

A TERMODINAMIKA MÁSODIK FŐTÉTELE

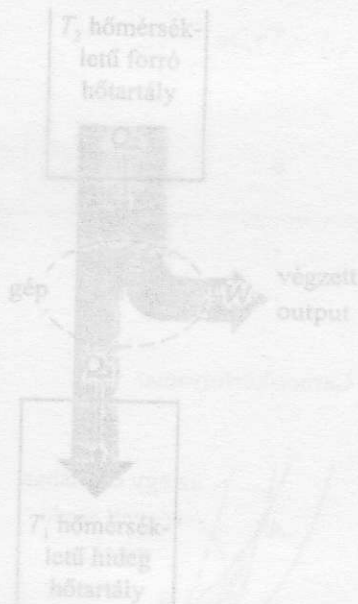
Az első főtétel szerződéskötés a természettel az energia megmaradására. A második főtétel korlátozásai képezik az apró betűs záradékot; ha azt hiszed, hogy azt kapod, amit akarsz, – tévedsz.

22.1. Bevezetés

Milyen energiaátalakulások történnek, ha, a kezünkben tartott könyvet a padlóra leejtjük? Kezdetben a könyv-Föld rendszernek mgh gravitációs potenciális energiája van. Miután az ütközés lezajlik és a könyv nyugalomba kerül a padlón, ez az energia termikus energiaként tárolódik az enyhén felmelegedő könyvben és padlóban, valamint az ütközés során létrejött hanghullámokat elnyelő falakban és levegőben. A kezdeti potenciális energia teljes egészében átalakul termikus energiává¹ és a végső eredmény az, hogy a mikroszkópikus méretű véletlenszerű mozgások erősödnek. Az összenergia azonban megmarad.

De vajon ez a folyamat reverzibilis? Vissza tudunk-e állítani mindent az eredeti állapotba? Vajon vissza tudnánk-e alakítani a termikus energiával kapcsolatos rendezetlen mozgásokat a mechanikai energia rendezett mozgásává, hogy a könyv az eredeti magasságba emelkedjen, miközben a padló és a falak kezdeti hőmérsékletükre hűlnek le? Habár az ilyen folyamat nem sértené az I. főtételt, – amely kimondja, hogy a belső energia is az energia egyik fajtája, és mint ilyen, átalakulhat más energiaféleséggé – a II. főtétel megállapítja, hogy a folyamat megfordítása valójában lehetetlen.

Vegyünk egy másik példát: átszelheti-e egy gőzhajó az óceánt úgy, hogy tengervizet szív be, abból termikus energiát von ki a hajó meghajtásához szükséges motorok működtetésére, majd a keletkezett jeget és sót visszautjűk a hajóról a vízbe? Okos ötletnek látszik, hogy magában az óceánban lévő termikus energiát hasznosítsuk ahelyett, hogy diesel olajat, vagy valamilyen más, – a motorokhoz szükséges – energiaforrást vigyen magával a hajó. Az elképzelés biztosan nem sérti az első főtételt. A második főtétel szerint azonban valójában ismét csak lehetetlen. Mít értünk azon, hogy „valójában”? Vajon nem sejtet ez egy feltaláló számára kibúvót olyan gép tervezésére, ami megvalósítja a termikus energiának teljes mértékben munkává való átalakítását? Egyáltalán nem. Amint látni fogjuk, ennek a lehetetlensége az egyik legbiztosabb kijelentés, amit csak tehetünk. A termodinamika II. főtétele a természettudomány legszélesebb általánossággal bíró



22-1 ábra
Hőerőgép vázlatja. A hőerőgép Q_1 hőmennyiséget vesz fel, W munkát végez a környezetben és Q_2 hőmennyiséget ad le. A gép két állandó, T_1 és T_2 hőmérsékletű hőtároló között működik. Az I. főtétel alapján (az energiamegmaradás) a gép által végzett eredő munka $W = Q_1 - Q_2$.

¹ Ha a padló, vagy könyv maradandóan deformálódna az ütközés következtében, akkor bizonyos mennyiségű energia a molekulák közötti megváltozott távolságok miatt megnövekedő potenciális energiában is belső energiaként tárolódna. Ez azonban nem változtatna a teljes energiamegmaradás átfogó törvényén.

alapelve. Ez talán a „legvisszavonhatatlanabb” az összes természeti törvény között, ennek van a legkisebb esélye arra, hogy valamikor a jövőben megváltoztassák, vagy elvessék. Ha a II. főtétel tartalmát pontosan értelmezzük, akkor megérthető, hogy általános jellege és kötelező érvényessége még egyes tudósokban is félelemmel vegyes tiszteletet ébreszt.

Az I. főtétel kimondja, hogy az energia különböző alakokban létezik és hogy úgy alakítható egyikből a másikba, hogy minden esetben meg lehet állapítani, hogy mi történik az energiával. Energia nem teremthető a semmiből és nem semmisíthető meg. A II. főtétel viszont megtilt bizonyos energiaátalakítási folyamatokat, cseréket. *Néhányat éppen azok közül nem tehetünk meg, amelyet nagyon szeretnénk megvalósítani.*

22.2 A második főtétel

A termodinamika második főtételét több különböző alakban is megfogalmazhatjuk. Ezek közül néhány nagyon elűt a többitől. Tárgyalásunkat azzal kezdjük, hogy figyelmünket olyan energia-átalakítási folyamatokra összpontosítjuk, amelyek újra és újra ismétlődnek. Vagyis, a hőerőgépekkel foglalkozunk, amelyek ismétlődő működési ciklusok során alakítják a hőt munkává. Lényegében a termikus energiának munkává alakításakor a legtöbb gépet az alapvető sémát követi, (kivéve azokat, amelyek elektromos forrást, vagy napelemet használnak). Ez attól függetlenül is igaz, hogy az energiaforrás benzin, olaj, gáz, égő fa, vagy nukleáris reakció. Ezek a folyamatok nyilvánvalóan elsődleges fontosságúak mindennapi életünkben.

A XIX. század ipari forradalma, ahogyan azt a 22-1 táblázat mutatja, radikális változásokat hozott az energiaforrásokban. Gerald Piel drámaian írja le azokat az életvitelünkben bekövetkezett változásokat, amelyeket az energiaátalakítás továbbfejlesztett formái eredményeztek.² Kiemeli, hogy az átlagember kézi erővel évente kb. $1,7 \cdot 10^8$ J munkát tud végezni. Ezt alapul véve, az Egyesült Államok fejenkénti villamosenergia felhasználása – 1984-ben – annak felelne meg, mintha minden egyes férfinak, nőnek és gyereknek 215 szolgája lenne! A mai életnek a „régijó világgal” való bármilyen összehasonlításának ilyen megfontolásokat is kellene tartalmaznia.

1824-ben Nicholas Léonard Sadi Carnot-nak, – egy 28 éves francia hadmérnöknek – sikerült bepillantani az energiaátalakítási folyamatok alapjaiba. Tanulmánya a gőzgépek hatásfokáról, forradalmasította a problémával kapcsolatos gondolkodást. Teljesítménye figyelemre méltó abból a szempontból is, hogy felismeréseit azelőtt tette, mielőtt ismertté vált volna a termikus energia mikroszkópikus értelmezése és mielőtt a termodinamika első főtételét megfogalmazták volna. Valóban az uralkodó hőelmélet ekkor még a

22-1 táblázat

Árucikkek és szolgáltatások becsült energiaforrásai az Amerikai Egyesült Államokban

Év	Ember	Állat	Gép
1800	14 %	80 %	6 %
1900	10 %	52 %	38 %
1989	~1 %	~0 %	99 %

Forrás: Putnam: *Energy in The Future*, Van Nostrand, 1953.

helytelen, „caloricum”-mal való magyarázat volt. Carnot mégis képes volt eljutni oda, amiből később a második főtétel kialakult. A II. főtétel három megfogalmazása a következő.³

A TERMODINAMIKA
MÁSODIK
FŐTÉTELE

A Kelvin-Planck féle megfogalmazás:

Lehetetlen olyan periodikusan működő gépet készíteni, ami 100 %-os hatásfokkal alakít át termikus energiát munkává.

vagy

A Clausius-féle⁴ megfogalmazás:

Lehetetlen olyan periodikusan működő eszközt készíteni, ami termikus energiát hideg testről forró testre visz át anélkül, hogy a környezet munkát végezne az eszközön.

vagy

Termikus energia nem áramlik önként hidegebb testről a melegebbre.

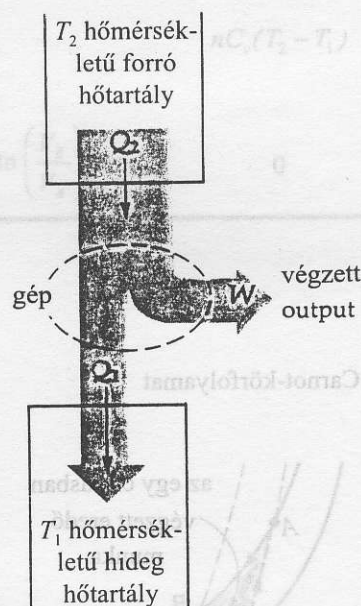
Megmutatjuk, hogy ezek a kijelentések teljesen egyenértékűek. Bármely hipotetikus gép, amely megsérti az egyik megállapítást, megsértené a többit is. Soha nem találtak kivételt. Az első megfogalmazás romba dönti azon reményeinket, hogy valaha is megvalósíthatunk 100%-os hatásfokú hőerőgépet, amelynél a végzett munka megegyezik a bevitt termikus energia mennyiségével. A másik két megfogalmazás azt a tényt ismeri fel, hogy a hő, – úgy tűnik – csak „lefelé” áramlik, magasabb hőmérsékletűről alacsonyabb hőmérsékletre. Amint a következő fejezetben látni fogjuk, a termodinamika második főtétele a statisztikus fizika érveivel is alátámasztható, s ezek logikája lenyűgöző. Pillanatnyilag elfogadjuk a II. főtételt, és a következőkben érvényes alapelveként használjuk.

