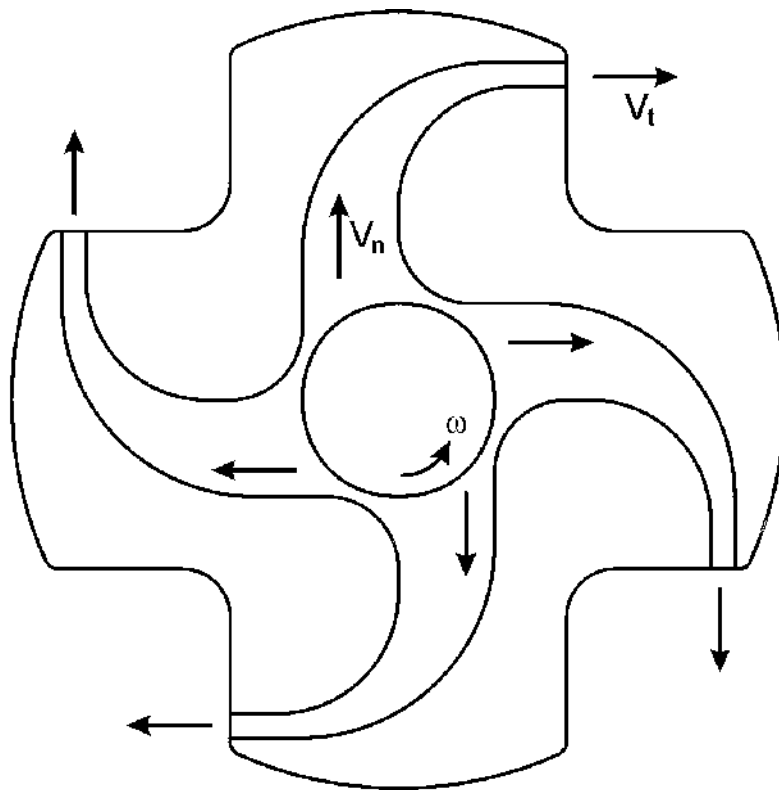


Odstředivý tryskový motor

(c) Ing. Ladislav Kopecký

Inspirací pro tuto konstrukci hydromotoru byl legendami opředený Clemův motor a práce Viktora Schaubergera. Od konstrukcí obou pánů se liší především svojí jednoduchostí a snadnou vyrobiteľností (samozřejmě za použití moderních technologií, jako je vypalování tvarů laserem). Hlavní část motoru tvoří rotor, který je zobrazen na obrázku dole. Otvorem uprostřed vtéká do rotoru pracovní médium, kterým je nějaká kapalina, např. voda nebo olej. Tato kapalina dále proudí do čtyř zužujících se kanálů. Během cesty k výstupním tryskám se směr kapaliny postupně otočí o 90 stupňů (řečeno exaktně pomocí fyzikálních pojmů: vektor rychlosti kapaliny se otočí...). Voda vytéká z trysek rychlostí v_t a reakční silou uvádí do pohybu rotor. Tolik stručně na úvod. Dále si připomeneme fyzikální jevy, které při činnosti tohoto motoru vstupují do hry.



Obr. 1. Rotor odstředivého motoru

Začneme rovnicí kontinuity. Zde platí rovnice

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = I_1 = I_2 \quad (1)$$

Rovnice (1) znamená, že po změně průřezu potrubí se průtok I nezmění. Změní se však rychlost proudění kapaliny. Tento jev zná každý, kdo alespoň jednou v životě kropil hadicí zahrádku. Nyní se podívejme, jak změna průřezu ovlivní kinetickou energii vody a výkon vodního proudu. Kinetická energie elementu objemu dV vody proudící potrubím o průřezu S je dána rovnicí

$$dW_k = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot dV \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dl \cdot v^2 \quad (2)$$

Jestliže rovnici (2) vydělíme elementem času dt, dostaneme vztah pro výkon vodního proudu:

$$dW_k/dt = P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dl/dt \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (3)$$

Z rovnice (1) vyplývá, že když například snížíme průřez potrubí na polovinu, zvýší se rychlost proudění kapaliny na dvjnásobek. Z rovnice (3) však plyne, že snížením průřezu potrubí na polovinu se výkon vodního proudu se zčtyřnásobí.

