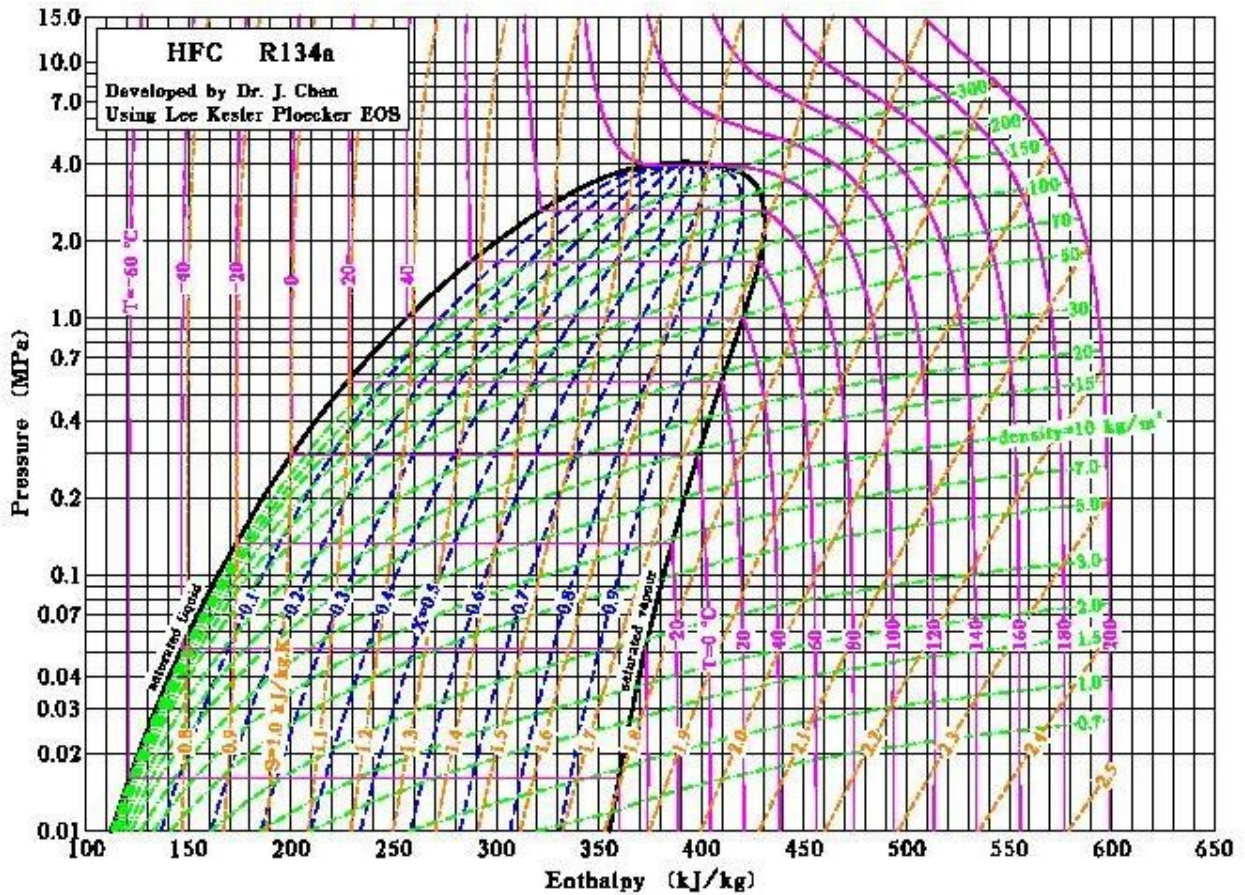
Széndioxid nyomás–hőmérséklet és nyomás–entalpia diagramja. A halmazállapotok neve a diagramon: solid=szilárd, liquid=folyékony, liquid+gas=folyadék és gőz elegye. A szaggatott vonal az atmoszférikus nyomást jelzi. Ilyen nyomáson az anyag vagy szilárd, vagy gőz. +31° fok fölött gáz, hiszen az a széndioxid kritikus hőmérséklete. A pontosság kedvéért megjegyezzük, hogy a kritikus hőmérséklet fölött az anyag gázállapotban van (angolul gas), alatta viszont gőz (angolul vapor, vízgőz esetén steam).

