

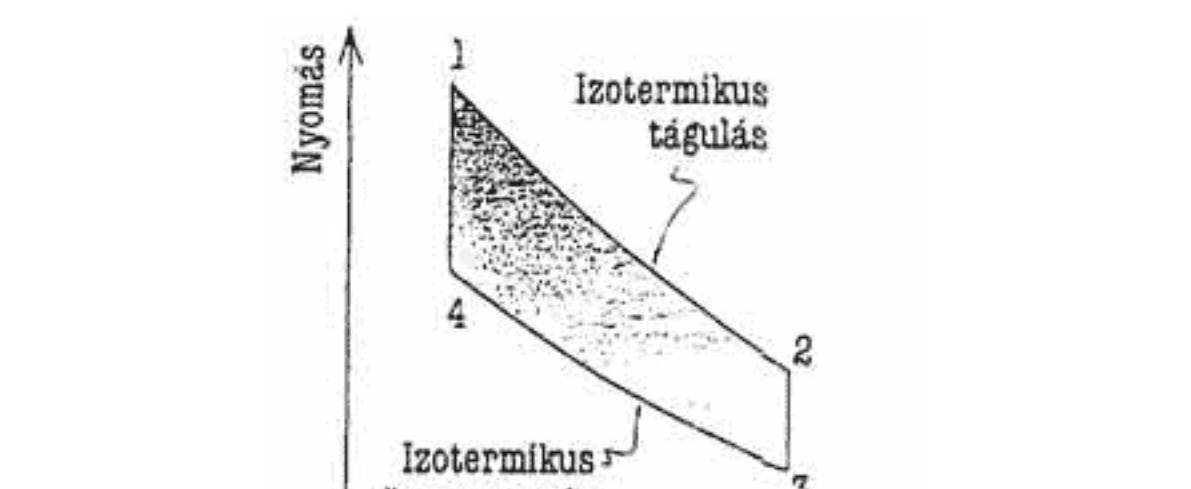
Hogyan építhetünk hőerőgépet, avagy Stirling-motor házilag!

A hőt hasznos mechanikai munkává alakító hőerőgépeknek két fő típusa van: az egyikben a robbanás közvetlenül a dugattyúra hat, a másikban pedig valamilyen közvetítő munkavégző közegen keresztül fejti ki hatását. Az első belső égésű motor, amelynek legnyilvánvalóbb példája a benzinmotor: az üzemanyag elégetésekor a gáz halmazállapotú égéstermek kitérnének, és közvetlenül elmozdítják a dugattyút. A második típus a külső égésű motor. Ilyen például a gőzgép, amelyben a víz munkavégző közeg. Első lépésben az égő üzemanyag - például a szén - elgőzölögte a vizet, majd a gőzt egy hengerbe vezetik, ahol az elmozdítja a dugattyút.

A külső égésű motor egy másik fajtáját Robert Stirling elkészítette 1816-ban, Skóciában. A motor munka végző közega eredetileg levegő volt, a későbbi típusokban azonban hidrogént vagy héliumot használtak. A Stirling-motor több szempontból is figyelemre méltó. A munkavégző közeget folyamatosan újra használja. Üzemeltetéséhez bármilyen hőforrás megfelel, ezért a környezetet legkevésbé szennyező anyagot választhatjuk, például a hidrogént, amelyet napenergia felhasználásával vízbontással nyerhetnénk, vagy szerves anyagok bomlása során keletkező biogázt is. Ezenkívül - elméletben legalábbis - a motor nagyon jó hatásfokkal alakítja át a hőt mechanikai munkává. Mindezek ellenére a Stirling-motor a háttérbe szorult. Az utóbbi időben az ötlet kezd ismét népszerűvé válni, mert környezetbarát és üzemeltetéséhez nem csak költségszermékek használhatóak.