22.3. A Carnot körfolyamat

A hőerőgépek hatásfokának tökéletesítésére irányuló kísérletei során Carnot nagyon értékes eredményt ért el: egy olyan folyamatsort alkotott, amely két adott hőmérséklet között működő bármely hőerőgéppel a lehetséges legnagyobb hatásfokot valósítja meg. Figyelmen kívül hagyta az egyes géptípusok működésének részleteit és ehelyett arra koncentrált, hogy alapvetően minden hőerőgép a következőképpen működik:

- Minden hőerőgép viszonylag magas hőmérsékleten vesz fel hőt.
- Minden hőerőgép munkát végez a környezeten.
- Minden hőerőgép lead bizonyos hőt alacsonyabb hőmérsékleten.

A 22-1 ábra ezeket a jellemzőket illusztrálja. A **hőtartály** olyan hőforrás, amelynek a hőmérséklete állandó marad, függetlenül attól, hogy mennyi hőt közöltek vele, vagy mennyit vontak el tőle. Ezért az ábrán Q_2 a magasabb, T_2 hőmérsékletű hőtartályból felvett hő, míg Q_1 az alacsonyabb, T_1 hőmérsékletű



22-1 ábra

Hőerőgép vázlatja. A hőerőgép Q_2 hőmennyiséget vesz fel, W munkát végez a környezeten és Q_1 hőmennyiséget ad le. A gép két állandó, T_2 és T_1 hőmérsékletű hőtartály között működik. Az I. főtétel alapján (az energiamegmaradás) a gép által végzett eredő munka $W = Q_2 - Q_1$.

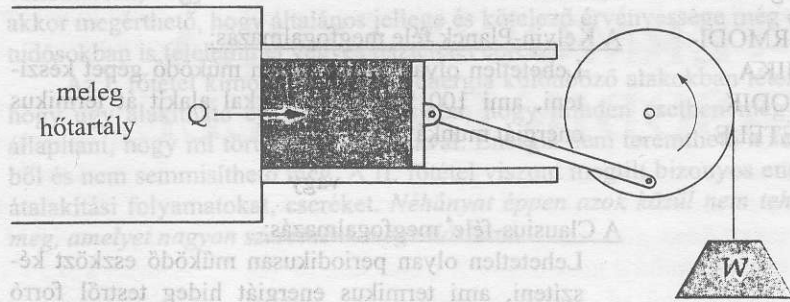
² Gerald Piel: *Science in the Cause of Man*, Knopf, 1962.

³ A fizika más alaptörvényeihez hasonlóan, a II. főtételt sem lehet levezetni, vagy bizonyítani. Érvényessége azon a tapasztalatunkon nyugszik, hogy még soha nem találtak olyan rendszert, amely megsértette volna a II. főtételt. A következő fejezetben ezt még más módon, az entrópia segítségével is megfogalmazzuk. Ez az eltérő megközelítés még világosabbá teszi majd, hogy miért hiszünk olyan erősen a második főtételben.

⁴ Rudolph J.E. Clausius (1822–1888) német matematikus és fizikus nagyban hozzájárult a termodinamika törvényeinek kimondásához.

22-2 ábra

Módszer a hő mechanikai munkává alakítására. Ha a gázzal hőt közlünk, a gáz térfogata megnő, és ezáltal felemelkedik a súly.

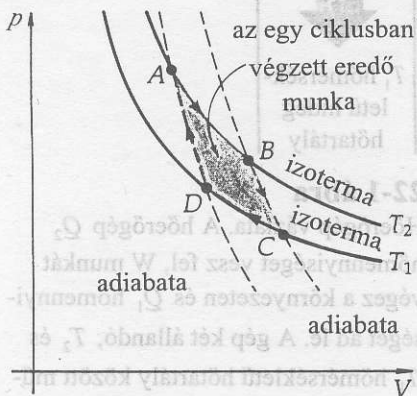


hőtartálynak leadott hő. A hőmérsékletek indexeinek jelölésénél azt a szokást követjük, hogy magasabb hőmérsékletekre nagyobb számértékeket használunk. Így a T_1, T_2, T_3, \dots sor egyre magasabb hőmérsékleteket reprezentál (mindig kelvinben).

A Carnot körfolyamat reverzibilis változások sorozata, azaz visszafelé vezethető, ha szükséges. Elvileg, a körfolyamat bármely anyaggal működtethető. A ciklus során a munkavégző közegben végül nem is történik változás, a közeg csupán a termikus energia hordozójaként szerepel. Tervezhető olyan Carnot körfolyamattal működő hőerőgép, amely folyadékot, valódi gázt, mágneses anyagot, vagy egyéb közegét alkalmaz. Az egyszerűség kedvéért a körfolyamatot súrlódásmentes dugattyúval elzárt hengerben lévő ideális gázzal mutatjuk be. A 22-2 ábra olyan módszer bemutatása, amelyben a dugattyú egy kerékhez erősíthető úgy, hogy a forgó kerék súlyt emeljen a gravitáció ellenében, így végezve hasznos munkát a környezeten.

A Carnot-ciklus izotermikus és adiabatikus folyamatokból áll, ahogy azt a 22-3 ábrán vázoltuk.

A Carnot-körfolyamat



22-3 ábra

A Carnot féle körfolyamat két izotermikus és két adiabatikus görbe mentén halad a p - V síkon, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ irányban. Az izotermák és az adiabaták „meredeksége” közti különbség eltűzött, azért, hogy az ábra világosabb legyen.

A CARNOT-FÉLE
KÖRFOLYAMAT

1. lépés (A-tól B-ig):

A gáz izotermikusan tágul A-tól B-ig, miközben Q_2 hőt vesz fel a magasabb (T_2) hőmérsékletű hőtartályból.

2. lépés (B-től C-ig):

A gáz adiabatikusan tágul B-től C-ig, miközben az alacsonyabb T_1 hőmérsékletre hűl.

3. lépés (C-től D-ig):

A gázt izotermikusan összenyomjuk C-től D-ig, miközben Q_1 hőt ad le az alacsonyabb hőmérsékletű hőtartálynak.

4. lépés (D-től A-ig):

A gázt D-től A-ig tartó adiabatikus kompresszióval visszavisszük eredeti állapotába.

Emlékeztetünk rá, hogy a p - V síkon tetszőleges út mentén elmozdulva a végzett munka egyenlő a görbe alatti területtel. $A \rightarrow B \rightarrow C$ úton a gép végez munkát a környezeten, a $C \rightarrow D \rightarrow A$ úton pedig a környezet végez munkát a gépen. Ezért az egy ciklus során a hőerőgép által a környezeten végzett eredő hasznos munka, – ahogy azt az ábra mutatja, – a görbe által bezárt, vonalkázott terület. A W munka pozitív ha a körfolyamat óramutató járásával egyező irányban megy végbe. Negatív ha ellenkező irányban zajlik le.

22-2 táblázat A Carnot féle hőerőgép

Folyamat	A gáz által végzett munka (W)	A gázzal közölt hő (Q)	A gáz belső energiájának megváltozása (ΔU)
$A \rightarrow B$ Izotermikus tágulás $p_A V_A = p_B V_B$	$nRT_2 \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$	$Q_2 = nRT_2 \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$	0
$B \rightarrow C$ Adiabatikus tágulás $p_B V_B^\kappa = p_C V_C^\kappa$	$\frac{nR}{\kappa - 1} (T_2 - T_1)$	0	$nC_v (T_1 - T_2)$
$C \rightarrow D$ Izotermikus összenyomás $p_C V_C = p_D V_D$	$\left\{ \begin{array}{l} nRT_1 \ln \left(\frac{V_D}{V_C} \right) \\ \text{vagy} \\ -nRT_1 \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right) \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} Q_1 = nRT_1 \ln \left(\frac{V_D}{V_C} \right) \\ \text{vagy} \\ -nRT_1 \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right) \end{array} \right.$	0
$D \rightarrow A$ Adiabatikus összenyomás $p_D V_D^\kappa = p_A V_A^\kappa$	$\frac{nR}{\kappa - 1} (T_1 - T_2)$	0	$nC_v (T_2 - T_1)$
Eredő változás egy teljes ciklusra	$nR(T_2 - T_1) \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$	$nR(T_2 - T_1) \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$	0

A 22-2 táblázat összefoglalja a 21. fejezetben levezetett, különböző energiaváltozásokat. Jegyezzük meg, hogy a gázzal közölt eredő hő ($Q_2 - Q_1$) egyenlő a gáz által a környezeten végzett munkával. Az eredő belső energiaváltozás zérus, így a gáz visszatér eredeti állapotába és minden készen áll a ciklus ismétlésére. A hőerőgép folyamatos működése során ismételtlen végbemegy ez a folyamatsor.

