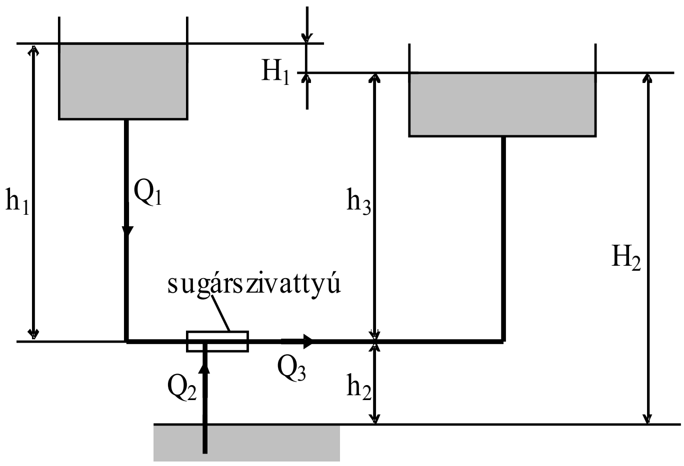
Sugárszivattyú

A sugárszivattyúk működési elve egy nagy energiájú – primer – folyadéksugár és egy kis energiájú – szekunder folyadéksugár impulzuscseréje az ún. keverőtérben. A primer és szekunderközeg lehet azonos, vagy eltérő, összenyomható, vagy összenyomhatatlan.
Az alábbiakban csak azonos sűrűségű, összenyomhatatlan folyadékokkal (cseppfolyós közeg, vagy gáz kis nyomásváltozás mellett) dolgozó sugárszivattyúkról lesz szó.

A primer folyadéksugár energiáját általában szivattyúval, kompresszorral hozzák létre. A szekunder folyadéksugár általában egy tartályból jut be a sugárszivattyúba csővezetéken keresztül. A kevert folyadéksugár általában egy tartályba jut szintén csővezetéken át. A szivattyú energetikailag helyettesíthető egy tartállyal, amiben a folyadékszint elegendően magas és amit cső köt össze a sugárszivattyúval.
Ennek megfelelően tekintsük az energetikai vizsgálat céljára szerkesztett alábbi ábra elrendezését és jelöléseit:



A sugárszivattyú **hatásfok**a a hasznos és a bevezetett hidraulikai teljesítmény hányadosa.

$$\eta = \frac{P_h}{P_{be}}. \qquad (1)$$

Az ábra jelöléseivel a hasznos hidraulikai teljesítmény a Q_2 térfogatáramú primer folyadék energianövelése:

$$P_h = Q_2 \rho g H_2$$

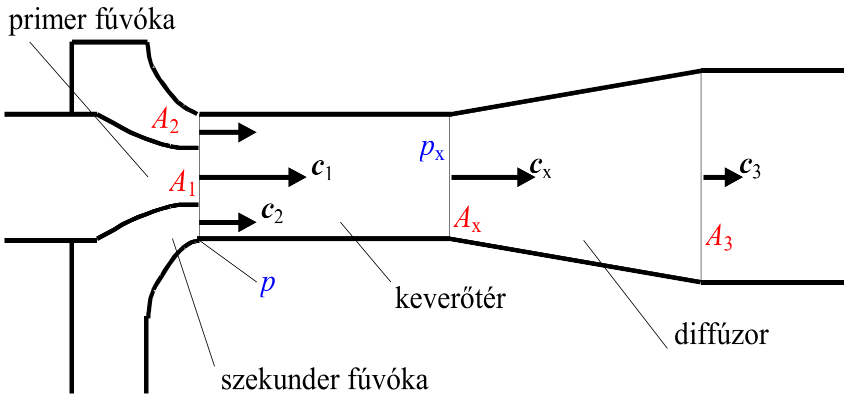
A bevezetett hidraulikai teljesítmény a Q_1 térfogatáramú szekunder folyadék energiacsökkenése:

$$P_{be} = Q_1 \rho g H_1$$

Tehát úgy tekintjük a sugárszivattyú működését, mint ami a primer és a szekunder folyadékot egymástól függetlenül alacsonyabb szintre leereszti, ill. magasabb szintre felemeli. A hatásfok – a g gravitációs gyorsulással és az azonos ρ sűrűséggel egyszerűsítve –

$$\eta = \frac{Q_2 H_2}{Q_1 H_1}. \qquad (2)$$

Az energetikai vizsgálat után rátérünk az áramlástechnikai leírásra. Ehhez tekintsük az alábbi ábrán megrajzolt sugárszivattyú metszetet