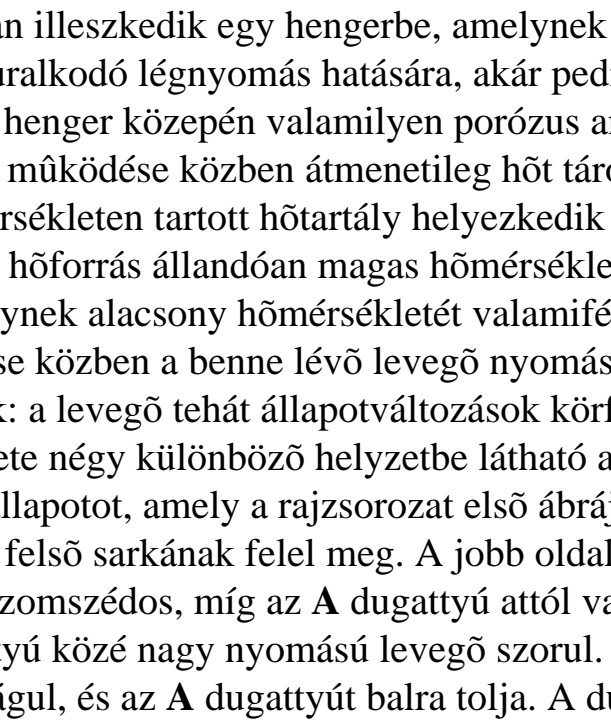
A Stirling-motor egy ideális Carnot-gép (reverzibilisen hűtőgéppé fordítható). Carnot-gépet más körfolyamatra is lehet építeni, ha a ciklusnak a hőtartályoktól elszigetelt rész folyamatában a gép munkaközegen kívüli elemei is alkalmasan részt vesznek. Ilyen például a Stirling-motor. Előnye a Carnot- körfolyamat alapján elképzelt géppel szemben, hogy tényleg működik (bár, természetesen, nem ideálisan). A Stirling- motor a munkaközeg-gázon kívül belső hőtartályokat is tartalmaz, amelyek a külső hőtartályoktól elszigetelt folyamat-részben a munkaközeggel termikus kölcsönhatásban vannak.

Mi az a típust készítették el, amelyet Peter I. Tailer írt le egy cikkében. Az eredeti ötlet a philadelphiai K. Ridertől származik (1876). Ez a berendezés nem valószínű, hogy versenyezhet el a hagyományos, korszerű motorokkal, mert leadott teljesítménye kicsi. Előnye viszont, hogy egyszerű anyagokból is elkészíthető, és jól tanulmányozható rajta a hőerőgépek működése, valamint a megépítés közben felvetődött problémák segítésére abban, hogy elméleti és gyakorlati ismereteket szerezzen. A berendezés egyik vonzó tulajdonsága, hogy nincs szükség pontosan megmunkált dugattyúra és hengerekre. Mindössze két, részben vízbemerített konzervdobozra van szükségünk. A vizet a berendezés alján lévő két tartályba töltjük. A konzervdobozokat erősítsük egy-egy rúd végére, a rudak másik végét rögzítsük a berendezés tetején elhelyezett súlyokkal terhelt lendkerék hajtókarjához! A tartályokat egymással és a bennük lévő konzervdobozokkal, egy levegővel töltött cső köti össze. Ha az egyik tartályban lévő vizet valamilyen hőforrással, például lánggal melegítjük, akkor az összekötő csőben a levegő ide-oda áramlik, a dobozok hol fölemelkednek, hol lesüllyednek, és percenként néhány fokos szögsebességgel mozgásba hozzák a lendkereket. Az mozgás a berendezés két, csekélyenél tünő tulajdonságával kapcsolatos. Az egyik a lendkerék hajtókarjának elrendezése: oldalról nézve a külső karok egymásra merőlegesek. A másik tulajdonság azzal függ össze, hogyan terjed a hő a berendezésben a hőforrás és az egyik konzervdobozt kitöltő levegő között.



A Stirling-motor négy állapota

Mielőtt részleteznénk Tailer berendezésének működési elvét, nézzük meg a Stirling-motor működési elvét.