22-1 PÉLDA

Igazoljuk, hogy a Carnot-körfolyamat esetén, a $C \rightarrow D$ izotermikus folyamatban leadott

$$Q_1 = nRT_1 \ln \left(\frac{V_D}{V_C} \right)$$

hő így is írható: $Q_1 = (-)nRT_1 \ln \left(\frac{V_B}{V_A} \right)$

MEGOLDÁS:

A Carnot-körfolyamat két izotermikus folyamatára felírható:

$$p_A V_A = p_B V_B \quad \text{és} \quad p_C V_C = p_D V_D$$

A két adiabatikus folyamatra:

$$p_B V_B^\kappa = p_C V_C^\kappa \quad \text{és} \quad p_D V_D^\kappa = p_A V_A^\kappa$$

Ha összeszorozzuk a négy egyenletet és $p_A p_B p_C p_D$ tényezővel egyszerűsítünk, – mivel ezek azonosak mindkét oldalon, – ezt kapjuk:

$$V_A V_C (V_B V_D)^\kappa = V_B V_D (V_A V_C)^\kappa$$

Ezt átrendezve, adódik, hogy

$$(V_A V_C)^{1-\kappa} = (V_B V_D)^{1-\kappa}$$

$(1-\kappa)$ -dik gyököt vonva mindkét oldalból:

$$V_A V_C = V_B V_D$$

vagy

$$\frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C}$$

Ha ezt az értéket $Q_1 = nRT_1 \ln(V_D/V_C)$ kifejezésbe helyettesítjük, ez azt eredményezi, hogy

$$Q_1 = nRT_1 \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right) = nRT_1 \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) = -nRT_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

22.4 Hőerőgépek hatásfoka

Iparosodott társadalmunkban egy gép működési költsége elsődleges jelentőségű. Azért, hogy egy hőerőgéppel hasznos munkát végeztessünk, a gépbe betáplált, adott Q_2 hőmennyiséggel kell fizetnünk. (A második főtétel biztosítja, hogy a betáplált Q_2 hő mindig nagyobb, mint a nyert munka.) A hőerőgépek hatásfokának mértéke a hasznos munka és a gép működtetéséhez szükséges, betáplált termikus energia aránya.

HŐERŐGÉP HATÁSFOKA $\eta = \frac{\text{egy ciklus alatt végzett munka}}{\text{egy ciklus alatt betáplált hő}}$ (22-1)

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \quad (22-2)$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

ahol Q_1 és Q_2 a hőcserében szereplő hőmennyiségek nagysága.⁵ Ha a hatásfokot százalékos értékre akarjuk átalakítani, egyszerűen szorozzuk meg 100%-kal.

Q_2 értékének nagyobbak kell lenni Q_1 -nél, a különbség az eredő végzett munka. Amint azt ebben a fejezetben még megmutatjuk, minden hőerőgép hatásfoka szükségszerűen kisebb mint egy, mert *lehetetlen visszavinni a gázt eredeti állapotába anélkül, hogy valamennyi hőt leadjon egy alacsonyabb hőmérsékletű hőtartálynak*. Így Q_1 még abban az elméletileg ideális esetben sem lehet zérus, amelyben nincsenek súrlódás okozta veszteségek (ekkor 100% lenne a hatásfok).

Hangsúlyozzuk, hogy a fentiek periodikusan működő berendezésekre vonatkoznak. Az ideális gáz egyszerű izotermikus expanziójára vonatkozóan – ami anélkül megy végbe, hogy szerepelne hőt elnyelő tartály, – a hő teljesen, 100%-os hatásfokkal, átalakítható munkává. Ebben a fejezetben azonban azokat a periodikusan működő berendezéseket vizsgáljuk, amelyekben a munkaközeget minden ciklus után visszavisszük eredeti állapotába, hogy a folyamat újra ismétlődjen.

⁵ A hatásfok definíciójában nem törődünk azzal, hogy az előjel pozitív vagy negatív lehet attól függően, hogy a rendszerbe beáramló, vagy az onnan távozó hő áramlásának irányát jelzi.

Az egyik belső energiájának (ΔU) megváltozása

22-2 ábra

Módszer a hő mechanikai munkává alakítására. A gáz hőt vesz fel, a gáz térfogata megnövekszik, és ezáltal felemelkedik a súly.

A Carnot-körfolyamat



22-3 ábra

A Carnot-féle körfolyamat két izotermikus és két adiabatikus görbe mentén halad a p - V síkon, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ irányban. Az izotermák és az adiabaták „meredeksége” közti különbség eltűzött, azért, hogy az ábra világosabb legyen.

Ahogy a későbbiekben megmutatjuk, a Carnot-féle körfolyamat a leghatékonyabb hőerőgép, ami két különböző hőmérsékletű hőtartály közötti működésre tervezhető. Nincs olyan hőerőgép, ami hatásfokban felülmúlhatná a Carnot-félét. Így a Carnot-hatásfok az az elméleti felső határ, ami valaha is kitalált, vagy valamikor a jövőben tervezésre kerülő géppel elérhető. A Carnot-körfolyamat és a termodinamika II. főtétele érthetően nagy fontossággal bír technológiai civilizációnk fenntartásában.

A Carnot-hőerőgép (22-2) egyenlettel meghatározott hatásfoka más, sok esetben hasznosabb alakban is kifejezhető. A 22-2 táblázatból látjuk, hogy az izotermikus tágulás és összenyomás során elnyelt és leadott hőmennyiség a következő:

$$\left. \begin{aligned} \text{Elnyelt hőmennyiség: } Q_2 &= nRT_2 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \\ \text{Leadott hőmennyiség: } Q_1 &= (-)nRT_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \end{aligned} \right\} \text{(ideális gázra)}$$

Ezeknek a mennyiségeknek az aránya:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (22-3)$$

Így a Carnot-hatásfokot a hőmérsékletekkel is kifejezhetjük:

$$\text{CARNOT-HATÁSFOK} \quad \eta_{\text{(Carnot)}} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (22-4)$$

Ez az egyenlet, – a munkaközegtől függetlenül, – minden Carnot-féle hőerőgépre érvényes. A végső hatásfok csak a hőmérsékletektől függ.

22-2 PÉLDA

Egy gőzgép hideg éghajlaton működik, ahol a fáradt gőz hőmérséklete 0 °C. (a) Számítsuk ki a hőerőgép elméletileg elérhető legnagyobb hatásfokát, ha a beszívott gőz hőmérséklete 100 °C. b) Határozzuk meg a lehetséges maximális hatásfokot, ha 200 °C -ra túlhevített gőzt használunk!

MEGOLDÁS

a) Mivel bármely hőerőgép maximális elméleti hatásfoka a Carnot-hatásfok, a 100 °C -os gőzre (373 K):

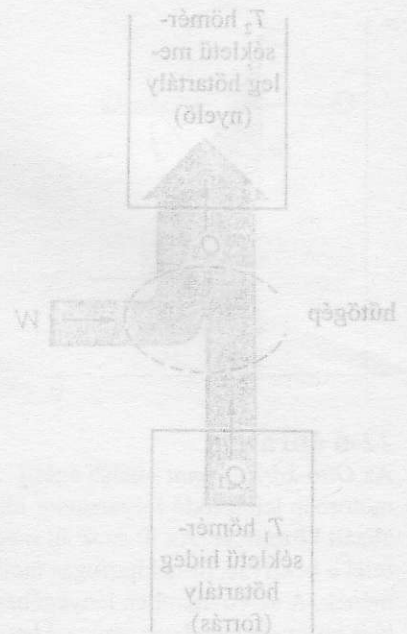
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{273 \text{ K}}{373 \text{ K}} = 26,8\%$$

b) Ha 200 °C-ra (473 K) túlhevített gőzt használunk, az elméleti maximális hatásfok:

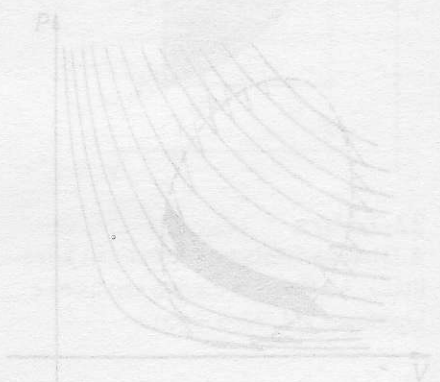
$$\eta = 1 - \frac{273 \text{ K}}{473 \text{ K}} = 42,3\%$$

A hatásfok magasabb hőmérsékleten való növekedése miatt a legtöbb gőzgép túlhevített gőzt használ.

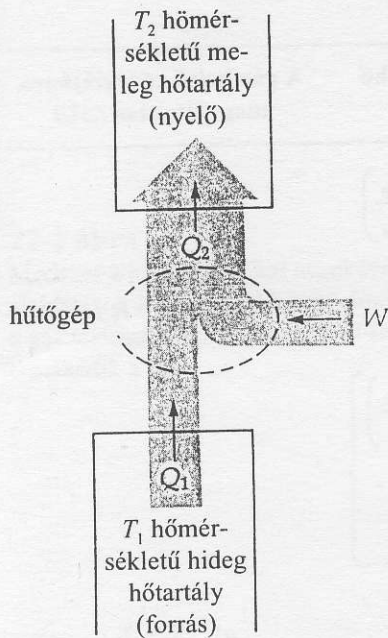
A valódi gőzgépek összh hatásfoka 15% és 20% közé esik. A benzinmotorok hatásfoka nagyjából 20–25%, míg a Diesel-motoroké elérheti a 40%-ot.



22-4 ábra Carnot-féle hőerőgép. Q₂ hő vonunk el a hideg hőtartálytól, W a motor működéséhez szükséges munka és Q₁ a forró hőtartályunk leadott hő. Az energiamegmaradásból: W + Q₁ = Q₂



22-5 ábra Bármely reverzibilis körfolyamat (szaggatott vonal) megközelíthető egymáshoz tetszőlegesen közeli izotermák mentén működő Carnot-ciklusok együttesével. (Az egyik Carnot-ciklust bevonalkáztuk, hogy könnyebb legyen elképzelni.) Minél közelebb vannak egymáshoz a választott izotermák, annál pontosabb a közelítés.