Pro úplnost vyjádříme vztah pro výkon vodního proudu ještě pomocí tlaku p a průtoku I. Podle Bernoulliho rovnice pro dynamický tlak platí vztah

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (4)$$

takže rovnici (3) můžeme přepsat do tvaru

$$P = p_d \cdot S \cdot v = p_d \cdot I \quad (5)$$

I pomocí vztahu (5) se můžeme přesvědčit, že snížením průřezu na polovinu se výkon vodního proudu zčtyřnásobí. Víme totiž, že průtok zůstane nezměněn, ale zdvojnásobí se rychlost v a podle (4) bude tlak čtyřnásobný.

Nyní naši pozornost zaměříme na reakční sílu proudu vody, který protéká zakřiveným potrubím (jako například v rotoru hydromotoru zobrazeném výše).

Uvažujme tedy obecné zakřivené potrubí, které nemusí mít stálý průřez. Na začátku zakřiveného úseku rychlost vody vyjádříme vektorem \mathbf{v}_1 , na jeho konci vektorem \mathbf{v}_2 .

Na začátku sledovaného úseku je hybnost elementu vody

$$\mathbf{p}_1 = dm \cdot \mathbf{v}_1 = \rho \cdot dV \cdot \mathbf{v}_1 = \rho \cdot S_1 \cdot dl \cdot \mathbf{v}_1 = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot dt \cdot \mathbf{v}_1 = \rho \cdot I \cdot dt \cdot \mathbf{v}_1$$

Analogicky na konci zakřivení bude mít stejně velký element vody hybnost $\mathbf{p}_2 = dm \cdot \mathbf{v}_2 = \rho \cdot I \cdot dt \cdot \mathbf{v}_2$.

Změna hybnosti bude

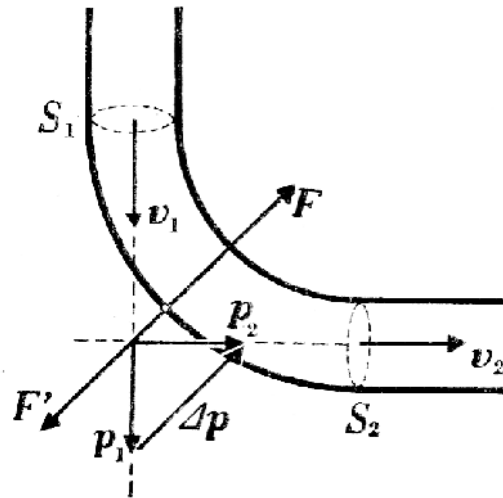
$$d\mathbf{p} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = \rho \cdot I \cdot dt \cdot (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \quad (6)$$

Podle druhého pohybového zákona je časová změna hybnosti co do velikosti i směru rovná vnější působící síle:

$$d\mathbf{p}/dt = \mathbf{F} = \rho \cdot I \cdot (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) \quad (7)$$

Výslednice vnějších sil působících v daném objemu na proudící tekutinu se rovná vektorovému rozdílu hybností tekutiny, která z tohoto objemu vystoupí a tekutiny, jež do tohoto objemu vstoupí, za jednotku času. Síla \mathbf{F} , kterou podle principu akce a reakce působí proudící tekutina v zakřivené trubici na stěny, je stejně velká, avšak opačného směru. Rychlosti \mathbf{v}_1 a \mathbf{v}_2 ve vztahu (7) jsou obecně vektory. My si všimneme dvou speciálních případů. Nejdříve budeme předpokládat, že průřez potrubí je konstantní a že vektory rychlosti svírají pravý úhel. V tomto případě budou absolutní velikosti obou vektorů rychlosti stejně velké a výsledná síla \mathbf{F} bude s oběma vektory svírat úhel o velikosti 45° a absolutní velikost výsledného vektoru rychlosti $(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)$, který má stejný směr jako vektor síly \mathbf{F} , bude $\sqrt{2}$ -krát

