



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

SÍLA VODNÍHO PAPRSKU NA ROVINNOU PLOCHU

THE FORCE OF WATER JET ON A FLAT SURFACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Kasal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miloslav Fic

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Milan Kasal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Miloslav Fic**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Síla vodního paprsku na rovinnou plochu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Voda a vodní toky představují mocnou sílu přírody. Člověk se tisíce let učil tuto sílu využívat se svůj prospěch. Známe vodní mlýny, pily, hamry, elektrárny a další. Jakou sílu má jediný paprsek vody dopadající na plochu?

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je ucelení teorie mechaniky tekutin týkající se hydrodynamické síly působící na plochu. Student uvede odvození síly na rovinnou desku a rešerši pojednávající o využití a principu strojů na bázi vodního paprsku. Součástí práce bude praktické ověření odvozených vztahů při laboratorním měření a jejich diskuze.

Seznam literatury:

BRDIČKA, Miroslav, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. Mechanika kontinua. Vyd. 4., rev. a upr. Praha: Academia, 2011, 878 s. ISBN 978-80-200-2039-0.

ŠOB, František. Hydromechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002, 238 s. ISBN 80-214-2037-5.

NECHLEBA, Miroslav. Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství: jejich konstrukce a příslušenství / . 2., rozš. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 672 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 30. 11. 2015



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o teorii mechaniky tekutin. V první části práce jsou uvedeny tři základní hydrodynamické zákony pro ideální i skutečnou kapalinu. Dále je zde odvozena síla působící na plochu. Druhá část práce je věnována praktickému využití síly vodního paprsku a to k výrobě elektřiny a dělení materiálu. Cílem poslední části bylo praktické ověření odvozených vztahů při laboratorním měření.

Klíčová slova

Eulerova rovnice hydrodynamiky, Bernoulliho rovnice, rovnice kontinuity, Peltonova turbína, turbína Turgo, řezání vodním paprskem

ABSTRACT

This bachelor thesis discusses about the theory of fluid mechanics. In the first part of work are listed the basic hydrodynamic laws for ideal and real fluid. Further there was derived force acting on the surface. The second part is devoted to the practical use of force water jet to generate electricity and cutting of material. The objective of the last section, was practical verification of derived relations during laboratory measurements.

Key words

Euler equation, Bernoulli's principle, continuity equation, Pelton wheel, Turgo turbine, water jet cutter

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KASAL, M. *Síla vodního paprsku na rovinnou plochu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloslav Fic.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma síla vodního paprsku na rovinnou plochu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Milan Kasal

PODĚKOVÁNÍ

Úvodem této bakalářské práce bych rád poděkoval Ing. Miloslavu Ficovi za cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracování zadaného tématu.

Obsah

Úvod.....	9
1 Teorie hydrodynamiky.....	10
1.1 Základní pojmy hydrodynamiky	10
1.2 Rovnice kontinuity	12
1.3 Zákon o rovnováze sil při proudění	14
1.4 Bernoulliho rovnice.....	16
1.5 Silový účinek kapaliny odvozený z ERHD.....	18
1.6 Věta o změně hybnosti	20
1.7 Aplikace věty o změně hybnosti	20
2 Aplikace vodního paprsku	23
2.1 Peltonova turbína	23
2.2 Turbína Turgo	27
2.3 Řezání vodním paprskem.....	28
3 Experimentální ověření věty o změně hybnosti.....	34
3.1 Měření a zpracování dat	34
3.2 Diskuze výsledků	37
4 Závěr	38
Seznam obrázků.....	39
Seznam použitých zdrojů.....	40
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	42

Úvod

Jakou sílu má voda zná lidstvo po tisíce let a přibližně stejně dlouhou dobu se ji člověk snaží ovládnout a využít ke svému prospěchu. V dobách prvních civilizací šlo o stavbu vodních kanálů určených k zavlažování či dopravě pitné vody do lidských sídel, ovšem postupem času se začala využívat i síla této vodní masy. První případ využití vodního kola známe již v 6 století př. n. l. v Mezopotámii, které bylo určeno k zavlažování. Mimo antický svět se tento vynález ovšem dostává mnohem později, první zmínky využití vodního kola pochází z německého Moselu (rok 361 n.l.). Na česká území dokonce až v roce 718 n.l.[5] Ovšem až objevy švýcarského matematika Leonharda Eulera (1707 - 1783) a nizozemského matematika Daniela Bernoulliho (1700 – 1782), kteří společně pracovali v ruské akademii věd v Petrohradě, dokázaly výrazně rozšířit vědomosti o dynamice kapalin a pomohly v překotný vývoj zařízení využívající jak potenciální (polohová a tlaková energie) tak kinetickou energii. Z těchto rovnic vyplývá jeden důležitý fakt a to že pokud soustředíme kapalinu do zúžující se trubice, tak její silový účinek výrazně naroste.

