

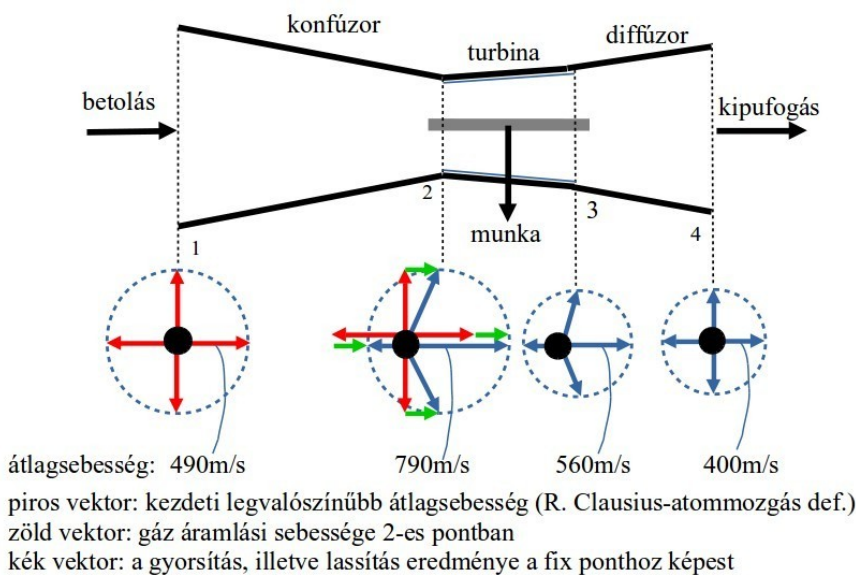
ENERGIA ÁTALAKÍTÓ

Dr. Magai István, www.magai.eu
(2017)

Az **Energia átalakító** nyitott és szabályozott körfolyamatot valósít meg, amely során a környezeti levegő molekulák kinetikus energiáját - **más külső energia forrás nélkül** - alakítjuk hasznosítható mechanikai munkává. A vázlat az 1. ábrán látható. A környezetben lévő levegő molekulák kinetikus energiája az ütközések révén a konfuzorban (szűkülő áramcső) gyorsítva mozgatja a molekulákat, mivel ott „ütközéshiányos” körülményeket (nyomáskülönbség) biztosítunk. Indításkor külső hajtással hozzuk létre a nyomáskülönbséget, majd az üzemi állapotot elérve azt a folyamat maga tartja fenn. A felgyorsult gázmolekulák a turbinában munkát végeznek az elmozduló lapátokon, miközben lassulva csökken a mozgási energiájuk. A turbina megfelelő kialakításával érjük el, hogy a kiömlés torlónyomása meghaladja a beömlés torlónyomását.

A belépő molekulák mozgási energiájának, valamint a távozó molekulák csökkent mozgási energiájának különbsége adja a turbina tengelyén kivett mechanikai munkát.

Az 1. ábrán a v sugarú sebességgömböt síkban, körként ábrázoljuk. Betolásnál (1-es pont) a 273 K hőmérsékletű levegő molekulái átlagos sebessége 490 m/s. A lehűlt levegő molekulái a 4-es pontban 400 m/s átlagsebességgel végeznek hőmozgást. A „betolás” a környezet által, végzett térfogati munkát jelenti. Kipufogási térfogati munkát a berendezés végez a környezet felé csökkent



hőmérséklet és térfogatáram mellett. A 2-es és 3-as pontban a sebesség vektor kör közepéhez képest el van tolódva a molekula (fekete korong) az áramlás irányával ellentétesen, az áramlási sebesség (zöld nyíl) nagyságával. (A molekulák térbeli kiterjedését, perdületét elhanyagoljuk. A torló- és az össznyomáson ugyanazt a mennyiséget értjük.)

1. ábra

Számos publikáció szerint a hangsebességnél lassabban áramló gáz entrópia csökkenését (hűtését) statikus- és össznyomás növekedés kíséri, ezért az energia átalakítónk esetében létrejövő entrópia csökkenés hatására is várható a torlónyomás növekedése.^{1 2} A turbinából kilépő, csökkent entrópiájú gáz nagyobb torlónyomással rendelkezik, mint a belépő, ezért **a körfolyamat megvalósíthatósága logikailag bizonyítottnak tekinthető**. Az alábbi példával igazoljuk, hogy a turbinával csökkentett

1 P. Balachandran (2010) Gas Dynamics for Engineers, 144p. Table 4.1

2 J. M. Powers (2005) Lecture Notes On Gas Dynamics, University Of Notre Dame 116p.

entrópia hatása legalább olyan kedvező a nyomásnövelés szempontjából, mint az ismert hőcserés hőelvonás.