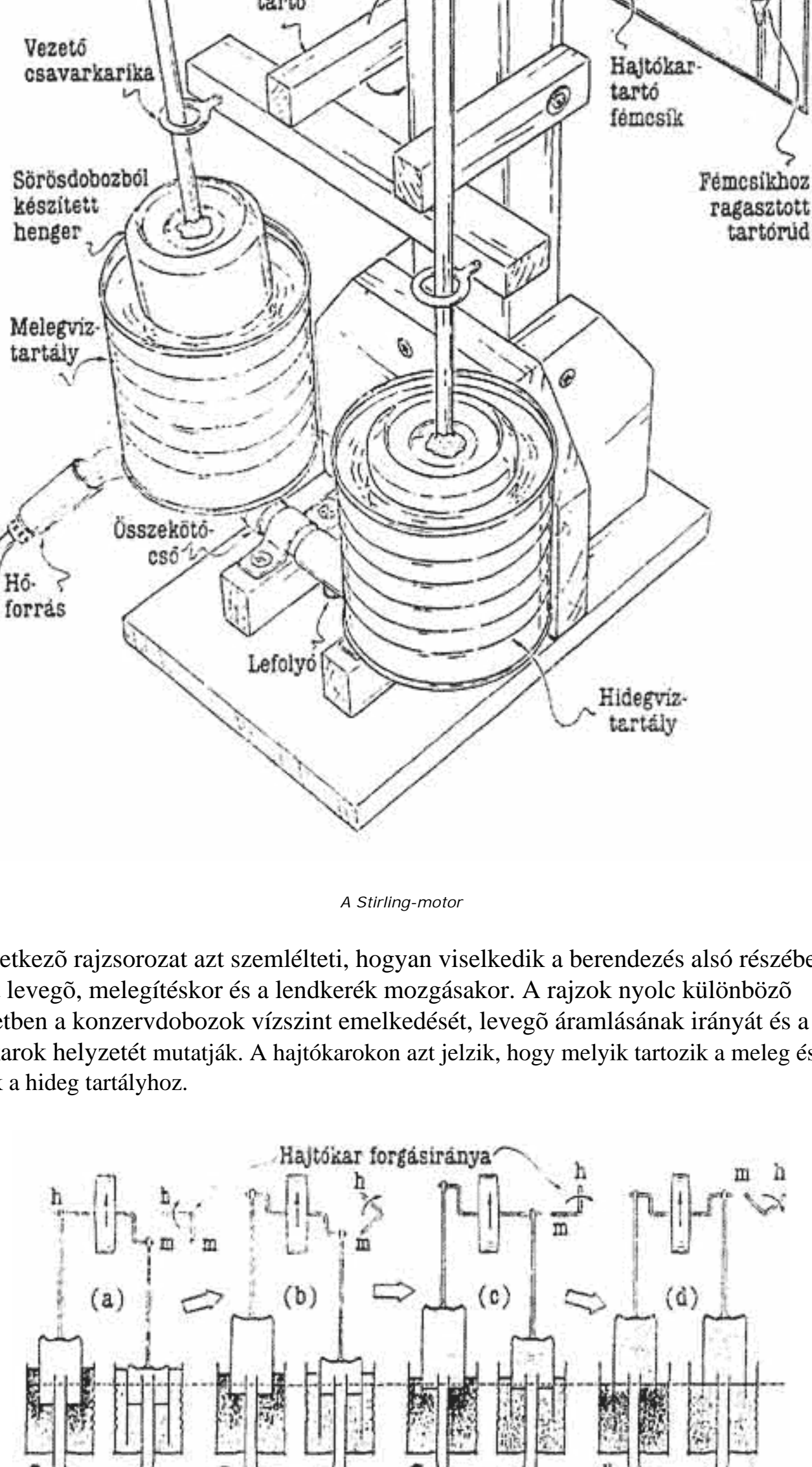
Nyomás-térfogat diagram

Két merev dugattyú pontosan illeszkedik egy hengerbe, amelynek belsejében jobbra-balra mozoghat akár az ott uralkodó légnyomás hatására, akár pedig egy hozzájuk kapcsolódó gépezet által. A henger közepén valamilyen porózus anyag, például fémháló helyezkedik el, amely a gép működése közben átmenetileg hőt tárol. A dugattyúk közelében két állandó hőmérsékleten tartott hőtartály helyezkedik el, baloldalon "melegtartály", amelyet egy hőforrás állandóan magas hőmérsékleten tart, jobb oldalon pedig a "hidegtartály", amelynek alacsony hőmérsékletét valamilyen hőelvezetés biztosítja. A motor működése közben a benne lévő levegő nyomása, hőmérséklete és térfogata ciklikusan változik: a levegő tehát állapotváltozások körfolyamatán megy keresztül. A dugattyú helyzete négy különböző helyzetbe látható az ábrán. Vegyük szemügyre először az 1-es állapotot, amely a rajzozott első ábrájának, illetve a diagram ferde négyszög bal felső sarkának felel meg. A jobb oldali, **B** jelű dugattyú közvetlenül regenerátorral szomszédos, míg az **A** dugattyú attól valamivel távolabb helyezkedik el. A két dugattyú közé nagy nyomású levegő szorult. Amint a hőtartály felmelegült a dugót, az kitágul, és az **A** dugattyút balra tolja. A dugattyúk közötti térfogat növekedése nyomáscsökkenéshez vezet. Táguláskor a levegő hőmérséklete a melegtartály közelében miatti állandó, ezért a tágulás izotermikus. A tágulást a nyomás-térfogat diagram ferde négyszögének felső határoló görbéje írja le. Amikor az **A** dugattyú eléri bal szélső helyzetét, a levegő a **2**-es állapotban van. Ezután mindkét dugattyú jobbra mozdul el, de nem a melegítés, hanem a hozzájuk kapcsolt mechanikus szerkezet hatására, egészen addig, amíg **A** el nem éri a regenerátort, és így **B** a jobb szélső helyzetbe kerül. Ebben a pillanatban a levegő a **3**-as állapotban van. Az elmozduló dugattyúk a levegőt átnyomják a regenerátoron, amely