A diagram egy másik változatán látható a superkritikus tartomány.

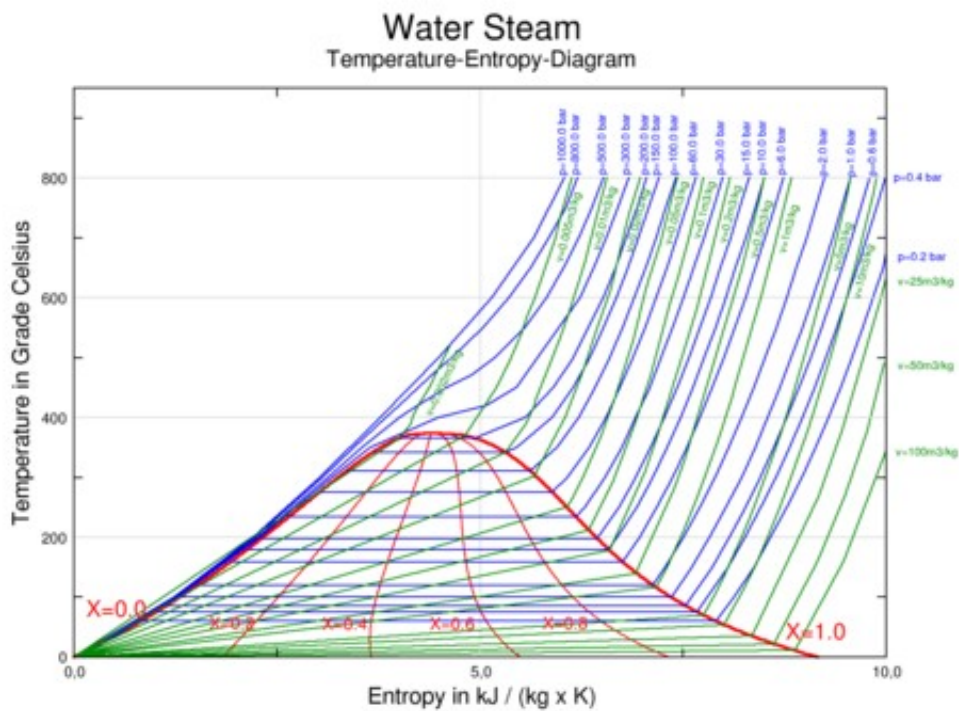
CO₂ Phase diagram



A következő ábrán egy közepnyomású hűtőközeg nyomás–entalpia-diagramját látjuk (tertafluór-etán). A kritikus hőmérséklet (+101,1°) vonala nagyon jól megfigyelhető. Az ábra felirata: saturated liquid=folyadék határállapot, saturated vapor=telített gőz (gőz határállapot). Atmoszférikus nyomáson ez a folyadék -26,3 fokon forr. A szokásnak megfelelően a diagram kezdőpontján nem nulla az állapotjelzők értéke: a fajlagos enthalpia 0°C-on 200 kJ/kg, a fajlagos entrópia pedig 1 kJ/kg K (sárga színű vonalak). Ezért a számítások egyszerűsödnek, mert nem kell negatív értékekkel számolni.



A következő ábrán a vízgőz hőmérséklet-entrópia-diagramját látjuk.



A zöld vonalak a fajlagos térfogat értékeit mutatják (tehát az izochor állapotváltozást). Az állandó nyomású vonalak kék színűek (izobár állapotváltozás). A hőmérsékleteket nem jelölték; a kritikus hőmérséklet vonala vízszintes volna a +374°C helyen.

