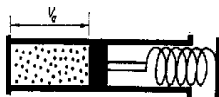


Ez alkalommal a hőtan (termodinamika) egyik alapvető fogalmával, az izotermális változással foglalkozunk. Izotermális változásnak nevezünk olyan kísérletet, amelynek folyamán a hőmérséklet állandó marad. Lássunk erre egy példát.

4 gramm héliumgáz van bezárva egy hengerbe, amelynek alapterülete 1 dm^2 . A hengerben levő gázt sűrűdásmentes dugattyú zárja be, a henger héliummal töltött hossza $22,4 \text{ dm} = 2,24 \text{ méter}$, tehát a hélium térfogata $V_a = 22,4 \text{ liter}$ (1. ábra).

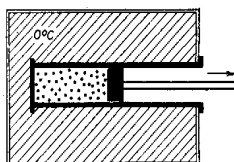


1. ábra

Legyen a hőmérséklet $T_1 = 0^\circ \text{C} = 273^\circ \text{K}$, tehát a gáz nyomása $p_a = 1 \text{ atmoszféra}$ (közelítően 1 kp/cm^2). A dugattyún kívül légüres tér van, tehát a dugattyút egy erős rugóval, 100 kp erővel kell tartani ebben a helyzetében. Belülről azért nyomja a gáz a dugattyút, mert nagy sebességgel repülő molekulái beleütköznek.

Most hajtunk végre a 4 gramm héliummal egy izotermális folyamatot. Ez azt jelenti, hogy nyomását, térfogatát megváltoztatjuk, de úgy, hogy hőmérséklete közben állandó maradjon. Egy kissé lazítunk a rugón és a dugattyú elindul kifelé. Eközben a nyomás csökken, a térfogat nagyobbodik. De ha tényleg elvégezzük a kísérletet, akkor azt tapasztaljuk, hogy a hőmérséklet nem marad állandó, mert a dugattyút lökő molekulák átlagsebessége és ezzel a gáz hőmérséklete csökken. A molekulák a kifelé menő dugattyúról kisebb sebességgel pattannak vissza, mint amekkorával neki ütdtek, és mozgási energiájuk csökkenése egyenlő a kifelé haladó dugattyú által végzett munkával.

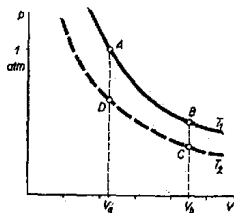
Azonban az a szándékunk, hogy a változás izotermális legyen, a hőmérséklet maradjon állandó (2. ábra).



2. ábra

A hengert egy óriási méretű, 0°C hőmérsékletű tengervízzel telt tartályba dugjuk be. Hengerünk fala vörösrézéből készült. Ennek az anyagnak az a tulajdonsága, hogy két oldalán a molekulák mozgási energiája csak egyenlő lehet (jó „hővezető”). Tehát amint a dugattyú kifelé halad, a falon át molekulái mozgási energiát kapnak a hőtartály anyagából, átlagos sebességük, a hélium hőmérséklete állandó marad és megvalósítottuk az izotermális folyamatot. Ha szigorúan vesszük, a hőtartálynak kissé le kell hűlnie, de mi ettől eltekinthetünk.

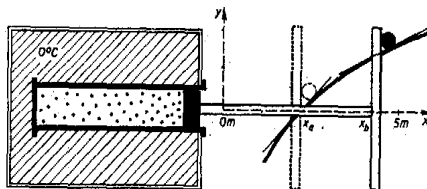
Szóval izotermális változásunk alkalmával az állandó hőmérsékletű héliumgáz kiterjed, például $V_a = 22,4 \text{ liter}$ ről $V_b = 44,8 \text{ liter}$ re. Eközben munkát végez. Ezt a munkát szeretnénk kiszámítani. Nem is olyan könnyű feladat, hiszen kiterjedés közben csökken a nyomás, a térfogattal fordítva arányosan, és érvényes a $p_a V_a = p_b V_b = RT_1$ gáztörvény. Ezt az összefüggést a $V - p$ koordináta-rendszerben hiperbola tünteti fel (a 3. ábra vastag vonala).



3. ábra

De nemcsak kiszámítani, hanem hasznosítani is szeretnénk ezt a munkát, mégpedig úgy, hogy sűrűdásmentes dugattyúnk lassan mozogjon, különben útjának végén odacsapódik a megállító akadályhoz és energiájának egy része kárba vész.

Az izotermálisan kiterjedő gázzal következőképp végeztetünk munkát (4. ábra).