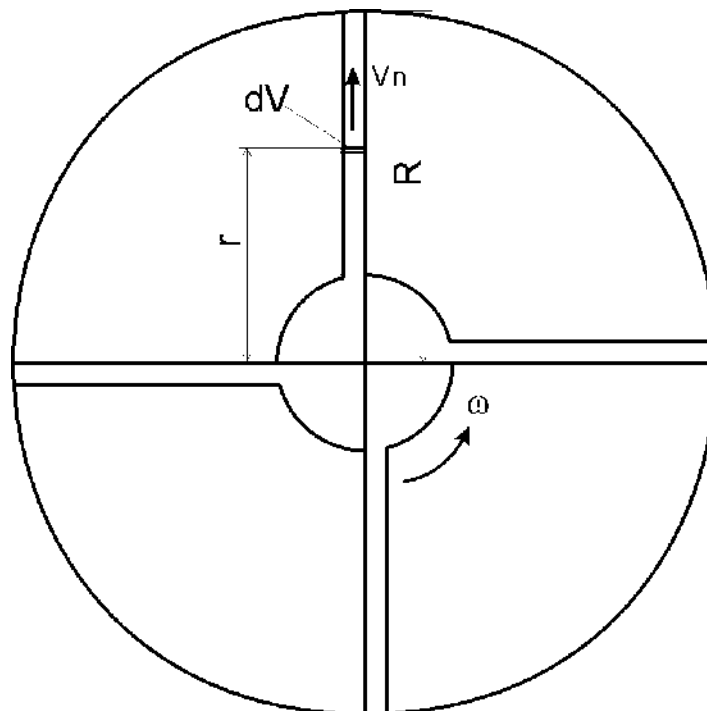
větší než absolutní velikost obou vektorů rychlosti. Druhý speciální případ je ten, kdy máme rovné zužující se potrubí. V tomto případě mají oba vektory rychlosti stejný směr, avšak podle rovnice kontinuity (1) se změni hodnota rychlosti v_2 .



Obr. 2. Ilustrace vzniku reakční síly u zakřiveného potrubí.

Nyní by již mělo být zřejmé, proč byla zvolena právě taková konstrukce rotoru odstředivého motoru, jaká je zobrazena na obr. 1.

Proti reakční síle kapaliny proudící z trysek však působí setrvačné síly vody proudící zužujícími se kanály. V tomto případě se musí vynaložit určitá energie k tomu, aby byl vodě, proudící k tryskám po obvodu rotoru, udělen rotační pohyb. Nyní si odvodíme vztah pro výkon, který se spotřebuje na roztočení vody v rotoru v závislosti na rychlosti v_n proudění kapaliny rotorem. Představme si pro jednoduchost, že kanály rotoru mají konstantní průřez a že jsou rovné až k obvodu rotoru (obr. 2).



Obr. 2. Ilustrace k odvození ztrátového výkonu.

Označme poloměr rotoru jako R . Předpokládejme, že rotor se otáčí úhlovou rychlostí ω . Dále označme průřez kanálu, jímž proudí kapalina jako S a uvažujme elementární objem dV kapaliny v kanálu $dV = S \cdot dr$, kde dr je element délky. Tento objem má hmotnost $dm = \rho \cdot dV$, kde ρ [kg/m^3] je měrná hmotnost. Dále předpokládejme, že tento element objemu se nachází ve vzdálenosti r od osy otáčení rotoru. Potom kinetická energie elementu hmotnosti dm je

$$W_{ki} = 1/2 \cdot dm \cdot v_n^2 = 1/2 \cdot dm \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad (8)$$

Jestliže se element hmotnosti dm posune k ústí kanálu o element délky dr , vzroste jeho kinetická energie o hodnotu

$$dW_{ki} = dm \cdot r \cdot \omega^2 \cdot dr \quad (9)$$

Předpokládáme-li, že kapalina urazí elementární dráhu dr za element času dt , spotřebuje se element výkonu

$$dP = dW_{ki}/dt = dm \cdot r \cdot \omega^2 \cdot dr/dt$$

$$dP = dm \cdot r \cdot \omega^2 \cdot v_n \quad (10)$$

Dále pro zjednodušení předpokládejme, že kanál začíná u osy rotace ($r = 0$). Jestliže poloměr rotoru je R , potom celkový výkon P_n , který je třeba pro udržení úhlové rychlosti ω rotoru, jímž protéká radiálně kapalina rychlostí v_n , je dán integrálem elementárních výkonů dP v mezích $(0, R)$ poloměru r .