Részletes leírás:

Hőszigetelt, veszteségmentes, hangsebesség alatti áramlást feltételezve a fúvókából / konfúzorból történő kiáramlás v_2 sebessége a Bernoulli-egyenlet alapján a p_1 belépő össznyomás, p_{s2} statikus nyomás és T_1 összhőmérséklet esetén:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_{s2}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (1.1)$$

ahol v_1 = belépő sebesség tart a nullához, ezért elhanyagoljuk, $\gamma = C_p/C_v = 1,4$ adiabatikus kitevő, $R = C_p - C_v = 287 \text{ (J/kgK)}$ gázállandó és T_1 = belépő összhőmérséklet (K).

A fúvókából kilépő levegő statikus hőmérséklete: T_{s2}

$$T_{s2} = T_1 \left(\frac{p_{s2}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.2)$$

A fúvókát követő akciós kivitelű, célszerűen 50%-os hatásfokú turbinával a levegősugar mozgási energiájának felét munkává alakítva kivezetjük a tengelyen. A munkavégzés feltétele az, hogy az erőhatás irányában történjen elmozdulás, ezért azok a molekulák adnak át energiát (impulzust) a lapátnak, amelyek a mozgás (forgás) irányában ütköznek. Ebből következik, hogy a molekulák lassítása a lapát mozgásának irányában történik.

A turbinából kilépő levegő v_3 sebessége az 50 %-osra választott kinetikus energia hasznosításból adódik:

$$v_3 = v_2 / \sqrt{2} \quad (1.3)$$

Az áramló közegből, a turbinával kivett energia a gáz entrópiáját csökkentette, ezért a molekulák átlagos hőmozgási sebessége, ezzel mozgási energiája csökkent. Ezt mutatja az 1. ábrán a sebességvektorok végpontját szemléltető szaggatott vonalú körök sugarának csökkenése. Ezzel együtt **a lassult molekulák kisebb távolságra követik egymást a turbinából kilépve, ezért azok kisebb energiájú, de egységnyi felületre számolva több ütközéssel hozzák létre a statikus nyomást. A molekulák távolságának csökkenése miatt az adott sebességgel gyakrabban történik ütközés, amely szintén nyomásnövelő hatású.**

A molekulák kisebb térbe kényszerítéséhez nincs szükség külső kompressziós munkára, vagy hűtésre, mert azt a környezet felé (turbina lapáton) történt munkavégzés eredményezi. Más szavakkal: A hőmozgásból adódó ütközések átlagos intenzitásának csökkenése miatt a környezetből érkező impulzusok hatására a molekulák „összeszorulnak, összehűlnek” egy kisebb térrészbe.

A hőcserélővel szemben a turbinában nem a hűtés / hideg felület, hanem a kitüntetett irányú lapátmozgás fékezi a molekulákat – a lapát hőmérsékletétől jellemzően függetlenül. A gáz entrópiájának csökkentéséhez nincs szükség „hidegebb” felületre, mert egy, a gáznál melegebb turbina lapát is képes energiát kivenni az áramló gázból, ezért az energia átalakító erőgépünk nem tekinthető hőerőgépnak.

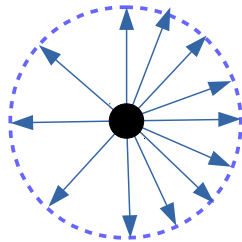
Az energia átalakító: erőgép, amely a környezet felé létrehozott beáramlási és kiáramlási munkák és energia állapotok közötti különbségből mechanikai munka előállítására alkalmas.

Minél több munkát veszünk le a turbina tengelyén, annál hidegebb lesz a diffúzorból kiáramló gáz / levegő. A k_B Boltzmann-állandó alapján felírt: $pV = N k_B T$ egyenlettel értelmezzük a kapcsolatot a makroszkopikus és a molekuláris szintű folyamatok között, ahol a nyomás és a térfogat szorzata

egyenlő a Boltzmann-állandó és az abszolút hőmérséklet szorzatával az N db gázmolekulára. A levegő / gáz összhőmérsékleteinek meghatározása a 2 - 5 ábrák alapján történik.