Hűtőközegek a gyakorlatban

A gyártó cégek a kémiai összetétel alapján csoportosították a hűtőközegeket, és ezt rövidítésekkel jelölik, például:

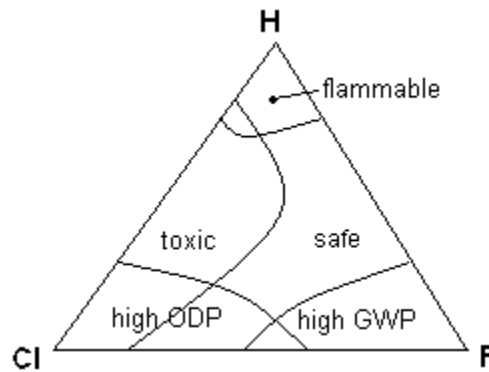
CFC	Chlorofluorocarbon	CCl_2F_2
HCFC	Hydrochlorofluorocarbo	CHClF_2
	n	
HFC	Hydrofluorocarbon	CHF_3
PFC	Perfluorocarbon	C_2F_6

Az American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Amerikai fűtési, hűtési és légkondicionálási társaság) egységesítette a jelölésrendszert.

CH_4 (R-50)				
	CH_3Cl (R-40)		CH_3F (R-41)	
	CH_2Cl (R-30)	CH_2ClF (R-31)	CH_2F_2 (R-32)	
	CHCl_3 (R-20)	CHCl_2F (R-21)	CHClF_2 (R-22)	CHF_3 (R-23)
CCl_4 (R-10)	CCl_3F (R-11)	CCl_2F_2 (R-12)	CClF_3 (R-13)	CF_4 (R-14)
Chlorofluorocarbon compounds derived from methane (CH_4)				

A jelben az **R** betű az angol *refrigerant* (hűtőközeg) szóból származik. Ezt következetesen használják, még akkor is, ha ebben a jelölésrendszerben az egyik vegyület például tűzoltó folyadékként használatos. Fent a metán- alul az etán-származékokat látjuk.

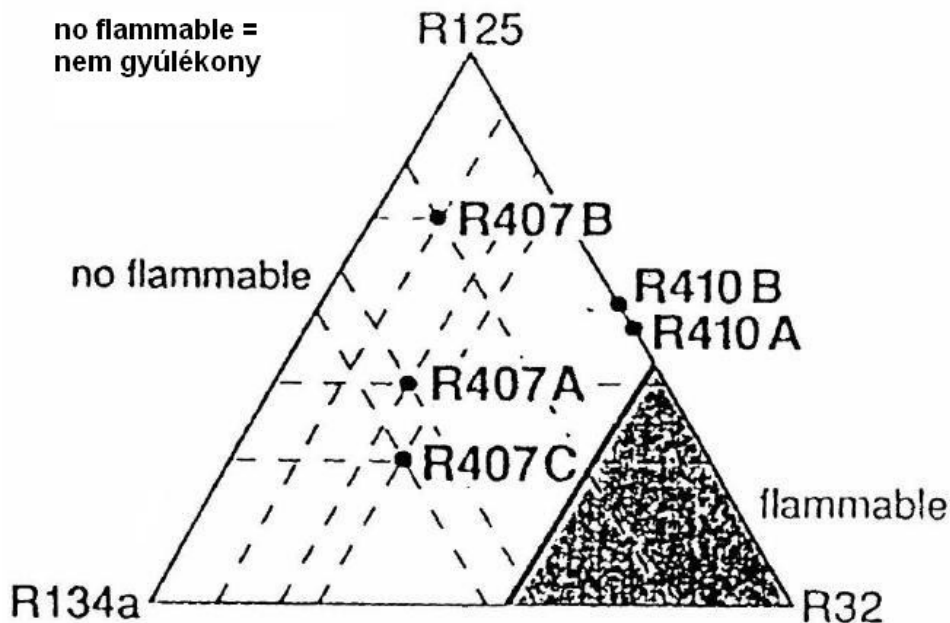
C_2H_6 (R-170)						
		$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ (R-160)		$\text{C}_2\text{H}_5\text{F}$ (R-161)		
		$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ (R-150)	$\text{C}_2\text{H}_4\text{ClF}$ (R-151)	$\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$ (R-152)		
		$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3$ (R-140)	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_2\text{F}$ (R-141)	$\text{C}_2\text{H}_3\text{ClF}_2$ (R-142)	$\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_3$ (R-143)	
	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$ (R-130)	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_3\text{F}$ (R-131)	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2\text{F}_2$ (R-132)	$\text{C}_2\text{H}_2\text{ClF}_3$ (R-133)	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ (R-134)	
	C_2HCl_5 (R-120)	$\text{C}_2\text{HCl}_4\text{F}$ (R-121)	$\text{C}_2\text{HCl}_3\text{F}_2$ (R-122)	$\text{C}_2\text{HCl}_2\text{F}_3$ (R-123)	C_2HClF_4 (R-124)	C_2HF_5 (R-125)
C_2Cl_6 (R-110)	$\text{C}_2\text{Cl}_5\text{F}$ (R-111)	$\text{C}_2\text{Cl}_4\text{F}_2$ (R-112)	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$ (R-113)	$\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$ (R-114)	C_2ClF_5 (R-115)	CF_6 (R-116)
Chlorofluorocarbon compounds derived from ethane (C_2H_6)						