$$P_n = \int_0^R dP_n = \int_0^R r \cdot \omega^2 \cdot v_n \cdot dm = \int_0^R r \cdot \omega^2 \cdot v_n \cdot \rho \cdot S \cdot dr = \omega^2 \cdot v_n \cdot \rho \cdot S \cdot [r^2/2]_0^R = 1/2 \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot v_n \cdot \rho \cdot S$$

$$P_n = 1/2 \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot v_n \cdot \rho \cdot S = 1/2 \cdot v_t^2 \cdot v_n \cdot \rho \cdot S \quad (11)$$

kde v_t je obvodová rychlost rotoru.

Vztah (11) vyjádří ztrátový výkon, který se spotřebuje na roztočení kapaliny, proudící radiálními kanály tryskám.

V odstředivém motoru však působí i síly, které účinnost odstředivého motoru naopak zvyšují. Jsou to odstředivé síly. Tyto síly vytvářejí radiální tlak, který zvyšuje rychlost kapaliny proudící tryskami, čímž se zvyšuje také výtoková rychlost v_t média a tím i reaktivní síla pohánějící odstředivý motor. Pro odvození můžeme opět použít obr.2. Předpokládejme, že disk s radiálními kanály podle obr. 2 rotuje rychlostí ω . Na element objemu $dV = S \cdot dr$ kapaliny ve vzdálenosti r od osy rotace působí síla

$$dF = dm \cdot a_n = \rho \cdot dV \cdot \omega^2 \cdot r = \rho \cdot S \cdot dr \cdot \omega^2 \cdot r$$

kde S je průřez kanálu.

Element objemu dV v tomto místě působí tlak

$$dp = dF/S = \rho \cdot dr \cdot \omega^2 \cdot r$$

Celkový tlak ve vzdálenosti R od osy rotace disku je dán integrálem elementárních tlaků dp s proměnnou r v intervalu (0, R):

$$p = \int_0^R \rho \cdot \omega^2 \cdot r \cdot dr = \rho \cdot \omega^2 \cdot [r^2/2]_0^R$$

$$p = 1/2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2 = 1/2 \cdot \rho \cdot v_t^2 \quad (12)$$

Ze vztahu (12) je zřejmé, že tlak způsobený odstředivou silou se rovná dynamickému tlaku tekutiny proudící rychlostí, jež se rovná obvodové rychlosti $v_t = \omega^2 \cdot R^2$ rotujícího disku (obr. 2).

Nyní se pokusme alespoň přibližně určit rozdíl mezi ztrátovým výkonem P_n setrvačných sil a výkonem P_o odstředivých sil.

Nejdříve určíme minimální reakční sílu tekutiny vytékající z trysek. Vektory rychlostí \mathbf{v}_n a \mathbf{v}_t tekutiny jsou na sebe kolmé. To znamená, že absolutní hodnota výsledného vektoru ($\mathbf{v}_t - \mathbf{v}_n$) bude vždy větší než absolutní hodnota kteréhokoli z obou vektorů. Neuděláme tedy chybu, když rychlost \mathbf{v}_n zanedbáme. Pro reakční sílu F_r na základě (7) potom platí:

$$F_r \geq \rho \cdot I \cdot v_t = \rho \cdot S \cdot v_t^2 = \rho \cdot S \cdot \omega^2 \cdot R^2 \quad (13)$$