**22-4 ábra**

Carnot-féle hűtőgép. Q_1 hőt vonunk el a hideg hőtartálytól, W a motor működtetéséhez szükséges munka és Q_2 a forró hőtartálynak leadott hő. Az energiamegmaradásból:

$$W + Q_1 = Q_2.$$

A hűtőgép

Mivel a Carnot-féle körfolyamat reverzibilis, ellentétes irányban is működtethető. Az ilyen berendezés, – amit Carnot-hűtőgéppnek neveznek, – hőt von el egy alacsony hőmérsékletű hőtartályból (vagy hőforrásból) és hőt ad le egy magasabb hőmérsékletű hőtartálynak (vagy nyelőnek). 22-4 ábra. Az ilyen módon történő hőelvonás hatékonyságának mértéke a **teljesítménytényező**, (vagy jósági tényező) (ε), amit így definiálunk:

TELJESÍTMÉNYTÉNYEZŐ (HŰTŐGÉP)

$$\varepsilon = \frac{\text{a hideg hőtartálytól elvont hő}}{\text{felhasznált munka}} = \frac{Q_1}{W} \quad (22-5)$$

$$\text{Carnot-féle hűtőgépre} \quad \varepsilon = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (22-6)$$

22-3 PÉLDA

Határozzuk meg a 0°C és 30°C között működő Carnot-féle hűtőgép teljesítménytényezőjét!

MEGOLDÁS

Ha $T_1 = 0^\circ\text{C} = 273\text{ K}$ és $T_2 = 30^\circ\text{C} = 303\text{ K}$ értéket behelyettesítünk a (22-6) egyenletbe, akkor:

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{273\text{ K}}{303\text{ K} - 273\text{ K}} = 9,1$$

adódik. Ez az elméleti maximum a Carnot-féle hűtőgépre. A háztartási hűtőberendezések esetén ε ritkán haladja meg a 7 körüli értéket. Gyakorlati példaként megemlítjük, hogy egy kis légkondicionáló kiabrándítóan kicsi, de tipikus teljesítménytényezője: 1,83.

Hőszivattyú

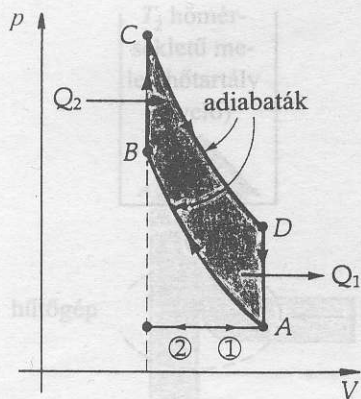
A hűtőgép elvének másik érdekes alkalmazása a hőszivattyú, amely úgy fűti télen a házat, hogy hűtőgép segítségével termikus energiát von el a külső levegőtől, vagy a talajtól. Az ilyen módszer gyakorlatilag ott hatásos, ahol föld alatti vízmennyiség biztosítja a viszonylag állandó hőmérsékletű hőforrást. Mivel a hőszivattyú több energiát szállít a házba, mint amennyi a működtetéséhez szükséges, a mérsékelt éghajlaton ez a házak fűtésének népszerű módszerévé vált.⁶ További jellemző, hogy néhány hőszivattyú meg tudja fordítani a hőáramlás irányát, így nyáron ezek a ház hűtésére is használhatók.

A hőszivattyú teljesítménytényezőjét a következőképpen definiáljuk:

⁶ A hőszivattyúk akkor működnek a legjobban, ha az alacsony hőmérsékletű hőtartály nem túl hideg. Ez nyilvánvaló a (22-8) egyenletből:

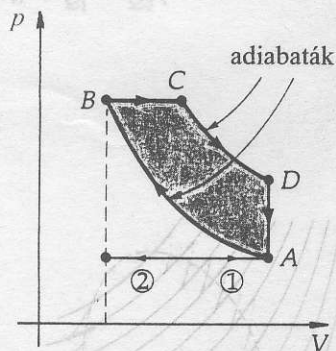
$$\frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad \text{vagy} \quad Q_2 = \left(\frac{T_2}{T_2 - T_1} \right) W$$

Ezért – adott munkavégzés esetén – minél kisebb a hőmérsékletkülönbség, annál nagyobb a bevitt Q_2 hőmennyiség.



22-6 ábra

Az Otto-körfolyamat –belső égésű motorban lejátszódó folyamatsor idealizált közelítése. Az ① és ② út megfelel a beszívás, ill. a kipufogás ütemének. A szívó ütemben lényegében légköri nyomáson benzingőzzel kevert levegőt visznek a hengerbe; később a kipufogó ütemben, a forró égéstermékek távoznak a légköri nyomáson. (A szívás és a kipufogás nem része a hatásfokot meghatározó termodinamikai folyamatoknak.)



22-7 ábra

A Diesel-körfolyamat idealizált közelítése. Az ① és ② ütem a szívás és a kipufogás (ld. 22-6 ábra)

A belső égésű motor

A Carnot-körfolyamattól eltérő körfolyamattal működő hőerőgépre példa a belső égésű motor (az autók benzinmotorja). Az ilyen hőerőgépben lejátszódó körfolyamat egyszerűsített közelítése látható a 22-6 ábrán. Ezt az Otto-ciklusként ismert körfolyamatot – amely megalkotójáról, egy német mérnökről nyerte nevét, – súrlódásmentesnek és reverzibilisnek tekintjük. Az egy ciklusban végzett eredő munkát a vonalkázott terület adja. A munkaközeg levegő, amiről feltételezzük, hogy ideális gázként viselkedik a következő folyamatokban:

- (1) Légköri nyomáson adiabatikusan összenyomjuk a levegőt A-tól B-ig. (Ez megfelel a sűrítő ütemnek a valódi motorban, amelyben levegő és benzingőz keverékét komprimáljuk. A kompresszióviszonynak nevezett V_A/V_B arány általában 10 körül van.)
- (2) Ezután B-től C-ig a levegőt állandó térfogaton felmelegítjük. Ez közel megfelel a benzingőz gyors robbanásának, amit a maximális kompresszió körüli időpontban történő szikragyújtással indítunk.⁷⁾
- (3) A levegő adiabatikusan tágul C-től D-ig, miközben munkát végez, ahogy csökken a hőmérséklete. (Ez közelítőleg megfelel a motor munkaütemének.)
- (4) A levegő D-től A-ig állandó térfogaton lehül, s így lehetővé válik, hogy a ciklus újra induljon.

Csak a két izochor folyamatban történik hőcsere. Ha feltételezzük, hogy a levegő ideális gázként viselkedik, kiszámíthatjuk a motor elméleti hatásfokát, azaz a végzett munka és a befektetett hő arányát (ld. 22C-31 feladat):

$$\text{OTTO-FÉLE KÖRFOLYAMAT HATÁSFOKA} \quad \frac{\text{hasznos munka}}{\text{befektetett hő}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\kappa-1}} \quad (22-9)$$

Ha például a kompresszióviszony 8 és $\kappa = 1,4$, az elméleti hatásfok 56%. A valóságos hatásfokok 20% körüli értékek. Jegyezzük meg, hogy a hatásfok a kompresszióviszony növekedésével javul. Mivel a diesel-motorok kompresszióviszonya nagyobb, – 15–20 körül van, – hatásfokuk is nagyobb, mint a benzinmotoroké.

Diesel motor

A nem Carnot-körfolyamatot hasznosító hőerőgépek másik típusa a Diesel motor. A 22-7 ábra idealizált Diesel-körfolyamatot ábrázol. A kezdetben légköri nyomáson lévő levegőt (A pont) adiabatikusan összenyomjuk, amíg a hőmérsékletét eléggé megnöveljük ahhoz, hogy a kompressziós ütem végén (B pont) befecskendezett Diesel-olaj magától meggyulladjon. (Nem szükséges gyújtógyertya.) A gőz robbanása lassúbb, mint egy benzinmotorban és ez a folyamat – ebben a nagyon leegyszerűsített közelítésben – először állandó nyomáson, majd adiabatikusan végbemenő expanzióként történik, a B→C→D görbe mentén. Végül, a kipufogóütem visszaviszi a motort az eredeti állapotba. Mivel a kompresszió során nincs jelen olajgőz, nem fordulhat elő előgyújtás; ezért a kompresszióviszony magasabb lehet, mint egy belső égésű motorban. A jellemző ideális hatásfokok 50% és 60% között vannak.

⁷⁾ Ha a kompresszió túl nagy, akkor a hőmérséklet idő előtt annyira megnövekedhet, hogy a benzingőz spontán meggyullad. Ezt a nem kívánt állapotot előgyújtásnak nevezzük.

22-5 PÉLDA

A 22-8 ábrán látható Stirling-motor a T_1 és T_2 hőmérsékletű izotermák között működik, ahol $T_2 > T_1$. Számítsuk ki egy olyan motor hatásfokát, amelynél az izochor folyamatok V_1 és V_2 térfogaton mennek végbe, ha a munkaközeg egyatomos ideális gáz!

MEGOLDÁS

A hatásfok:

$$\eta = \frac{\text{hasznos munka}}{\text{befektetett energia}} = \frac{\text{felvett hő} - \text{leadott hő}}{\text{felvett hő}}$$

Felvett hő a T_2 izoterma mentén: $Q_2 = nRT_2 \ln(V_2/V_1)$

Leadott hő az állandó, V_2 térfogaton: $Q_3 = nC_V(T_2 - T_1)$

Leadott hő a T_1 izoterma mentén: $Q_1 = nRT_1 \ln(V_2/V_1)$

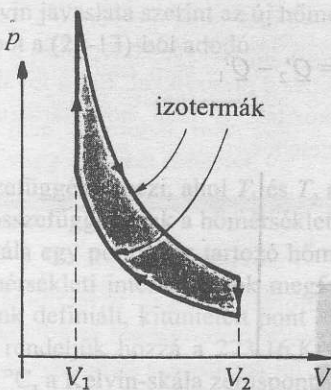
Felvett hő az állandó, V_1 térfogaton: $Q_4 = nC_V(T_2 - T_1)$

Vegyük észre, hogy $Q_3 = Q_4$, ekkor a hatásfok:

$$\eta = \frac{(Q_2 + Q_4) - (Q_1 + Q_3)}{(Q_2 + Q_4)} = \frac{nR(T_2 - T_1) \ln(V_2/V_1)}{nRT_2 \ln(V_2/V_1) + nC_V(T_2 - T_1)}$$

$$\eta = \frac{2(T_2 - T_1) \ln(V_2/V_1)}{3(T_2 - T_1) + 2T_2 \ln(V_2/V_1)}$$

$\left(\frac{3}{2}R\right)$



a) Az 1827-ben szabadalmaztatott Stirling-féle hőerőgép idealizált körfolyamata.