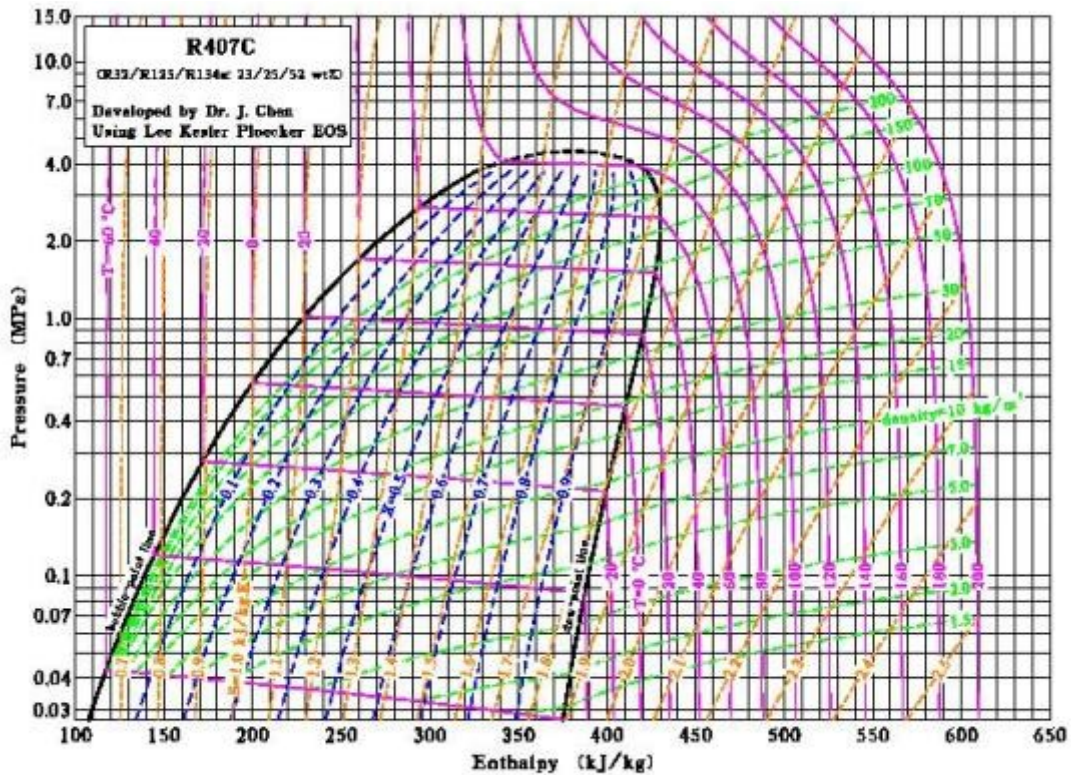
A szénhidrogén molekulához klór, fluor, vagy bróm kapcsolódhat. Ez előnyös ugyan a termodinamikai tulajdonságai vonatkozásában, de mellékhatással is járhat. Ezen az ábrán néhány ilyen előnytelen hatást szemléltetünk.

Nagy hidrogéntartalom: éghető (flammable) Nagy klórtartalom: nagy ózonréteg károsító hatás (Ozone Depletion Potential). Nagy fluortartalom: általános légkör-felmelegítő hatás (Global Warming Potential). Van köztük mérgező hatású is (toxic). A safe felirat jelzi, hogy található közöttük viszonylag biztonságosnak tekinthető vegyület is.