V této bakalářské práci jsem se zaměřil na sepsání základní problematiky proudění kapalin tj. sepsání rovnic pro ideální i reálnou kapalinu a dále dvě možnosti odvození impulsové věty, která je základním prvkem pro návrh zařízení využívající sílu vodního paprsku. Rešerše na tyto stroje pracující na bázi vodního paprsku jsou uvedeny v druhé části bakalářské práce, jedná se o Peltonovu vodní turbínu, turbínu Turgo a řezání vodním paprskem. V poslední části této práce je uveden experiment, který jsem provedl s cílem ověřit odvozenou rovnici o změně hybnosti.

1 Teorie hydrodynamiky

1.1 Základní pojmy hydrodynamiky

Hydrodynamika je obor zabývající se pohybem neboli prouděním kapalin. K teoretickému řešení proudění využívá matematické metody. Ty vycházejí ze třech základních principů a to zákon zachování hmotnosti (rovnice kontinuity), zákon zachování energie (Bernoulliho rovnice) a zákon zachování hybnosti (Eulerova rovnice hydrodynamiky). Zvolenou oblast můžeme vyšetřovat v prostoru, na ploše či pouze po určené křivce a to buď sledováním jedné částice kapaliny či proudu kapaliny v nějakém časovém okamžiku. [1]

Proudění

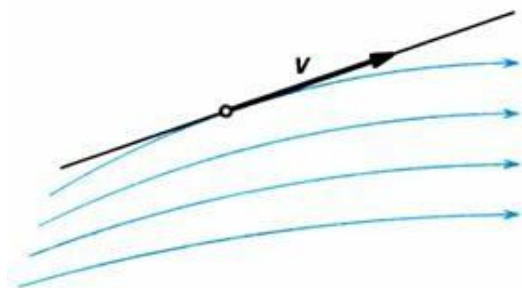
- Pohyb částic tekutiny
- Kapalina proudí z místa vyšší tlakové potenciální energie do míst nižší tlakové potenciální energie

Trajektorie

- Zobrazuje pohyb částice z místa A do místa B

Proudnice

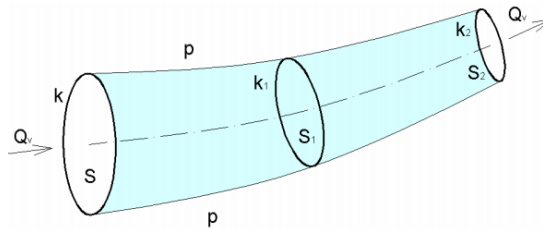
- Rychlost částice v každém bodě je tečnou k této proudnici
- Proudnice se nemohou prolínat



Obr. 1.1.1 Rychlost proudící tekutiny [22]

Proudová trubice

- Jedná se o plochu ohraničenou proudnicemi
- Skrze stěnu proudnice kapalina neprochází a protéká jí konstantní hmotnostní průtok
- V praxi můžeme tuto proudovou trubici nazvat **potrubím**



Obr. 1.1.2 Proudová trubice [1]

Rychlost proudění

- Každá částice v proudící kapalině v daném okamžiku má svou rychlost

Druhy proudění:

Druhy proudění určujeme podle tzv. Reynoldsova čísla. Je to jedno z mnoha bezrozměrných čísel, které se používají pro porovnávání vlastností kapalin. Je definováno vztahem:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1.1)$$

Kde v je střední rychlost tekutiny, d je hydraulický průměr potrubí a ν je kinematičká viskozita proudící tekutiny [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Pro proudění v potrubí kruhového průřezu je kritická hodnota Reynoldsova čísla $Re_{krit} = 2320$. Pokud Re je menší než Re_{krit} , kapalina bude v potrubí proudit laminárně, pokud bude Re větší, nastane turbulentní proudění. [1]