4. ábra

Miközben a henger a $T_1 = 0\text{ °C} = 273\text{ °K}$ hőmérsékletű tartályban van, a dugattyúról kinyúló rúd függőleges, gereblyeszerű végződésével egy súlyt tol fel egy görbe lejtőn. Ha egy súly feltolása a lejtő alapjával párhuzamos erővel történik, akkor a súlyt és a lejtő hajlásszögének tangensét összeszorozva megkapjuk a tolóerőt. A mi lejtőnk görbéjének függvénye:

$$y = 2,24 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{x}{2,24}.$$

Rajzunk szerint x és y méterben számítandó. Ez a görbe, a természetes logaritmusfüggvény olyan, hogy meredeksége, érintőjének iránytangense fordítva arányos az x koordinátával. A lejtőre 100 kp súlyú hengert teszünk; ezt kell a gáz kiterjedésekor a dugattyúnak a gereblyével a lejtőn feltolnia. A gáz nyomása a térfogattal fordítva arányos, de lejtőnk meredeksége is, ezért a súly feltolása lassan, szinte egyensúlyi állapotokon keresztül mehet végbe. Kezdetben a dugattyú $22,4\text{ dm} = 2,24\text{ m}$ távolságra van a henger fenekétől, a gereblye a 100 kp súlyú hengert a görbe $x_a = 2,24\text{ m}$, $y_a = 0\text{ m}$ koordinátájú pontján tartja, ahol az iránytangens $\operatorname{tg} 45^\circ = 1$. Ezért az 1 dm^2 -es dugattyú által az 1 atmoszféránál kifejtett összes tolóerővel a 100 kp-os súly éppen egyensúlyt tart. Amikor a hélium $4,48$ literre tágult ki, $x_b = 4,48\text{ m}$, $y_b = 2,24 \cdot 2,3 \cdot \lg 4,48/2,24 = 1,53$ méter. Itt a lejtő iránytangense már csak $0,5$, és a 100 kp-os súlyt a gereblye 50 kp-dal tudja tolni megfelelően annak, hogy a nyomás $0,5$ atmoszférára csökkent.

Gázunk izotermális kiterjedése közben a 100 kp-os súlyt $1,53$ méter magasra emelte fel, tehát a munkavégzés $100\text{ kp} \cdot 1,53\text{ m} = 153\text{ mkp}$. Vagyis sikerült a munkát változó erő mellett is pontosan kiszámítani. De egy fontos dolgot ne feledjünk el. A 153 mkp munkát nem a 4 gramm héliumgáz végezte el. Ennek molekulái a kiterjedés befejeztével is ugyanakkora mozgási energiával röpdösnék, mint kiterjedés előtt. Az ideális gázként viselkedő héliumban levő összes energia csak a hőmérséklettől függ, nem pedig a térfogatától, nyomásától. A 153 mkp munkavégzés a tartályból ered, annak az energiáját hasznosítottuk, a héliumgáz csak átvitte az energiát. Azt a mozgási energiát, amit a hélium átadott a dugattyúnak, a vörösrézfallal át azonnal pótolta a tartályból.

Az izotermális kiterjedés munkavégzését képletben is felírhatjuk, x_b és x_a távolságok aránya ugyanaz, mint V_b és V_a térfogatoké. A logaritmus előtt álló szorzó a Kelvin-fokban adott hőmérséklettel arányos, ezért az a munka, amelyet mkp-ban kapunk, ha 1 mól gáz T Kelvin-fokon V_a térfogatról izotermálisan terjed ki V_b térfogatra:

$$W = 2,24 \cdot \frac{T}{273} \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{V_b}{V_a}.$$

(A $2,3$ -del megszorozott 10 -es alapú logaritmus az ún. természetes logaritmus.) Mivel a pV szorzat munka jellegű, a kiterjedéskor végzett munkát a 3. ábrán a görbe alatti terület adja meg.

Izotermálisan kiterjedő gázunk a nagy tartályból kiszívott energiából végez általunk hasznosítható munkát és így úgynevezett hőerőgép. De a héliumgáz egyszeri kiterjedésével nem vagyunk megelégedve, hiszen ezzel a munkavégzés befejeződött, úgy, mint amikor egy vízi erőmű tartályában levő víz lefolyt a turbinán át. Az volna a jó, ha a munkavégzést meg lehetne ismételni ugyanazzal a héliumgázzal és berendezéssel, ahányszor csak akarjuk. A vízierőműnél ez úgy volna lehetséges, ha a vizet újra felhordanánk. De ehhez pontosan ugyanaz a munkavégzés kellene, amit előbb nyertünk. Héliumgázunknál is megtehetnénk azt, hogy a dugattyút visszanyomjuk V_b -ről V_a térfogatra, de ehhez 153 mkp munkát kellene végeznünk, amely energia a dugattyú visszatértével visszakerülne a tartályba. Így nincs értelme a dolognak.