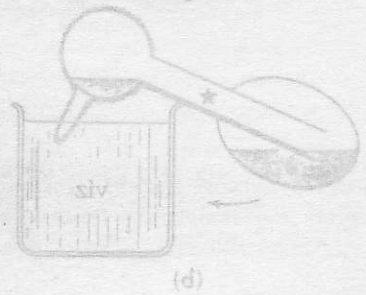
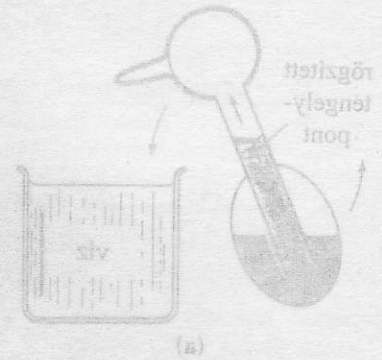


b) Az erszényes patkány

22-8 ábra

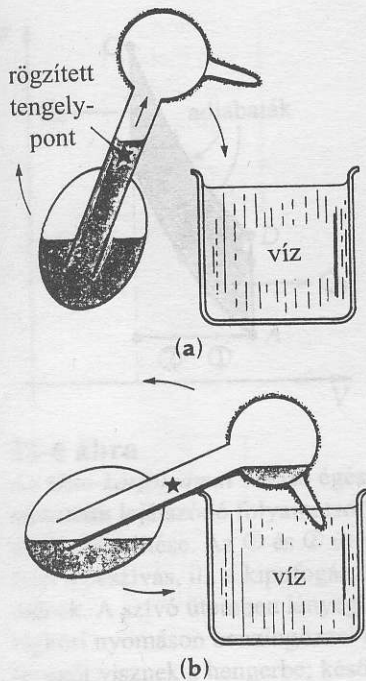
A Stirling-féle hőerőgép pontosan úgy használítja a hőcserét, ahogyan az erszényes patkánynak nevezett, Arizona-sivatagbeli rágcsáló. (Ld. Knut Schmidt-Nielsen: How Animals Work, Cambridge University Press, 1972.) A kis sivatagi rágcsálók vízháztartásában a hőcsere-folyamatok a legfontosabb tényezők. Az idealizált Stirling-motor két izo-

termikus és két izochor folyamattal működik. A Stirling-motor újabb keletű alkalmazása módszert kínál a nagyon alacsony – a hélium cseppfolyósodása alatti, – az abszolút zérus fokot megközelítő hőmérsékletek elérésére. A gépkocsikat tervező mérnökök a Stirling-körfolyamatot a jól ismert Otto-körfolyamat lehetséges alternatívájaként vizsgálják.



22-9 ábra

A sivatagi madár. Ez a játék bizonyos értelemben olyan hőerőgép, amely két eltérő hőmérsékletű hőforrás között működik. Az első üvegüveg szoba-hőmérsékleten van, míg a felső rész kicsit alacsonyabb hőmérsékletre hűl a fejét behúzó nedves, porfos anyag vizsztatalmának párolgatásával. A madár belsőben folyékony étel, vagy más hasonló folyadék van, amelynek olyan alacsony a főtámpontja, hogy szobahőmérsékleten párolog. A fűgölgöcs helyzetben (a) az alsó gömbben lévő növekvő légnyomás a fejét kényszeríti a folyadékot a fejbe, ahol a göznyomás kisebb (mivel itt alacsonyabb a hőmérséklet). Ezzel a tömegközéppont a főtámpont felé kerül és a madár előrelendül, csőrét bementíti a vízbe, a fej anyaga így megduzzad nedveséggel. Ebben az előre halló helyzetben (b) a csőr mindkét végén nyitva van, a göznyomás a fej és a test között kiegyenlítődik, és a folyadék vissza tud folyni az alsó üvegüvegbe. Ezzel a madár függőleges helyzetbe lendül vissza és a ciklus újra kezdődik.



22-9 ábra

A szomjas madár. Ez a játék bizonyos értelemben olyan hőerőgép, amely két eltérő hőmérsékletű hőtartály között működik. Az alsó üveggömb szobahőmérsékleten van, míg a felső rész kicsit alacsonyabb hőmérsékletre hűl a fejet beborító nedves, bolyhos anyag víztartalmának párologtatásával. A madár belsejében folyékony éter, vagy más hasonló folyadék van, amelynek olyan alacsony a forráspontja, hogy szobahőmérsékleten párolog. A függőleges helyzetben (a) az alsó gömbben lévő növekvő gőznyomás felfelé kényszeríti a folyadékot a fejbe, ahol a gőznyomás kisebb (mivel itt alacsonyabb a hőmérséklet). Ezzel a tömegközéppont a forgástengely fölé kerül és a madár előrelendül, csőrét bemeríti a vízbe, s a fej anyaga így megőrzi nedvességét. Ebben az előre hajló helyzetben (b) a cső mindkét végén nyitva van, a gőznyomás a fej és a test között kiegyenlítődik, és a folyadék vissza tud folyni az alsó üveggömbbe. Ezután a madár függőleges helyzetbe lendül vissza és a ciklus újra kezdődik.

22.6 Az elérhető legnagyobb hatásfok – a Carnot körfolyamat hatásfoka

A termodinamika II. főtételének felhasználásával Carnot számos érdekes következtetést tudott levonni. Gondolatmenete máig érvényes, annak ellenére, hogy abban az időben sem az első főtételt nem ismerték, sem a hőményiséget megalapozó molekuláris mozgást nem értették. Az első következtetés, amit tárgyalunk, az ún. Carnot-tétel:

CARNOT-TÉTEL

A Carnot körfolyamat a legjobb hatásfokot biztosítja minden olyan lehetséges hőerőgép közül, amely két megadott hőmérséklet között működik.

Ezt a tételt nem azon a bonyolult – de korrekt – módon fogjuk bizonyítani, ahogy Carnot tette, az I. főtétel nélkül, hanem egy egyszerűbb változatot közlünk, amely felhasználja az első főtételt. Az eljárás a következő. Tegyük fel, hogy egy feltaláló azt állítja, hogy kigondolt egy irreverzibilis hőerőgépet, amely a Carnot-gépnél nagyobb hatásfokú. Annak bizonyítására, hogy állítása hamis, kössük eszközét a 22-10 ábrán látható módon Carnot-féle hőerőgéphez. A Carnot-gép reverzibilis, ami azt jelenti, hogy ellenkező irányban is működtethetjük. A Carnot-gép méretét úgy választottuk meg, hogy a működéséhez szükséges, befektetett W munka pontosan megegyezzen a javasolt gép által végzett W' munkával.

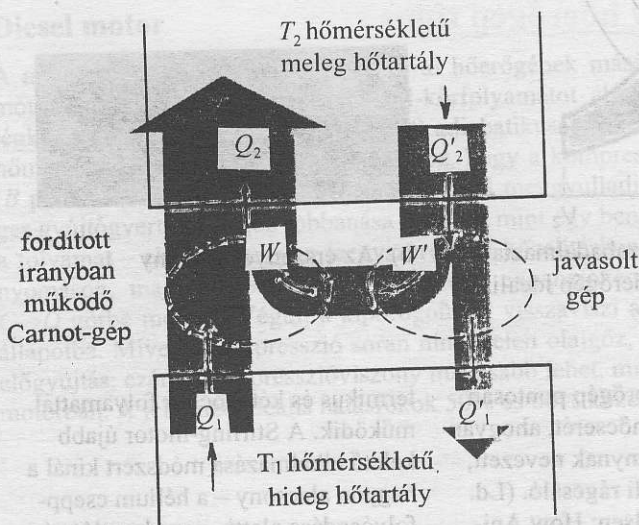
A feltaláló állítása, miszerint gépének hatásfoka felülmúlja a Carnot-gép hatásfokát, így fordítható a matematika nyelvére:

$$\left(\frac{W'}{Q_2'}\right)_{\text{javasolt gép}} > \left(\frac{W}{Q_2}\right)_{\text{Carnot-gép}} \quad (\text{feltételezett igazság}) \quad (22-10)$$

$$\text{Mivel } W' = W, \text{ ez azt jelenti, hogy } Q_2 > Q_2' \quad (22-11)$$

Az I. főtételből

$$W = Q_2 - Q_1 \text{ és } W' = Q_2' - Q_1$$



22-10 ábra

Módszer annak bizonyítására, hogy a Carnot-gép a legjobb hatásfokú minden lehetséges hőerőgép közül. A javasolt gép által végzett munka hajtja visszafelé a Carnot-gépet (mint egy hűtőgépet). A vesszős jelölések a javasolt gépre vonatkozó értékeket jelentik.

És mivel $W' = W$, a (22-11) egyenlőtlenséget felhasználva

$$Q_1 > Q'_1 \quad (22-12)$$

Így – ahogy megmutattuk, – az együtt működő két gép végeredményben termikus energiát visz át a hideg hőtartályból a meleg hőtartályba anélkül, hogy a környezet bármilyen eredő munkát végezne az együttes rendszeren. Ez sérti a termodinamika második főtételét, miszerint nem készíthető olyan periodikusan működő eszköz, amely termikus energiát visz át hidegebb hőtartályból melegebbe anélkül, hogy a környezet munkát végezne rajta. Ezért a javasolt gép feltételezett hatásfoka nem lehet nagyobb, mint a Carnot-hatásfok.