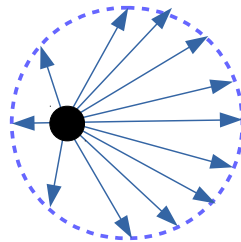
Az 500 m/s átlagos molekula sebesség a 293 K ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) hőmérsékletű, 1 baros levegőre jellemző:

áramlás: $v = 0$ áramlás: $v = 325 \text{ m/s}$ áramlás: $v = 230 \text{ m/s}$ áramlás: $v = 0$
 hőmozgás: $v = 500 \text{ m/s}$ hőmozgás: $v = 500 \text{ m/s}$ hőmozgás: $v = 453 \text{ m/s}$ hőmozgás: $v = 453 \text{ m/s}$



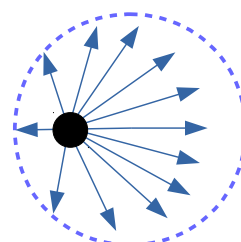
2. ábra

Kiindulási 1-es pont



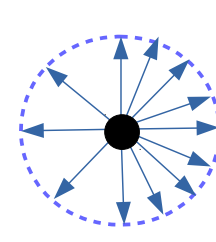
3. ábra

Turbina belépő 2-es pont



4. ábra

Turbina kilépő 3-as pont



5. ábra

Kiáramlott 4-es pont

A 2. ábrán az 1-es pontban belépő, elhanyagolható áramlási sebességű, 500 m/s átlagos hőmozgási sebességű, átlagos levegőmolekula látható. A nyilak a sebességvektorokat szemléltetik véletlenszerű eloszlásban. A 3. ábrán a 2-es ponton a turbinába lépő molekula látható, amely előre maximum $500+325=825 \text{ m/s}$ sebességgel, hátra $500-325=175 \text{ m/s}$ sebességgel végez mozgást a fix megfigyelő ponthoz képest. A 4. ábrán a turbinából kilépő levegőmolekula látható. Az átlagos molekula hátrafelé változatlanul (turbina nem hat rá) 175 m/s sebességgel, előre $825-(325-230)=730 \text{ m/s}$ sebességgel mozog legfeljebb. A nyilak végei egy új vektor-kört jelölnek ki $(730+175)/2=453 \text{ m/s}$ sugárral. Az 5. ábra a lelassult átlagos molekulát ábrázolja, amely 453 m/s átlagos sebességgel végez hőmozgást. A lassítás, vagyis a mozgási energia csökkenés a turbinalapát elmozdulása irányú, de a hatása idővel kiterjed térben a környező molekulákra, ahol az egyenetlenség - elegendő számú ütközés után - térben kiegyenlítődik.

Mivel molekuláris szinten igaz, hogy $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$, ahol m a molekula tömege, v az átlagsebessége, k_B a Boltzmann állandó és T az abszolút hőmérséklet, ezért kimondhatjuk, hogy a (kinetikus) hőmérséklet arányos a molekulák átlagos mozgási energiájával, vagyis a sebességük négyzetével. Bevezetjük a $\beta = v_3^2 / v_2^2$ mozgási energia arányt, amely példánkban $453^2 / 500^2 = 0,82$.

A 2-4 ábrákon láttuk, hogy a sebesség vektorok átlagos hossza, és ezzel a síkban ábrázolt vektor körök sugara $453/500$ arányban csökkent. Ismert, hogy az adott statikus hőmérsékleten és nyomáson a molekulák átlagos ütközési távolsága az alábbi összefüggéssel számolható.^{3 4 5} Az ütközések nélkül megtett l közepes szabad úthossz:

$$l = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \cdot 4 p \sigma} = \frac{\lambda(T)}{p} \quad (1.4)$$

ahol p a jellemző statikus nyomás, T a statikus hőmérséklet σ a molekulák keresztmetszete és $\lambda(T)$ a hőmérséklettől függő anyagi jellemző, amely a hőmérséklet csökkenésével arányosan csökken. A fenti két szakirodalom összefüggései alapján $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű levegőben a közepes szabad úthossz közelítően $6,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$, illetve $6 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ 100 kPa nyomáson. A molekulák 63 %-a ezen a távolságon belül, 36 %-a ezen távolság ötszörösén belül ütközik. A két eredmény eltérése valószínűleg a statisztikai számítási módszerek különbözőségéből származik. Számunkra ez nem