Kroutící moment vyvolaný odstředivou resp. reakční silou je $M_r = F_r \cdot R$ a výkon

$$P_r = M_r \cdot \omega = F_r \cdot R \cdot \omega$$

Po dosazení za F_r podle (13) pro výkon vyvolaný odstředivou silou dostaneme následující vztah

$$P_r \geq \rho \cdot S \cdot \omega^3 \cdot R^3 \quad (14)$$

Za předpokladu, že radiální kanály mají stálý průřez, můžeme psát, že $v_n = v_t = R \cdot \omega$. Vztah (11) se nám potom změní na tvar

$$P_n = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot \omega^3 \cdot R^3$$

a výsledný výkon rotoru, poháněného pouze odstředivou silou, bude

$$P_o = P_r - P_n \geq 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot \omega^3 \cdot R^3 \quad (15)$$

Příklad 1: $R = 0,15\text{m}$, $\omega = 300$, $S = 4 \text{ cm}^2$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $P_o = ?$, $p = ?$, $v_t = ?$ $M = ?$ $F = ?$

$$v_t = \omega \cdot R = 45 \text{ m/s}$$

$$P_o \geq 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_t^3 = 0,5 \cdot 1000 \cdot 0,0004 \cdot 45^3 = 18,225 \text{ kW}$$

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot v_t^2 = 500 \cdot 45^2 = 1.012.500 \text{ Pa}$$

$$M = P/\omega = 18225/300 = 60,75 \text{ Nm}$$

$$F = M/R = 60,75/0,15 = 405 \text{ N}$$

Nakonec se zmíníme o vhodných aplikacích a konstrukcích. První, co nás napadne, je náhrada vodních turbín. Další možností je zvolit konstrukční uspořádání, podobné tomu, které použil Richard Clem, tj. pohánět odstředivý motor čepadlem tak, aby po roztočení byla celá soustava samochodná. Dále je možné jít cestou Viktora Schaubergera a vytvořit vlastně umělé tornádo. Touto zajímavou možností se nyní budeme zabývat podrobněji. Celé zařízení by mělo být uzavřeno ve vodotěsné nádobě, nejlépe kruhového tvaru, kde rotor bude umístěn vertikálně tak, aby volné sání bylo umístěno dole a z opačné strany byl připojen motorgenerátor, který, jak již vyplývá z názvu, bude plnit dvě funkce: spouštěcí jako motor a pracovní jako elektrický generátor. Naším úkolem nyní bude, určit minimální průměr sacího otvoru rotoru. Pro jednoduchost předpokládáme, že normální atmosferický tlak je 100 kPa. Tomuto tlaku odpovídá dynamický tlak na vstupu do rotoru:

$$p = 1/2 \cdot \rho \cdot v_1^2 = 100.000 \text{ Pa,}$$

odkud vypočítáme rychlost v_1 , kterou vtéká pracovní médium do rotoru.

$$v_1 = \sqrt{2p / \rho} = \sqrt{2 \cdot 100000 / 1000} = \sqrt{200} = 14,14 \text{ m/s}$$

Průřez vstupního otvoru vypočítáme podle rovnice kontinuity (1).

$$S_1 = S_2 \cdot v_2 / v_1 ,$$

kde $v_2 = v_1$ a S_2 je celkový průřez všech trysek po obvodu rotoru. Odtud již snadno určíme průměr.

Příklad 2: $v_t = 45 \text{ m/s}$, $S_2 = 4 \text{ cm}^2$, $S_1 = ?$, $D_1 = ?$ $I = ?$ $P_1 = ?$ (P_1 je výkon proudu kapaliny vstupující do rotoru.)

$$S_1 = S_2 \cdot v_2 / v_1 = 4 \cdot 45 / 14,14 = 12,73 \text{ cm}^2$$

$$D = \sqrt{4 \cdot S / \pi} = \sqrt{4 \cdot 12,73 / \pi} = 4 \text{ cm}$$

$$I = S_1 \cdot v_1 = 0,001273 \cdot 14,14 = 0,018 \text{ m}^3/\text{s} = 18 \text{ l/s}$$

$$P_1 = p_1 \cdot I = 100000 \cdot 0,018 = 1800 \text{ W}$$

Reference:

[1] Alois Hlavička a kol.: Fyzika pro pedagogické fakulty, SPN Praha 1978

[2] <http://free-energy.webpark.cz/>

[3] Článek Proč funguje Clemův Motor

[4] Článek Schaubergerův pohon