De tehetjük a következőt. Először kiterjesztjük a héliumot $V_a = 22,4$ literről $V_b = 44,8$ literre és kapunk 153 mkp munkát, a 100 kp felkerült a görbe lejtőn $1,53$ méter magasra. Ezután a hengerről lehúzzuk a $T_1 = 0\text{ °C} = 273\text{ °K}$ hőmérsékletű tartályt és rátolunk egy másik hőtartályt, amelynek hőmérséklete $T_2 = -91\text{ °C} = 182\text{ °K}$. A hirtelen lehűlt héliumgáz nyomása $1/2$ atmoszféráról $1/3$ atmoszférára esik a $273/182$ aránynak megfelelően. Az $1,53$ méter magasra emelt 100 kp -os vashengerből fenn hagyunk 33 kp -ot, így a megmaradt 67 kp -os súly a $0,5$ -os iránytangensű lejtőn ugyanazzal a 33 kp -dal nyomja a gereblyét, amellyel a gáz nyomja $0,33$ atmoszférával az 1 dm^2 -es dugattyút. A 3. ábrán C pont mutatja ezt az állapotot. Most engedjük, hogy a súly összenyomja a gázt $V_a = 22,4$ literre, $2/3$ atmoszféra nyomásra. Ekkor mi végzünk munkát, mégpedig $67\text{ kp} \cdot 1,53\text{ m} = 102\text{ mkp}$ -ot, amelyet a héliumgáz azonnal átad a hidegebb tartálynak. A 3. ábra D pontjába jutottunk. Utolsó lépésünk, hogy a hengerről lehúzzuk a hidegebb tartályt és újra rá dugjuk a 0 °C hőmérsékletűt. Ekkor a hélium hőmérséklete $T_1 = 0\text{ °C} = 273\text{ °K}$ -re, nyomása 1 atmoszférára emelkedik (ezeket az adatokat a 3. ábra A pontjában találjuk meg). Az áttevések (BC , DA) folyamán beálló energiaváltozások kiegyenlítik egymást, mert a gáz energiája csak a hőmérséklettől függ.

Összegezzük a történeteket. A 4 gramm, héliumgáz pontosan eredeti állapotába került vissza, számára a kísérlet körfolyamat volt. Mi kaptunk 51 mkp munkát, mert 33 kp fent maradt $1,53$ méter magasan ($33\text{ kp} \cdot 1,53\text{ m} = 51\text{ mkp}$). Ennek a munkavégzésnek az eredete: a meleg hélium kihozott a meleg tartályból 153 mkp energiát, ebből azonban csak 102 mkp -ot adott vissza a hidegebb tartálynak és $153 - 102 = 51\text{ mkp}$ a mienk maradt. Kísérletünk folyamán a két tartályban változott az energiakészlet nagysága, számukra a kísérlet nem volt körfolyamat. A munkanyerés azért volt lehetséges, mert a hideg gázt alacsonyabb hőfoka és kisebb nyomása folytán kevesebb munkával sikerült eredeti térfogatára visszanyomni, mint amennyi munkát melegen kiterjedve kiadott. Mintha a vízierőmű lecsurgott vizét egy olyan helyen vinnénk vissza, ahol g kisebb. A kapott 51 mkp a melegebb hőtartályból eredt. Hatásfoknak nevezzük a hasznosított energia arányát a meleg tartályból kivett energiához viszonyítva: $51 : 153 = 1/3$. Azonnal látjuk, hogy a

hatásfok kiszámítható az abszolút hőmérsékletekkel:

$$\begin{aligned}\text{hatásfok} &= \frac{2,24 \cdot \frac{T_1}{273} \cdot 2,3 \cdot \lg V_b/V_a - 2,24 \cdot \frac{T_2}{273} \cdot 2,3 \cdot \lg V_b/V_a}{2,24 \cdot \frac{T_1}{273} \cdot 2,3 \cdot \lg V_b/V_a} = \\ &= \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.\end{aligned}$$

Ez a hatásfok-meghatározás onnan ered, hogy a meleg tartály energiája tüzelőanyag elégetéséből ered és számunkra csak a végzett munka hasznosítható.

Befejezésül meg kell mondani, hogy ez a hatásfok az elképzelhető legjobb érték. Ha sűrűdés van vagy a dugattyú pályája végén nekiütközik egy akadálnak stb., a hatásfok még rosszabb lesz. A valóságban a körfolyamatot sokszor megismételve a két tartály hőmérséklete mindig közelebb kerül egymáshoz, és a munkavégzés idővel lehetetlenné válik. Ezeknek az egyszerű dolgoknak alapos megértése teszi lehetővé a főtételek, az entrópia fogalmának megismerését.