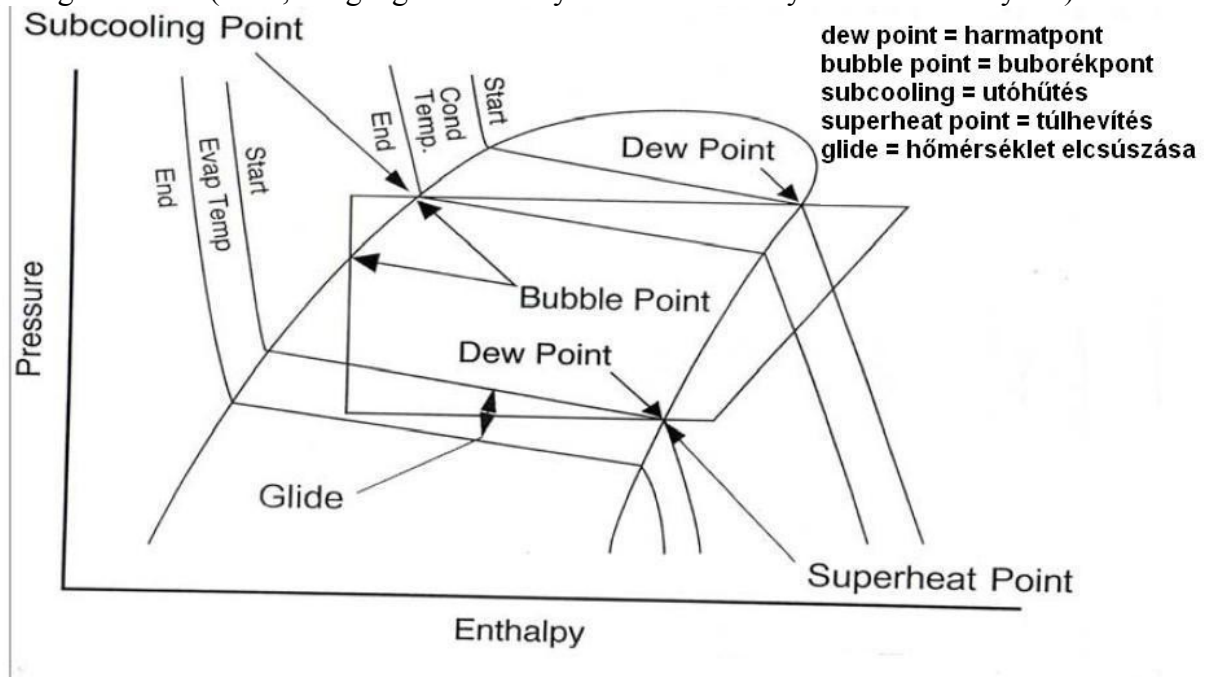
A tulajdonságaik javítása érdekében hűtőközegek elegyét használják. Következő ábránk ilyen elegyek tulajdonságait írja le.



Az R407 és R410 elegyek komponensei: R32 (difluor-metán), R125 (pentafluor-etán) és R134a (tetrafluor-etán izomer). Mint látjuk, a nagy difluor-metán tartalmú elegyeket nem használják, mert tűzveszélyesek. A felhasználási tartományban ezek az anyagok korlátlanul oldódnak egymásban. Forráspontjuk azonban változó lehet (zeotrop, vagy azeotrop elegyek). Az ilyen hűtőközeg nyomás-entalpia-diagramjának közepén (ahol folyadék és gőz egymással egyensúlyban található) a hőmérséklet-vonalak **nem** vízszintesek



Ennek az elegynek a forrási nyomása például -40°C -on kb. 0,13 MPa-ról 0,9 MPa-ra csökken párolgás közben (tehát, amíg a gőz részaránya növekszik a folyadékhoz viszonyítva).



Graph illustration of a vapor compression cycle using zeotropic blend with specific composition

Az angol szóhasználat szerint glide (elcsúszás) jelzi a zeotrop elegyek forráspontjának változását.