Hasonlóképpen, ha a javasolt gép reverzibilis, hatásfoka szintén nem múlhatja felül a Carnot körfolyamatét. Erre az esetre vonatkozóan bármelyik gép fordított irányban is működhet. Így hát ismét az iménti gondolatmenet vezet arra a következtetésre, hogy minden reverzibilis hőerőgépnél, amely csupán két adott hőmérsékletű hőtartály között cserél hőt, azonos a hatásfoka: – ez a Carnot-hatásfok.* Továbbá a bizonyítás során, mivel nem történt említés a munkaközeg anyagáról, ebből következik, hogy a Carnot-gép hatásfoka független a munkaközegtől.

22.7 A Kelvin-féle abszolút hőmérsékleti skála

Most már ismertethetjük a Kelvin által 1848-ban javasolt abszolút hőmérsékleti skálát. A skála bármely speciális anyag fizikai tulajdonságaitól függetlenül definiálható, mivel ez a Carnot-gép hatásfokán alapul:

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (22-13)$$

Kelvin javaslata szerint az új hőmérsékleti skála meghatározásához szükséges alapot a (22-13)-ból adódó

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (22-14)$$

összefüggés képezi, ahol T_1 és T_2 a Kelvin-skála két különböző pontja. Mivel az összefüggés csak a hőmérsékletek arányát határozza meg, ki kell jelölnünk a skála egy pontjához tartozó hőmérséklet numerikus értékét. Ahhoz, hogy a hőmérsékleti intervallumok megfeleljenek a Celsius-skálának, legyen az általunk definiált, kitüntetett pont a víz hármaspontja (ld. 19.10 fejezet), s ehhez rendeljük hozzá a 273,16 K értéket. Mivel a hármaspont hőmérséklete 0,01°C, a Kelvin-skála zéruspontja – 273,15°C-nak felel meg.

Jegyezzük meg, hogy a Kelvin-féle skálát energiaaránytal és nem egy speciális anyag fizikai tulajdonságaihoz kötve határozzuk meg. A víz hármaspontja mindössze úgy kerül a definícióba, mint a Celsius-skálának megfelelő hőmérséklet-intervallumok létrehozásának eszköze.

A Kelvin-hőmérsékletet definiáló egyenlet felírható azzal a hőátvitellel kifejezve, ami akkor megy végbe, amikor egy Carnot-gép úgy működik, hogy az egyik hőtartály a víz hármaspontjának megfelelő hőmérsékletű. Így,

* Azt azonban jegyezzük meg, hogy nem szükségszerű, hogy minden reverzibilis hőerőgépnek Carnot-hatásfoka legyen, mivel két adott hőmérsékletű hőtartály között az átmenet nem-adiabatikus módon is létrejöhet. Ezek a nem-adiabatikus folyamatok más, közbülső hőmérsékletű hőtartályokkal kapcsolatos további hőcserét foglalnak magukban. Így a hatásfok-számításban nemcsak a Q_1 és Q_2 hő (vagy T_1 és T_2 hőmérséklet) szerepel.

ha Q hőátvitel történik T hőmérsékleten és $Q_{h.p.}$ a $T_{h.p.} = 273,16$ K hőmérsékleten, akkor

$$T \equiv (273,16\text{K}) \left(\frac{Q}{Q_{h.p.}} \right) \quad (22-15)$$

A KELVIN-FÉLE
ABSZOLÚT
HŐMÉRSÉKLETI
SKÁLA

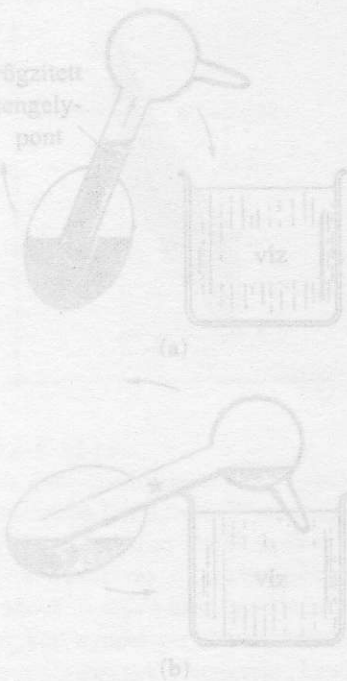
Mivel ezt a hőmérsékleti skálát úgy definiáltuk, hogy nem történt hivatkozás semmilyen speciális anyagra, ténylegesen abszolút skálát kaptunk. A skála hőmérséklet-közeit pontosan annak az állandó térfogatú ideális gáz-skálának megfelelően készítjük el, (ld. 19. fejezet), amely a víz hármaspontját $273,16$ K hőmérsékletűnek határozza meg.

22.8 A termodinamika harmadik főtétele

Ha létezne olyan eset, amikor az alacsony hőmérsékletű hőtartály hőmérséklete $T_1 = 0$ K, a Carnot hatásfok $1 - (T_1/T_2) = 1 - 0 = 100\%$ lenne. Az sajnos kísérleti tény, hogy amint egyre alacsonyabb hőmérsékleteket próbálunk elérni, minden egyes következő lépést egyre nehezebb megvalósítani. Valójában azonban elvi okai is vannak annak, hogy elfogadtuk a termodinamika harmadik főtételként ismert megállapítást:

A TERMODINAMIKA HARMADIK FŐTÉTELE Lehetetlen egy test hőmérsékletét véges számú lépésben abszolút zérusra csökkenteni.

Ha egy Carnot-körfolyamat abszolút zérus hőmérsékletű hőtartállyal működne ($T_1 = 0$), a (22-3) egyenletből az következne, hogy nem lenne leadott hőmennyiség ($Q_1 = 0$). Mivel a W munka $Q_2 - Q_1$, az ilyen hőerőgépet Q_2 termikus energiát teljes egészében munkává alakítaná, megsértve a második főtételt. Így a harmadik főtétel összefüggő, logikai rendszert alkot a másik három főtétellel: a nulladikkal, az elsővel és a másodikkal. Bár a továbbiakban a harmadik főtétellel nem foglalkozunk, a tétel hozzátartozik a termodinamika megalapozásának teljességéhez.



22-9 ábra

A Carnot-körfolyamat. Ez a játék bizonyos értelemben olyan hőerőgép, amely két különböző hőmérsékletű hőtartály között működik. Az alsó üveggömb szobahőmérsékleten van, míg a felső rész kisebb alacsonyabb hőmérsékletre hűl a fejtet beáramló nedves, helyes anyag viztartalmának párologtatásával. A madár belsejében folyékony éter, vagy más hasonló folyadék van, amelynek olyan alacsony a forráspontja, hogy szobahőmérsékleten párolog. A függőleges helyzetben (a) az alsó gömb...

Összefoglalás

A termodinamika második főtételét különböző – egymással egyenértékű – alakban fejezhetjük ki. Három ilyen megfogalmazás a következő:

A Kelvin-Planck féle megállapítás:

Nem lehetséges olyan, periodikusan működő gépet szerkeszteni, amely termikus energiát 100%-os hatásfokkal alakít át munkává.

A Clausius-féle megállapítás.

Nem lehetséges olyan, periodikusan működő eszközt szerkeszteni, ami termikus energiát visz hidegebb hőtartályból melegebbe anélkül, hogy a környezet munkát végezzon az eszközön.

Termikus energia nem áramlik önként hidegebb testről a melegebbre.

A Carnot-féle körfolyamat olyan reverzibilis folyamatok sorozata, amelyek izotermákból és adiabatákból állnak. Ennek a körfolyamatnak a hatásfoka a maximális lehetséges hatásfok, ami bármely két adott hőmérsékletű hőtartály között működő hőerőgéppel elérhető (Carnot-tétel). A hőerőgépek hatásfoka a következőképpen definiálható:

$$\text{hatásfok} \quad \eta = \frac{\text{hasznos munka}}{\text{befektetett hő}} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{Carnot})$$

A hőerőgépek különböző más típusainak körfolyamatait idealizált reverzibilis folyamatokkal közelíthetők; ezek mindegyike lehetővé teszi az maximális elméleti hatásfok kiszámítását.

22A-8 Egy 15% hatásfokú hőerőgép 1000 J munkát végez. Határozzuk meg a magasabb hőmérsékletű hőtartályból felvett hőmennyiséget.

22B-9 Egy bizonyos termodinamikai gép 100°C és 400°C között működik. a) Határozzuk meg, az elméletileg elérhető maximális hatásfokot! b) Mekkora a tényleges hatásfok, ha a hőerőgép háromszor annyi hőt ad le, mint amekkora a végzett munka nagysága?

22B-10 Ábrázoljuk a Carnot-körfolyamatot hőmérséklet-térfogat diagramon.

22B-11 Egy hűtőgép, amelynek teljesítménytényezője 5, egy -50°C -os hőtartályból von el hőt. Határozzuk meg a melegebb hőtartály hőmérsékletét.

22B-12 Egy bizonyos hőerőgép, amely 300°C és 9°C között működik, 25% maximális elméleti hatásfokot ér el. Mekkora befektetett hőmennyiség szükséges 10^4 J munkavégzéshez?

22B-13 Igazoljuk, hogy egy hűtőgép teljesítménytényezője $\varepsilon = Q_1/W$ egyenlő a Carnot-féle hűtőgépre vonatkozó értékkel: $T_1/(T_2-T_1)$

22B-14 Egy feltaláló azt állítja, hogy tervezett egy hőerőgépet, amely 10°C és 25°C között, 53% termodinamikai hatásfokkal működik. Ez egy bonyolult gép sok hengerrel, felszereléssel és más mechanizmusokkal. Hogyan vitathatnánk a feltaláló kijelentését az eszköz vizsgálata nélkül?

22B-15 a) Mennyi munka szükséges ahhoz, hogy 4187 J termikus energiát a 0°C -os fagyott talajból egy 27°C -os házba szivattyúzzunk egy Carnot-féle hűtőgéppel? b) Összesen mennyi a házban leadott hőmennyiség?