3 Mean Free Path, Molecular Collisions, Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. Retrieved 2011-11-08.

4 Bohátka S. és Langer G. (2012) Vákuumtechnika, atomki.hu A-M1 1-2-3..pdf 15.p

5 Dr.Nagy K. (1990/2011) Termodinamika és statisztikus mechanika, Tankönyvkiadó, www.tankonyvtar.hu, ch02s03 és ch02s06

lényeges, mivel csak a változók függőségét és nem a függvény értékeit használjuk fel. Az (1.4) összefüggésből kapjuk, hogy a közepes szabad úthossz változása egyenesen arányos a hőmérséklet változással. Ez a változás a molekulák mozgási energiája változásának függvénye, amire korábban bevezettük a $\beta = v_3^2 / v_2^2$ mozgási energia arányt. Mivel a közepes szabad úthossz csökkenési aránya egyenlő a hőmérséklet csökkenése arányával, amely pedig egyenlő a β -val, ezért a térfogat változása arányos a β^3 értékkel. A sűrűség változása fordítottan arányos a térfogat változással:

$$\frac{\rho_3}{\rho_2} = \beta^{-3} = 1,814 \quad (1.5)$$

Látható, hogy a turbinában áramló levegő sűrűsége növekedett a hőmérséklet csökkenése, vagyis az entrópia csökkenése következtében.

Mivel a molekulák ütközési távolsága (szabad útja) $T_3/T_2 = v_3^2 / v_2^2 = \beta$ arányban csökkent, ezért β^{-2} szorosára nőtt a nyomott felületnek / falnak ütköző, és a statikus nyomást létrehozó molekulák sűrűsége és $\beta^{-1/2}$ -szer gyakrabban ütköznek a molekulák (az adott falnak) az adott sebességen a csökkent „l” szabad ütközési távolság miatt. Ezen hatások eredője a statikus nyomás növekedését okozza. A sebesség változásától függő hatásokat összeszorozva a p_{s2} statikus nyomással kapjuk a p_{s3} nyomást:

$$p_{s3} = \beta \beta^{-2} \beta^{-1/2} p_{s2} = \beta^{-3/2} p_{s2} = 1,345 p_{s2} \quad (1.6)$$

A T_{s3} statikus hőmérséklet kiszámítása a β arány alapján:

$$T_{s3} = T_{s2} \beta \quad (1.7)$$

A $T_4 = T_3$ összhőmérsékletek összefüggése alapján írhatjuk:

$$T_4 = T_{s3} \left(\frac{p_4}{p_{s3}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1.8)$$

A körfolyamat záródását az (1.1) egyenlettel ellenőrizhetjük. Behelyettesítve a p_4 környezeti nyomást, a p_{s3} statikus nyomást és a T_4 hőmérsékletet, megkapjuk azt a fúvóka sebességet, amely fordított áramlásnál létrejönne. Ha ez a v_{3x} sebesség egyenlő, vagy kisebb mint az (1.1) és (1.2) összefüggésekkel kapott v_3 , akkor a maradék dinamikus nyomás elegendő a körfolyamat zárásához:

$$v_{3x} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_4 \left[1 - \left(\frac{p_{s3}}{p_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (1.9)$$

Másrészt, ha a v_3 sebesség mellett a p_4 torlónyomás / össznyomás értéke meghaladja a p_1 nyomást, akkor a körfolyamatban gyorsul az áramlás mindaddig, amíg a 2-es pontban a levegő sebessége el nem éri a lokális hangsebességet. A folyamat csak akkor tartható fenn, ha a turbinát fékezzük.

Összefoglalva: a környezet felé megvalósuló energiaátadó folyamatok: beömlés, kiömlés és mechanikai munka kivét. Az energia megmaradási elv alapján az energia mérlegben a **bemenő oldalon** a környezeti, adott hőmérsékletű levegő feltöltési munkája, valamint a lehűlés miatt a levegőből „kivett hőenergia” ($q = C_p \cdot \Delta T$) összege szerepel. A **mérleg másik, kimenő oldalán** a kitolási / kipufogási térfogati munka, valamint a turbinán kivett munka összege szerepel.

Az idő, és $\beta(v,t)$ függvényei, csak a molekuláris szintű kinetika eszközeivel kezelhetők, ezért térünk el a szokásos entalpia-alapú termodinamikai eljárásoktól, módszerektől: például a (statikus) nyomást is időfüggvénynek kell tekintenünk, mert a nagyságát több időfüggvény is befolyásolja.

A kitolás / kipufogás a 4-es pontban az (1.1) egyenlettel számolható. A körfolyamat bezárásának feltétele, hogy a turbinából kiáramló levegő/gáz torló nyomása p_4 érje el, vagy haladja meg a környezeti p_1 nyomást. A diffúzorban a torló nyomás nem változik: $p_4 = p_3$.