A következő feltételeket tesszük:

- a folyadékok sűrűsége azonos és állandó
- a sebesség egy-egy keresztmetszetben állandó
- a p nyomás a keverőtérbe való belépésnél állandó
- a keverőtér végén a primer és a szekunder sugár sebességkülönbsége kiegyenlítődött
- áramlási veszteség csak a csatlakozó csövekben és a diffúzorban keletkezik
- az áramlás stacionárius
- geometriai feltétel: $A_1 + A_2 = A_x$. (3)

A sugárszivattyú működését leíró egyenletek fentiek alapján a kontinuitási egyenlet, azaz a térfogatáram állandósága, veszteséges Bernoulli-egyenlet a szekunder sugár szívócsövére, a primersugár nyomócsövére, a közös – diffúzort is tartalmazó – szállítócsőre és impulzustétel a keverőtérre. Az egyenletek sorjában:

Kontinuitás:

$$Q_x = Q_1 + Q_2 = Q_3; \quad Q_x = A_x c_x; \quad Q_1 = A_1 c_1; \quad Q_2 = A_2 c_2; \quad Q_3 = A_3 c_3. \tag{4}$$

Veszteséges **Bernoulli-egyenlet** a primer sugár nyomócsövére:

$$p_0 + \rho g h_1 = p + \frac{\rho}{2} c_1^2 (1 + \zeta_1). \tag{5}$$

Veszteséges **Bernoulli-egyenlet** a szekunder sugár szívócsövére:

$$p_0 - \rho g h_2 = p + \frac{\rho}{2} c_2^2 (1 + \zeta_2). \tag{6}$$

Veszteséges **Bernoulli-egyenlet** a szállító csőre:

$$p_x + \frac{\rho}{2} c_x^2 = p_0 + \rho g h_3 + \frac{\rho}{2} c_3^2 (1 + \zeta_D + \zeta_3) = p_0 + \rho g h_3 + \frac{\rho}{2} c_3^2 \zeta_{szcs}, \tag{7}$$

ahol ζ_{szcs} jelöli a kilépési veszteség, diffúzor veszteség és a szállítócsőbeli áramlási veszteség együttes veszteségtényezőjét.
Impulzus tétel a keverőtérre:

$$\rho A_1 c_1^2 + \rho A_2 c_2^2 - \rho A_x c_x^2 = (p_x - p) A_x. \tag{8}$$

A fenti egyenletrendszer a korábban tett elhanyagolások mellett leírja a sugárszivattyú működését.

Vízsugárszivattyú tervezése

Ha célunk a tervezés, akkor első lépésként további elhanyagolást teszünk, az (5) – (7) egyenletekben az összes veszteségtényezőt zérussal tesszük egyenlővé, azaz súrlódásmentes állapotot tekintünk és a szállítócső végi kilépési veszteséget is elhanyagoljuk.
Ezt követően az (5) egyenletből vonjuk ki a (6) egyenletet és vegyük figyelembe (ld. az általános elrendezési vázlatot), hogy $h_1 + h_2$ éppen a $H_1 + H_2$ vízszintkülönbséggel azonos. Ekkor írhatjuk, hogy

$$h_1 + h_2 = H_1 + H_2 = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \,. \tag{9}$$

Most vonjuk ki a (6)-ból a (7) egyenletet, ugyancsak a vázlat szerint $h_3 + h_2 = H_2$. Ezzel

$$H_2 = \frac{c_x^2 - c_2^2}{2g} + \frac{p_x - p}{\rho g} \,.$$

A jobb oldal második tagja a (8) egyenletben is előfordul, onnan kifejezve és $\rho g A_x$ –szel osztva:

$$\frac{p_x - p}{\rho g} = \frac{1}{g}\left(\frac{A_1}{A_x} c_1^2 + \frac{A_2}{A_x} c_2^2 - c_x^2 \right),$$

amit az előző egyenletbe behelyettesítve azt kapjuk, hogy

$$H_2 = \frac{1}{2g}\left(c_x^2 - c_2^2 + 2\frac{A_1}{A_x} c_1^2 + 2\frac{A_2}{A_x} c_2^2 - 2c_x^2 \right). \tag{10}$$