felveszi a hő egy részét, s ezáltal lehűti a levegőt. Mivel a dugattyúk összehangoltan mozognak, a közéjük zárt levegő térfogata nem változik. Az ilyen állapotváltozást állandó térfogatúnak (izochorak) nevezzük. Ezután a **B** dugattyút a hozzá kapcsolódó gépezet balra tolja. Az összenyomódó levegő hőt ad le a hideg tartálynak. Mivel a hőtartály hőmérséklete állandó, levegő hőmérséklete sem változik. Az ilyen állapotváltozást izotermikus összenyomásnak nevezzük. Az összenyomás végén a levegő a **4**-es állapotban van. A teljes körfolyamat befejezésére a gépezet mindkét dugattyút addig tolja balra, amíg azok ismét az 1-es állapotba nem kerülnek. Ez az állapotváltozás ismét állandó térfogaton megy végbe. Miközben a levegő átáramlik a regenerátoron, felveszi azt a hőmennyiséget, amelyet ezt megelőzően leadott.

A gép működését a diagramon látható zárt görbe folyamatos, egymás utáni ismétlődése írja le. Az 1-es és a 2-es állapotok közötti átmenet során az egyik dugattyút a levegő tágulása mozgatja. A másik három átmenetben viszont a gépezet hajtja a dugattyútakat. A levegő munkaközegű Stirling-motor szerint a gépezet egy dugattyú ellenében munkavégzésre kényszerítik oly módon, hogy a levegő kifelé nyomja a dugattyút, és ezáltal növeli a dugattyúk közötti térfogatot. A dugattyú mozgása ezután átvihető valamilyen gépezetre, amellyel a felvett energia hasznosítható. Ha azonban a levegő csak egyetlen egyszer tárná ki, akkor a motornak nem sok hasznát vonnánk. A motornak valahogyan periodikusan össze kell nyomnia úgy a levegőt, hogy periodikusan kitágulhasson, és így a motor folyamatos munkát végezheszen. Röviden: a levegő összenyomásához állandó körforgásban kell lennie. Emlékezzünk azonban arra, hogy a levegő összenyomásához a gépezetnek munkát kell végeznie a levegőn. Ha az egyes körfolyamatokban a gépezetnek ugyanannyi munkát kell végeznie a levegőn, mint amennyit a levegő végez rajta, akkor az eredő munkavégzés nulla, azaz a motornak semmi haszna.