22B-16 Egy Carnot-féle hőerőgép visszafelé működik, mint hűtőgép. Hőt von el egy 250 K hőmérsékletű hőtartályból és hőt ad le 350 K hőmérsékleten. Mennyi hő jut a magas hőmérsékletű hőtartályba a hideg hőtartályból elvont 1 J hő árán?

22B-17 Carnot-féle hűtőgép 27°C -os szobahőmérséklet és egy fridsider mélyhűtőjének hőmérséklete között működik. Mekkora munkára van szükség ahhoz, hogy 10 J hőt vonjunk el a) egy 0°C -os mélyhűtőből és b) egy -50°C -os mélyhűtőből?

22B-18 Egy amerikai házat hőszivattyúval fűtenek, amelynek teljesítménytényezője 3. Mekkora lenne a költség a szokásos elektromos fűtést alkalmazva a hőszivattyú helyett, ha a hőszivattyú üzemeltetéshez a havi villanyszámla 45 dollár?

22B-19 Egy 200°C és 80°C között működő hőerőgép 20% maximális hatásfokot ér el. Mekkora befektetett energia teszi lehetővé, hogy a hőerőgép 10^4 J munkát végezzen?

22B-20 0,4 kW-os motor működtet egy Carnot-féle hűtőgépet, amely -10°C és 27°C között üzemel. Határozzuk meg, mekkora a) az alacsony hőmérsékletű hőtartályból másodpercenként elvont hőmennyiség és b) a magas hőmérsékletű hőtartálynak másodpercenként leadott hőmennyiség!

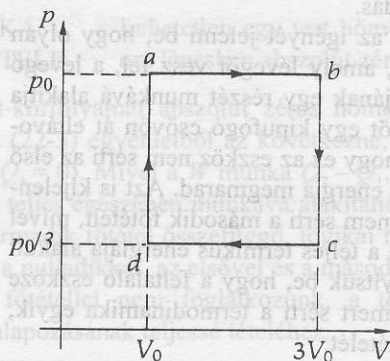
22B-21 Egy átlagos felnőtt, aki keményen dolgozik, 8 órás munkanap alatt kézi erővel 0,13 kWh fizikai

munkát tud végezni. a) Becsüljük meg, hogy hány embernek kellene villamos generátorokat kézi forgattyúval hajtani – 100 %-os hatásfokot feltételezve, – egy 6000 W-t igénylő előadóterem megvilágításához (ez jellemző egy 100 fős, jól megvilágított tanteremre). b) Határozzuk meg egy 8 órás munkanap teljes költségét, ha ezeknek az embereknek a munkabére óránként 5 dollár. c) Mennyi a napi teljes költség az 1 kWh-ra 10 centet számoló energiaszolgáltató vállalatnál? (Megjegyzés: a fenti becslés fénycsóvel történő világításra vonatkozik. Izzólámpák háromszor-négyszer annyi energiát igényelnek ugyanilyen megvilágításhoz. A fűtéshez és a légkondicionáláshoz szükséges energiát nem vettük figyelembe.)

22B-22 Oldjuk meg az előző feladatot a saját osztálytermünk világítására vonatkozó energiafogyasztás felméréseivel.

22.5 Néhány más hőerőgép-típus

22B-23 Egyatomos ideális gázzal a 22-11. ábrán látható, $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ „derékszögű” körfolyamatot véghezvük. a) Határozzuk meg a gáz által végzett eredő munkát p_0 és V_0 segítségével! b) Határozzuk meg a körfolyamat hatásfokát!



22-11 ábra

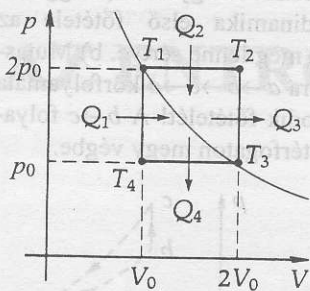
A 22B-23 és a 22B-24 feladathoz

22B-24 Tegyük fel, hogy az előző feladatban, miután a gázt végigvittük az $a \rightarrow b \rightarrow c$ folyamatokon, c -ből egy egyenes mentén visszavisszük az a pontba. a) Határozzuk meg a gáz által egy ciklus alatt végzett eredő munkát! b) Határozzuk meg a $c \rightarrow a$ folyamat során átvitt hő mennyiségét! c) Határozzuk meg a körfolyamat hatásfokát!

22B-25 Egy hőerőgép egyatomos ideális gázt alkalmaz a 22-12 ábrán látható, „négyzet” alakú körfolyamatban, amely két izobár és két izochor változást tartalmaz. A T_1 és T_3 hőmérséklet azonos izotermán helyezkedik el. Számítsuk ki a hőerőgép hatásfokát!

22.6 Az elérhető legnagyobb hatásfok, – a Carnot körfolyamat hatásfoka

22B-26 Vezessük le a (22-12) egyenlettel kifejezett egyenlőtlenséget a (22-10) egyenletből kiindulva!



22-12 ábra
A 22B-25 feladathoz

További feladatok

22C-27 Egy épület 24°C-ra történő fűtéséhez - 0°C-os külső hőmérséklet mellett - óránként 6·10⁷J energia szükséges, amit hőszivattyú biztosít. a) Mekkora az ezen két hőmérséklet között működő, Carnot-körfolyamatot végző hőszivattyú maximális elméleti teljesítménytényezője? b) Mennyi villamos energia szükséges óránként a valóságos hőszivattyú működtetéséhez, ha teljesítménytényezője 2,9? c) Tegyük fel, hogy a szivattyú az épületet közvetlenül villanykályhával fűti. Mennyi villamos energiát használnak ebben az esetben egy óra alatt? d) Az épület fűtésének másik alternatívája a hagyományos olajtűzelésű kazán lenne. Hány liter olajat használ fel óránként a 70%-os hatásfokú kazán, ha 1 liter olaj elégetésekor 3,7·10⁷J energia termelődik? e) Tegyük fel, hogy egy olajtűzelésű villamos generátor villamos energia termelése 42% hatásfokú és ezt az energiát használják a hőszivattyú működtetésére. Hány liter olajat kell óránként elégetni?

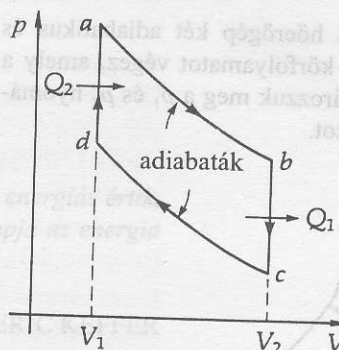
22C-28 Két Carnot-gép működik két adott hőmérséklet között. Az egyik egyatomos ideális gázt használ, a másik kétatomosat. Mindkettőre azonos a legkisebb és legnagyobb nyomás, ill. a legkisebb és legnagyobb térfogat. Azonos-e vajon az egy ciklusban végzett munka? Ha nem, melyik a nagyobb és miért? (Megjegyzés: nem szükséges matematikai számításokat végezni; kizárólag termodinamikai megfontolás is elegendő.)

22C-29 Egy hűtőgép hőt von el a - 15°C-os mélyhűtőjéből és hőt ad le a 27°C-os szobába. Ha a maximális teljesítménytényező 30%-át éri el, mekkora motorteljesítmény szükséges ahhoz, hogy a fridzsider percnként 40 g, 27°C-os vizet fagyasszon - 15°C-os jéggé?

22C-30 Két Carnot-gép ugyanazon két, - állandó hőmérsékletű - hőtartály között üzemel. Az egyik egyatomos ideális gázt használ, a másik kétatomosat (forgással, de rezgés nélkül). Mindkettő ugyanarról a kezdeti p₀ és V₀ értékről indul és ugyanazon az izotermikus expanzió keresztül éri el a p₁ és V₁ értéket. a) Azonos-e a két hőerőgép hatásfoka? b) Azonos-e az izotermikus expanzió során felvett hő? (Ha nem, melyik a nagyobb?) c) Azonos-e az egy ciklus során végzett

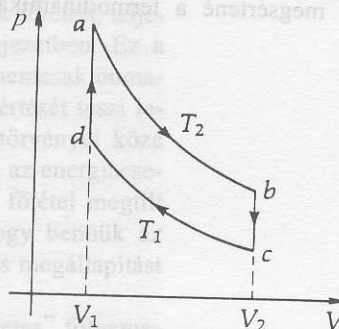
munka? (Ha nem, melyik a nagyobb?) Indokolja minden esetben a választ!

22C-31 Egy reverzibilis hőerőgép a 22-13 ábrán látható módon Ottó-körfolyamatot végez, amely két adiabatikus és két izochor folyamatból áll. Határozzuk meg a V₁ és V₂ térfogatokkal kifejezett hatásfokot.

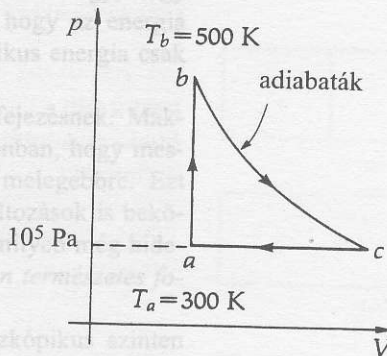


22-13 ábra
A 22C-31 feladathoz

22C-32 Reverzibilis hőerőgép a 22-14 ábrán látható körfolyamattal működik, amely két izotermikus és két izochor változából áll. Határozzuk meg a hőerőgép hatásfokát és mutassuk meg, hogy az kisebb, mint a két azonos hőmérséklet között működő Carnot-körfolyamat hatásfoka. Tegyük fel, hogy a munkaközeg egyatomos ideális gáz.