Osszuk el a (9) egyenletet a (10) egyenlettel:

$$\frac{H_2}{H_1 + H_2} = \frac{-c_x^2 - c_2^2 + 2\frac{A_1}{A_x} c_1^2 + 2\frac{A_2}{A_x} c_2^2}{c_1^2 - c_2^2} \,. \tag{11}$$

Ezek után vezessünk be két dimenzió nélküli jellemzőt, egy sebesség-viszonyt és egy keresztmetszet-viszonyt. A sebeség-viszony: $\gamma = \frac{c_2}{c_1}$. (12)

A keresztmetszet-viszony: $\alpha = \frac{A_1}{A_x}$. (13)

Így a tett geometriai megkötést is figyelembe véve:

$$\frac{A_2}{A_x} = \frac{A_x - A_1}{A_x} = 1 - \alpha, \quad \text{továbbá nyilván} \quad \frac{A_1}{A_2} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \,. \tag{14}$$

Hasonlóan, a kontinuitást figyelembe véve

$$\frac{c_x}{c_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{A_x c_1} = \frac{A_1 c_1}{A_x c_1} + \frac{A_2 c_2}{A_x c_1} = \alpha + (1 - \alpha)\gamma \,. \tag{15}$$

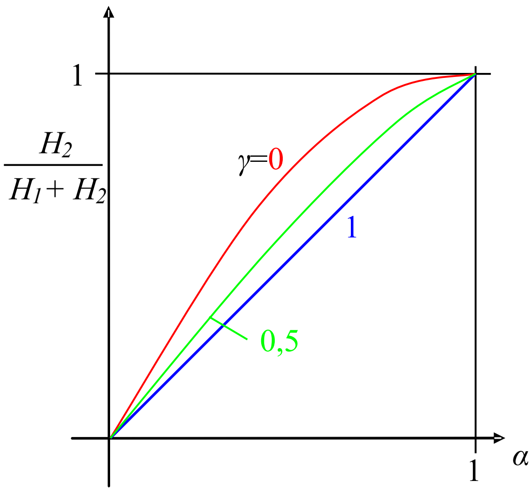
Ezek felhasználásával a (11) képlet átalakítható – a jobb oldalon a számlálót is a nevezőt is c_1^2-tel osztva:

$$\frac{H_2}{H_1+H_2}=\frac{-[\alpha+(1-\alpha)\gamma]^2-\gamma^2+2\alpha+2(1-\alpha)\gamma^2}{1-\gamma^2},$$

ami – némi számolás után – végül az alábbi alakban írható:

$$\frac{H_2}{H_1+H_2}=\frac{2\alpha-\alpha^2(1-\gamma)}{1+\gamma}. \qquad (16)$$

Ebből a képletből látszik, hogy milyen szűk a vízsugárszivattyú alkalmazási tartománya. A γ sebesség-viszony 0 és 1 között változhat. Ha $\gamma = 0$, akkor a szekunder sugár sebessége zérus, azaz nem szállít a vízsugárszivattyú. Ha $\gamma = 1$, akkor a szekunder sugár sebessége megegyezik a primer sugár sebességével, a két sugár között nem történik impulzuscsere, tehát nincs többé szó vízsugárszivattyúról. A (16) képlet bal oldalán álló kifejezés értéke is 0 és 1 között változhat, $H_2 = 0$ esetén a szekunder sugár hasznos hidraulikai teljesítménye és így a hatásfok zérus. Ha a bal oldal értéke 1, akkor $H_1 = 0$, azaz a bevezetett hidraulikai teljesítmény zérus, a bevezető ábra szerint a két magasan lévő tartály vízszintje azonos, ekkor mindkét tartály a sugárszivattyún keresztül ürülne. Ábrázoljuk a (16) képlet grafikonját az α változó függvényében különféle γ paraméterértékek mellett, legyen rendre $\gamma = 0$; 0,5 ; 1.



Valóban, könnyen belátható, hogy $\gamma = 0$ esetén $\frac{H_2}{H_1+H_2}=\begin{cases}2\alpha-\alpha^2, & \text{ha } \gamma=0\\ (4\alpha-\alpha^2)/3, & \text{ha } \gamma=0{,}5\\ \alpha, & \text{ha } \gamma=1\end{cases}.$

Az ábrából az is látszik, hogy milyen szűk a vízsugárszivattyú működési tartománya, egy adott fajlagos szállítómagasság igény esetén az α fajlagos keresztmetszet viszony viszonylag szűk tartományban változhat csak.