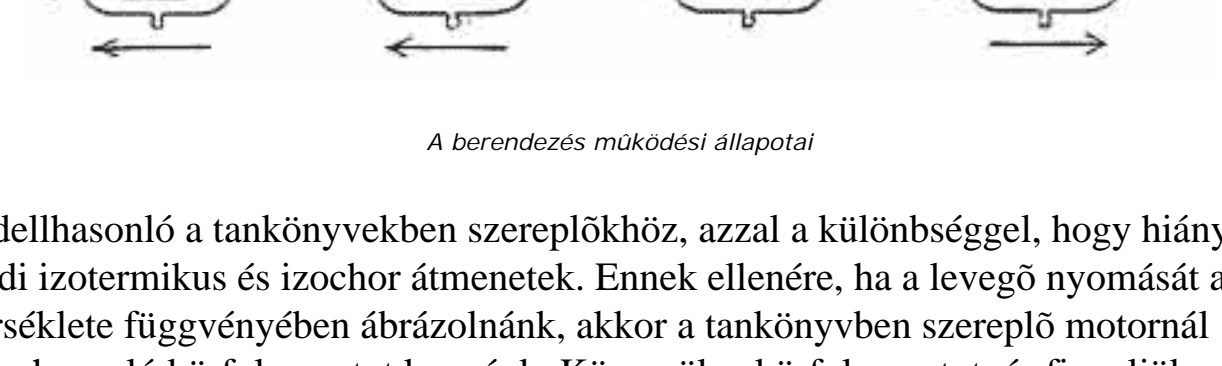
A probléma megoldása a levegővel kapcsolatos. Tétélezzük fel, hogy a levegő munkavégzéskor mindig forró! A forró levegő molekulái erőteljesen nekiütődnek a dugattyúnak, ezért a nyomás is nagy lesz. Mivel a dugattyún végzett munka egyenesen arányos a gáz nyomásával, a munkavégzés számottevő. Tételünk fel, hogy amikor a gépezet a gáz munkát a levegőn, akkor a hőmérsékletet alacsony! Hidegben az ütközések gyengébbek, a nyomás is kicsi, így a levegőn végzett munka is csekély. Ha a levegő hőmérsékletét ily módon szabályozni tudjuk, akkor a levegőn több munkát fejt ki a gépezetre, mint amekkora munkát a gépezet végez a levegőn. A hőmérséklet és a nyomás ilyen periodikus változása áll a Stirling-motor működésének háttérében. A levegő izotermikus tágulása révén akkor végez munkát az **A** dugattyún, amikor a hőmérséklete magas. A gépezet ezzel szemben akkor végez izotermikus összenyomást a levegőn, amikor az hideg. A motor tehát végeredményben munkát végez. A motor által egy ciklus alatt végzett munka a nyomás-térfogat függvény alapján meghatározható meg. Az izotermikus tágulás során a levegő által végzett munkamennyiséget a megfelelő görbe szakasz alatti terület jelöli. Ezt a területet a görbe szakasz, a diagram vízszintes tengelye és az erre merőleges, az állapotváltozási görbe végpontjaiból kiinduló két szakasz határolja. Az izotermikus összenyomásnál a levegő végzett munkát a megfelelő görbe szakasz alatti terület jelöli. Az izochor állapotváltozások nem történik munkavégzés, mert a gáz térfogata változatlan. Így az ehhez tartozó görbe szakaszok alatt fekvő terület nulla. Ha ki akarjuk számítani a motor által a teljes körfolyamat alatt végzett nettó munka nagyságát, akkor ki kell vonnunk a tágulási görbe alatti területből az összenyomási szakasz alatti területet. Ez nem más, mint az aszimmetrikus négyszögön belüli terület.

Térjünk most vissza az általunk megépített berendezéshez! Ebben a fűtött tartály a melegtartály, a másik a hidegtartály, amelynek hőmérsékletét a hűsugárzás és a hőáramlás tartja fenn. A levegővel töltött térfogatok - többek közt a tartályokat összekötő cső - töltik be most a henger szerepét. Regenerátorként akár maga a cső, de a belsejében elhelyezett fémháló alkalmas, a lendkerék pedig gépezet, amihez a konzervdobozokat erősítjük. (Az ábra a következő oldalon.)



A Stirling-motor

A következő rajzszorozat azt szemlélteti, hogyan viselkedik a berendezés alsó részében rekedt levegő, melegítéskor és a lendkerék mozgásakor. A rajzok nyolc irányból azonos helyzetben megmutatják a hajtókarok helyzetét mutatják. A hajtókarokon azt jelzik, hogy melyik tartozik a meleg és melyik a hideg tartályhoz.