Reális gázok és körülmények (rés- és hőveszteség, sűrűdés) esetén a turbinán kivett munka maximum 50 %-át fel kell használni a körfolyamat fenntartására.

A berendezést zárt térbe helyezve 1 bartól eltérő, célszerűen 10-50 bar statikus nyomással is lehet működtetni. A nagyobb gázsűrűség növeli az adott méret névleges teljesítményét. Ebben az esetben a tartályba zárt sűrített gáz hőveszteségének pótlásáról folyamatosan gondoskodni kell hőcserélő, vagy más hevítés útján. Hőenergia pótlása nélkül a gáz kondenzációja következhet be.

Szám példa az Energia átalakító működésére:

Munkaközeg: $T_1 = 293 \text{ K}$ (20°C) hőmérsékletű, 1 bar nyomású száraz, ideális levegő ($\gamma = 1,4$).

Hőszigetelt, veszteségmentes folyamatokat alkalmazva az (1.1) egyenlet szerint:

$$v_2 = \sqrt{0 + \frac{2,8}{1,4-1} \cdot 287 \cdot 293 \left[1 - \left(\frac{0,5}{1,0} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 325 \text{ m/s}$$

A turbina beömlő statikus hőmérséklete a 2-es ponton az (1.2) egyenlet szerint:

$$T_{s2} = 293 \left(\frac{0,5}{1,0} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 240 \text{ K} (-33^\circ\text{C})$$

A turbinából kilépő gáz sugar sebessége a 3-as ponton az (1.3) egyenlet szerint:

$$v_3 = 325 / \sqrt{2} = 230 \text{ m/s}$$

A p_{s3} statikus nyomás a 3-as pontban az (1.6) egyenlet szerint:

$$P_{s3} = \beta^{-3/2} p_{s2} = 1,347 \cdot 0,5 = 0,675 \text{ bar}$$

A T_{s3} statikus hőmérséklet kiszámítása az (1.7) egyenlet alapján:

$$T_{s3} = \beta T_{s2} = 0,82 \cdot 240 = 197 \text{ K} (-76^\circ\text{C})$$

A diffúzorból 1 bar környezeti nyomásra kilépő levegő hőmérséklete a 4-es ponton az (1.8) egyenlet szerint:

$$T_4 = 197 \left(\frac{1,0}{0,675} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 220 \text{ K} (-53^\circ\text{C})$$

A fúvókában történő gyorsulás – ideális esetben - reverzibilis átalakulás, ezért a lassulásra is alkalmazzuk az (1.1) összefüggést megfelelő behelyettesítésekkel.

A v_{3x} ellenőrző sebesség (1.9) egyenlet szerint:

$$\sqrt{\frac{2,8}{1,4-1} \cdot 287 \cdot 220 \left[1 - \left(\frac{0,675}{1,0} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 217$$

Ez azt jelenti, hogy 217 m/s ellenőrző sebesség éppen elég a kiömléshez. Az (1.1) és (1.2) szerint számított 230 m/s nagyobb, ezért a gázáram torló nyomása meghaladja a szükségést.

Ellenőrző nyomás számítása:

A számolt $v_3 = 230 \text{ m/s}$ sebességgel 0,05 bar dinamikus nyomástöbblet áll rendelkezésre.

Ez a dinamikus nyomás többlet $p_4 = 1,05 \text{ bar}$ torló nyomást eredményez, amely elegendő a kipufogáshoz a $p_1 = 1,0 \text{ bar}$ nyomású környezeti térbe.

A turbinából kilépő levegő torló nyomása elegendő, hogy a körfolyamat záródjon.

Ajánlott alkalmazások:

- 50%-os hatékonyságot feltételezve egy 41 mm átmérőjű turbina 107300 1/min fordulat mellett $362 \text{ m}^3 / \text{h}$ légszállításnál 4 kW teljesítményű (villamos) hajtást tud szolgáltatni száraz környezeti levegő esetén, miközben 2,4 kW hőteljesítmény mellett $35 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal hűti le a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű környezeti levegőt.
- Fenti berendezés kombinált turbina-fúvó egységgel 4 kW légsűrítést végez úgy, hogy a sűrített levegő hőmérséklete több, mint $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal alacsonyabb a környezeti hőmérsékletnél.
- Fenti berendezés 2 kW teljesítményt ad le 50% -os hatásfokú hideg-sugárhajtóműként.