Vizsgáljuk meg befejezésül, hogy hogyan változik a (2) képlettel definiált hatásfok.

Helyettesítsük be a hatásfok képletébe az α és γ változókat.

$$\eta = \frac{Q_2 H_2}{Q_1 H_1} = \frac{A_2 c_2 \dfrac{H_2}{H_1 + H_2}}{A_1 c_1 \dfrac{H_1}{H_1 + H_2}} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \gamma \frac{\dfrac{2\alpha - \alpha^2 (1-\gamma)}{1+\gamma}}{1 - \dfrac{2\alpha - \alpha^2 (1-\gamma)}{1+\gamma}} = \gamma \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \frac{2\alpha - \alpha^2 (1-\gamma)}{1+\gamma - \left[2\alpha - \alpha^2 (1-\gamma)\right]},$$

némi átalakítás után a második törtből az első tört reciproka kiemelhető és azt kapjuk, hogy

$$\eta = \gamma \frac{2 \ - \alpha + \alpha\gamma}{1+\gamma - \alpha + \alpha\gamma}, \tag{17}$$

amiből behelyettesítés után azonnal látszik, hogy

$$\eta(\gamma = 0) = 0 \quad \text{és} \quad \eta(\gamma = 1) = 1. \tag{18}$$

A (17) képlet alapján belátható, hogy γ rögzített értéke esetén α növelésével a hatásfok nő, a változás azonban nagy γ értékeknél jelentéktelen, például γ = 0,7 sebességviszony esetén az ideális vízsugárszivattyú hatásfoka az α keresztmetszetviszony teljes tartományában nagyobb, mint η = 0,8.
Természetesen a csősúrlódási veszteség figyelembe vétele esetén a hatásfok erősen csökken.

Példa
0,2 bar abszolút nyomású térből légköri nyomású térbe 1 l/s vizet kell kiszivattyúzni vízsugárszivattyúval legalább 80 % hidraulikai hatásfok mellett. Meghatározandók a sugárszivattyú fő méretei.

A 0,2 bar abszolút nyomású tér h_2 = 8 m szívómagasságnak felel meg. A légköri nyomású (0 bar abszolút nyomású) tér h_3 = 0 m magasságnak felel meg. A bevezető ábra szerint tehát írhatjuk, hogy $H_2 = h_2 + h_3 = 8 + 0 = 8$ m.
Mint láttuk, γ = 0,7 esetén már bármilyen α-nál eléri a hatásfok a kívánt értéket.

A hatásfok definíciója szerint

$$Q_1 H_1 = \frac{Q_2 H_2}{\eta} = \frac{Q_2 H_2}{0{,}8} = \frac{0{,}001 \cdot 8}{0{,}8} = 0{,}01.$$

A kontinuitásból, valamint a (12) és (14) képletekből

$$Q_1 = A_1 c_1 = \frac{\alpha}{1-\alpha} A_2 \frac{c_2}{\gamma} = \frac{\alpha}{\gamma(1-\alpha)} Q_2 = \frac{0{,}001\alpha}{\gamma(1-\alpha)}.$$

Így $H_1 = \dfrac{0{,}01}{Q_1} = \dfrac{10\gamma(1-\alpha)}{\alpha}$. Ezzel számítható $H_1 + H_2$ és abból

$$\frac{H_2}{H_1+H_2}=\frac{8}{8+\frac{10\gamma(1-\alpha)}{\alpha}}=\frac{8\alpha}{8\alpha+10\gamma(1-\alpha)} \qquad (*)$$

A (16) képlet szerint pedig $\frac{H_2}{H_1+H_2}=\frac{2\alpha-\alpha^2(1-\gamma)}{1+\gamma}$.

Rajzoljuk be a fenti ábrába a (*) kifejezés grafikonját ugyancsak a γ = 0; 0,5; 1 paraméterértékekre. Míg az első és az utolsó görbe párnak nincs metszéspontja, addig például a γ = 0,5 értékű görbék metszik egymást és az α keresztmetszetviszony kiolvasható.

Megválasztva a sebesség és a keresztmetszetviszonyt, kiadódnak a fő méretek, majd az áramlási veszteségek számíthatók, azokból pedig a tényleges hatásfok becsülhető.