A berendezés működési állapotai

A modellhoz hasonló a tankönyvekben szereplőkhöz, az a különbséggel, hogy hiányoznak a valódi izotermikus és izochor átmenetek. Ennek ellenére, ha a levegő nyomását a hőmérsékletre függvényében ábrázolnánk, akkor a tankönyvben szereplő motornál kétszeresére nő a körfolyamatot körbejáró, kivessék a körfolyamatot, és figyelembe meg a motort abban a pillanatban, amikor a **h** állapotot elhagyva éppen az **a**-ba van! Az **a** állapotban meleg konzervdoboz gyorsabban emelkedik, mint ahogy a hideg sülyed. Ezután **c** eléréséig mindkét doboz emelkedik, majd a **d** állapotig a hideg konzervdoboz gyorsabban emelkedik, mint ahogy a meleg sülyed. Figyelembe, hogy **h** és **d** között a meleg konzervdobozban több levegő van, mint a hidegben! Ez azt jelenti, hogy több levegő melegszik fel, mint amennyi lehül, vagyis a levegő hőmérséklete a hűtőcsőnél. Figyeljünk meg azt is, hogy a **h**-től **d**-ig tartó állapotváltozás során a térfogat nő! A tágulást a többletnyomás hozza létre, tehát a levegő valóban végez munkát a konzervdobozokon és ezen keresztül a lendkeréken.

Amikor a motor a **d** és az **a** állapotok között mozog, amikor a térfogat és a nyomás változása éppen ellentétes, itt a lendkerék végez munkát a levegőn. A konzervdobozok végső elmozdulásának következtében összenyomódik a levegő, a légáram a hideg doboz felé tartva csökkenti a hőmérsékletét és a nyomást. Amikor a gáz összenyomódik, nyomása kicsi, a lendkerék által a levegőn végzett munka kisebb, mint akkorát a korábbi **h** és **d** közötti szakaszban a levegő végzett a lendkeréken.

A Tudomány című (sajnos azóta már megszűnt) folyóiratban találtunk ugyan a Stirling-motor megépítéséhez szükséges jól használható terveket, de a megépítés során a rendelkezésünkre álló anyagoktól tulajdonságai miatt sok változtatást kellett végrehajtásunk. A hajtókarokat merev műanyagból (4 mm széles) alakítottuk ki, hogy az ne hajoljon el motor működése közben. A forgattyús tengely 3 mm vastag alumínium csíkkal támaszkodik. A csíkkobba lyukakat fúrtunk, tetejébe hornyot mélyítettünk a forgattyús tengely alátámasztására. A csíkkat ezután az ábra szerint - egy fából készült kar belsejébe csavaroztuk.

Lendkerékként olyan 20-cm átmérőjű csigát használtunk, amelynek kerületére szimmetrikusan elrendezve súlyokat rögzítettünk. A forgattyústengelyt úgy rögzítettük a lendkerékbe, hogy a hajtókarok egymással 90 fokos szöget zárjanak be.

A hideg és melegvizeztartályokat konzervdobozból készítettük. Az összekötő rudat merev műanyagpálciából készítettük, amelyek kb. 80 cm hosszúak. Az összekötő rudak végére 10 mm hosszán M5-ös menetet vágunk, és csavarkötéssel rögzítettük az összekötőcsővel a kólás dobozhoz készült csavarkötés. A hengerben biztosítani kellett a nyomás állandóságát (vagyis ne szökjön el a munkaközeg), ezért a levegő páratartalmának hatására vulkanizáló szilikonkaucsukot (FBS tömítő és ragasztó) használtunk. Ez hőhatásnak nagyon jól ellenáll.

Tartályként kb. 0,7 literes konzervdobozokat használtunk. A tartályokat 3/4 colos belső átmérőjű csőbe horganyozott acélcső köti össze. A tartályok alját átlyukasztottuk és egy-egy 14-cm hosszú csődarabot illesztettünk a lyukba. A tartály alatti a cső mintegy 2,5-cm darabja álljon ki.