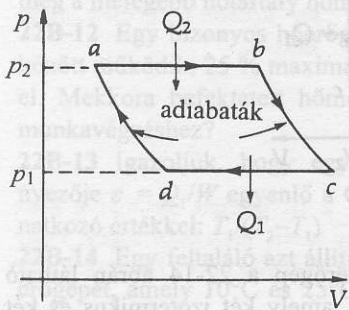
22-14 ábra
A 22C-32 feladathoz



22-15 ábra
A 22C-33 feladathoz

22C-33 Ideális hőerőgép 0,2 mól ideális gázzal ($K = 5/3$) a 22-15 ábrán látható körfolyamatot végzi. Az $a \rightarrow b$ folyamat izochor, a $b \rightarrow c$ adiabatikus és a $c \rightarrow a$ izobár. Az ábra mutatja az a és b pont hőmérsékletét. a) Határozzuk meg p , V és T ismeretlenek értékét az a , b és c pontokban! b) Határozzuk meg az egy ciklus alatt végzett eredő munkát.

22C-34 Egy reverzibilis hőerőgép két adiabatikus és két izobár görbéből álló körfolyamatot végez, amely a 22-16 ábrán látható. Határozzuk meg a p_1 és p_2 nyomásokkal kifejezett hatásfokot.



22-16 ábra

A 22C-34 feladathoz

22C-35 Tegyük fel, hogy a p - V diagramon két adiabat metszi egymást. Mutassuk meg, hogy az ezekből a görbék közül egy izotermikus tágulásnak megfelelő görbéből alkotott zárt ciklus megsértene a termodinamika második főtételét!

22B-16 Egy Carnot-féle hőerőgép visszafelé működik, mint hűtőgép. Hőrt von el egy 250 K hőmérsékletű hőtartályból, és leadja a 350 K hőmérsékletű hőtartályba. a) Mekkora a hűtőerő? b) Mekkora a munkavégzés? c) Mekkora a hatásfok?

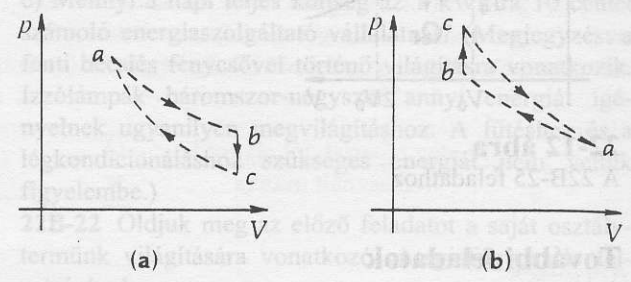
22B-17 Carnot-féle hűtőgép 27°C -os szobahőmérséklet és egy hidegebb mélyhűtőjébe hőmérséklete között működik. Mekkora a munkavégzés, ha a hűtőgép 10 J hőt von el a hűtőtartályból? a) 0°C -os mélyhűtőjébe? b) -50°C -os mélyhűtőjébe?

22B-18 Egy amerikai házi hűtőszobában a hűtőgép a szobában lévő levegőt hűti le 20°C -ra. Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? a) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? b) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel?

22B-19 Egy hűtőgép a szobában lévő levegőt hűti le 20°C -ra. Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? a) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? b) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel?

22B-20 Egy hűtőgép a szobában lévő levegőt hűti le 20°C -ra. Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? a) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? b) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel?

22C-36 a) Mutassuk meg, hogy ha két adiabata a 22-17a ábrán látható módon metszené egymást (szaggatott görbék), akkor a termodinamika első főtétele az $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow a$ körfolyamattal meg lenne sértve. b) Mutassuk meg, hogy a 22-17b ábra $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow a$ körfolyamata sérti a termodinamika második főtételét! A $b \rightarrow c$ folyamat mindkét ábrán állandó térfogaton megy végbe.



22-17 ábra

A 22C-36 feladathoz

22C-37 Egy új abszolút hőmérsékleti skála, amelyet az „új T”-re vonatkozóan „új té fokok”-nak neveznek, egy speciális vegyület fagyás- és forráspontján alapul. E két hőmérséklet között működő Carnot-hőerőgép 800 J hőt vesz fel a magasabb hőmérsékleten és 600 J hőt ad le az alacsonyabb hőmérsékleten. Határozzuk meg azt a hőmérsékletet – „új té” fokokban, – amelyen ez a vegyület megolvad, ill. amelyen forr, ha ezt a két hőmérsékletet 100 „új té” fok választja el egymástól.

22C-38 Két Carnot-gép működik két adott hőmérséklet között. Az egyik egységes ideális gázt használ, a másik kétatomos. Minkéntre azonos a térségek és a térfogatnyomás, ill. a térségek és a térfogatnyomás? a) Azonos-e vajon az ideális gáz és a kétatomos gáz? b) Mekkora a hűtőerő és a hűtőerő? c) Mekkora a hűtőerő és a hűtőerő?

22C-39 Egy hűtőgép a szobában lévő levegőt hűti le 20°C -ra. Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? a) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? b) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel?

22C-40 Két Carnot-gép ugyanazon két – állandó hőmérsékletű – hőtartály között működik. Az egyik gép a hűtőerő Q_1 hőt von el a hűtőtartályból, és Q_2 hőt ad le a meleg hőtartályba. A másik gép a hűtőerő Q_3 hőt von el a hűtőtartályból, és Q_4 hőt ad le a meleg hőtartályba. a) Mekkora a hűtőerő Q_3 és Q_4 ? b) Mekkora a hűtőerő Q_3 és Q_4 ?

22C-41 Egy hűtőgép a szobában lévő levegőt hűti le 20°C -ra. Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? a) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? b) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel?

22C-42 Egy hűtőgép a szobában lévő levegőt hűti le 20°C -ra. Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? a) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel? b) Mekkora a hűtőerő, ha a hűtőgép 1 kW teljesítményt vesz fel?

20A-11 $1,7 \times 10^5 \text{ N}$ 20A-13 a) $1,10 \times 10^{30}$ elektron b) $1,82 \times 10^6$ mol

20A-15 8,01 km

20B-17 a) 0,489 atm b) $0,888 \text{ kg/m}^3$ 20B-19 $6,59 \text{ m}^3$

20B-21 átlagban 59,0 atom

20B-23 átlagosan 3,48 molekula

20B-25 a) 2,56 atm b) 16,1 m

20B-27 A válasz adott.

20A-29 a) $4,14 \times 10^{-16} \text{ J}$ b) $7,04 \times 10^5 \text{ m/s}$ 20A-31 $5,80 \times 10^9 \text{ K}$

20B-33 A válasz adott.

20B-35 b) A szökési sebesség 10,8%-a

20B-37 $(8,28 \times 10^{-9}/l^3) \text{ N/m}^2$ (l méterben)20C-39 $8,22 \times 10^{23}$ ütközés/sec20C-41 $mv^2/3l^3$

20C-43 A válasz adott.

20C-45 $\omega = v\theta/x$

20C-47 385 m/s, 417 m/s

20C-49 a) 1,77 cm b) $12,6^\circ$ 20C-51 $63,4^\circ$ **XXI. Fejezet**

21A-1 a) 209 J b) 209 J c) 0 d) 0,0896 l

21A-3 a) 0,144 atm b) 157 K

21A-5 a) 0,160 atm b) 131 K

21B-7 a) 546 K b) 4538 J

c) $1,13 \times 10^4 \text{ J}$ d) 6806 J

21B-9 A válasz adott.

21B-11 $2,09 \times 10^4 \text{ J}$

21B-13 A válasz adott.

21A-15 2,93R

21B-17 a) 216°C b) 0,178 L21B-19 $4,14 \times 10^{-21} \text{ J}$

21A-21 56, l

21C-23 A válasz adott.

21C-25 a) 70,2 J b) 36,0 J c) 208,3 J

d) $-53,6 \text{ J}$ e) $-36,0 \text{ J}$ f) 16,6 J21C-27 a) 47,3 J b) $1,61 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ c) 13,5 J

d) 33,8 J

21C-29 b) $\frac{13}{11}$ **XXII. Fejezet**

22A-1 150 J

22A-3 14,2%

22A-5 280 K

22A-7 5,76%

22B-9 a) 44,6% b) 25%

22B-11 $-5,40^\circ\text{C}$

22B-13 A válasz adott.

22B-15 a) 414 J b) 4600 J

22B-17 a) 0,99 J b) 3,45 J

22B-19 $1,97 \times 10^5 \text{ J}$

22B-21 a) 370 személy b) 14800,00 dollár c) 4,80 dollár

22B-23 a) $\frac{4}{3} P_0 V_0$ b) 22,2%22B-25 $\frac{2}{13}$ 22C-27 a) 12,4 b) $2,07 \times 10^7 \text{ J}$ c) $6,00 \times 10^7 \text{ J}$

d) 2,32 l e) 1,33 l

22C-29 173 W

22C-31 $\left(1 - \frac{V_1}{V_3}\right)^{(\gamma-1)}$ 22C-33 a) α : 4,92 l; b) 1,67 atm; c) 6,69 l, $T_c = 408 \text{ K}$
b) 52,7 J

22C-35 A válasz adott.

22C-37 300 N, 400 N

XXIII. Fejezet

23A-1 -24,2 J/K

23A-3 123 J/K

23A-5 5,27 J/K

23B-7 12,6 J/K

23B-9 A válasz adott.

23B-11 $\sim 5 \times 10^5 \text{ J/K}$

23B-13 A válasz adott.

23C-15 3807 J

23C-17 A válasz adott.

23C-19 b) $mc[(T_2 + T_1) - 2\sqrt{T_2 T_1}]$

23C-21 A válasz adott.

23C-23 A válasz adott.

23C-25 a) 588 J b) zérus c) 1,96 J/K d) 1,96 J/K

23C-27 $8k \ln 2$ 23C-29 $2,40 \times 10^{26} \text{ J/K}\cdot\text{h}$