A csöveket odaforrasztottuk a tartályokhoz. Miután mindkét tartályt ily módon előkészítettük, összeillesztettük a tartályokat az összekötőcsővel, amelyet egy elvezetőnyílással láttunk el, ebbe menetet fúrtunk, hogy összekötőcsövet víztelíteni tudjunk. Az összekötőcső egyik oldalába zárható nyílást készítettünk, hogy a később regenerátort kívánunk behelyezni vagy kicserélni, könnyen szétbontható legyen.

A motor beindítása előtt a forgattyústengelyt olyan helyzetbe kell hozni, hogy mindkét hajtókar fölfelé mutasson, a függőlegessel 45 fokos szöget bezárva. Ezután kinyitva a lefolyót, és a hidegtartályt töltjük fel hideg vízzel egészen addig, amíg a víz az összekötő csővön és a lefolyón keresztül ki nem folyik! Ezután öntsünk a melegtartályba forró vizet, szintén addig, amíg a víz túl nem folyik! Majd zárjuk le a lefolyót és kezdjük hevíteni a meleg tartályt, pl. borszezégővel, vagy merülőforralóval.

A lendkerék forgási sebessége a két tartály hőmérsékletkülönbségétől függ. Az általunk készített motor, pl. percenként 10 és 20 közötti fordulatszámot ér el, amikor a tartályokban a víz hőmérséklete 93. ill. 16 Celsius fok körül volt, amikor azonban a melegtartályba egészen a forráspont közeléig melegítettük a vizet, a fordulatszám meghaladta a percenkénti 20-at. A motor működése hatékonyabbá tehető, ha az összekötő csőbe regenerátort gyantán sűrű hűtésű, üszteketekert csíkkal helyezzük. Az is a működési tulajdonságok megváltozását okozta, ha más munkaközegét használtunk. Az általunk kipróbált munkaközeg a boltban is kapható habpatronban található dinitroogén-oxid volt. Az jelentéket az egyetlen lehet, hogy cseréljük le az eredetileg benn lévő levegőt erre a gázra, hogy csak az új munkaközeg legyen jelen. A megoldás végül az volt, hogy feltöltöttük vízzel a munkaközegét tartalmazó rudat, és kinyomtuk felé tartva a vizet. Persze ehhez először egy szódásüvegtől feltöltöttünk a gázzal, majd egy hajlékony műanyagcsővel toldottuk meg a közeli öntvénylőlelet. Az új munkaközeggel a motor már kisebb hőmérsékleten forgásba jött (kb. 80 Celsius-fok). Az ok, ami miatt ez a változás bekövetkezett az az lehet, hogy a levegő és a gáz átlagos molekulatömege más. A gáz esetén ez egy ml-ra 44 gramm, a levegő esetén kevesebb (29 gramm/mól az átlagos érték levegőre), mivel a levegő nagy része nitrogénből áll. A gáz nyomása pedig függ az őt alkotó gáz molekuláinak tömegétől! Úgy látjuk, ezt még tovább kell gondolni, hiszen nem biztos, hogy mindent figyelembe vettünk.

A hőmérséklet mellett a készülékének más paramétereit is megváltoztathatjuk. Az elkövetkező hetekben a következő változtatásokat szeretnénk kipróbálni:

- Gyorsabban forog-e a lendkerék és a megváltoztatjuk a lökethosszat?
- Mi történik, ha a hajtókarok által bezárt szög nem 90 fokos?
- Más regenerátoranyagok javíthatják-e a motor teljesítményét?
- Nő-e a teljesítmény, ha víz helyett más folyadékokat használunk?
- Nő-e a teljesítmény, ha levegő helyett más munkaközegét használunk?
- Mi történik, ha megváltoztatjuk az összekötőcső hosszát, és ez által növeljük vagy csökkentjük a dobozokba zárt levegőcső magasságát?

Felhasznált irodalom:

- Dede Miklós-Demény András: Kísérleti Fizika 2.
- Tankönyvkiadó, Bp. 1983
- BudaÁgoston: Kísérleti Fizika I. kötet
- Tankönyvkiadó, Bp. 1978
- Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete
- Gondolat Kiadó, Bp. 1978
- Jearl Walker: Egyszerűbb anyagokból házilag is készíthetünk Stirling-motort, Tudomány (sajnos csak a cikk egy fénymásolata van meg, így az évfolyamot nem tudtuk eddig kideríteni)

Melléklet:

- 2 db fénykép az elkészült Stirling-motorról