1.) Rozdělení podle fyzikálních vlastností kapaliny:

Podle charakteru kapaliny:

- Proudění ideální kapaliny – kapalina je dokonale nestlačitelná a bez vnitřního tření
- Proudění skutečné kapaliny – kapaliny obecně stlačitelné a s vnitřním třením, nicméně v mnoha praktických aplikacích lze stlačitelnost zanedbat, tím získáme **skutečnou kapalinu nestlačitelnou**

Podle způsobu pohybu:

Ideální kapalina:

- Potenciální (nevířivé) proudění – částice kapaliny konají pouze posuvný pohyb, neotáčí se kolem své osy
- Vířivé proudění – částice kapaliny se kromě posuvného pohybu otáčejí kolem vlastní osy, čímž způsobují víry

Skutečná kapalina:

- Laminární proudění – dráhy jednotlivých částic kapaliny jsou rovnoběžné, nedochází k přemísťování částic napříč průřezem, obvykle při nízkých rychlostech proudící kapaliny
- Turbulentní proudění – dráhy jednotlivých částic přecházejí mezi vrstvami a tím dochází k promíchání, vzniká z laminárního proudění při zvětšených rychlostech proudící kapaliny [2]

2.) Rozdělení podle kinematických hledisek:

Podle uspořádání proudění v prostoru:

- Prostorové (trojrozměrné) proudění – $v = v(x;y;z)$
- Rovinné (dvourozměrné) proudění – $v = v(x;y)$
- Jednorozměrné proudění – proudění po střední proudnici v potrubí, $v = v(l)$

Podle závislosti na čase:

- Ustálené (stacionární) proudění – charakteristické veličiny kapaliny jsou v daném místě nezávislé na čase, tzn. $v \neq v(t)$
- Neustálené (nestacionární) proudění – charakteristické veličiny kapaliny se s časem mění, tzn. $v = v(x;y;z;t)$

Podle rovnoměrnosti rychlosti v daném profilu:

- Rovnoměrné proudění – proudění např. v potrubí, uvažujeme $v = konst.$
- Nerovnoměrné proudění – proudění, kdy každý bod kontrolní plochy má jinou rychlost, například obtékání profilu křídla, uvažujeme $v \neq konst.$ [2]

1.2 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity, jinak známá jako rovnice spojitosti vyjadřuje obecně platný fyzikální zákon o zachování hmotnosti, tzn. že pro kontrolní objem “ dV “, kterým proudí kapalina, musí být hmotnost konstantní a tedy její celková změna nulová [2]:

$$m = konst \Rightarrow dm = 0 \quad (1.2)$$

U kontrolního objemu mohou nastat dvě změny hmotnosti a to [2]:

- **lokální změna** – v kontrolním objemu může nastat stlačení či rozpínání kapaliny, tato změna je závislá na čase ($\partial/\partial t \neq 0$)
- **konvektivní změna** – je daná rozdílem přitékající a odtékající hmotnosti z kontrolního objemu, tzn. že je závislá na posunutí, např. u jednorozměrného proudění na délce ($\partial/\partial l$)

Platí, že obě změny musí ve výsledku dávat nulovou změnu hmotnosti, tzn. hmotnost na vstupu se musí rovnat hmotnosti na výstupu, jen s opačným znaménkem. Případně lze rovnici kontinuity definovat i tak, že rozdíl hmotnosti na vstupu a výstupu z kontrolního

objemu se rovná naakumulované hmotnosti v kontrolním objemu samotném. Rovnice kontinuity je shodná pro proudění ideální i skutečné kapaliny. [1]

Obecná rovnice kontinuity pro třírozměrné proudění [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

Rovnice platí pro skutečnou stlačitelnou kapalinu. Tuto rovnici lze přepsat do vektorového tvaru:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (1.4)$$

Tuto obecnou rovnici lze zjednodušit pro výpočet proudění **ideální kapaliny**:

- Pro případ **ustáleného potrubí** ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$), tj. proudění nezávislé na čase nám odpadne první člen, získáme rovnici ve tvaru:

$$\rho \cdot \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (1.5)$$

- Rovnici lze i nadále zjednodušit za předpokladu **nestlačitelnosti kapaliny** ($\rho = \text{konst.}$):

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (1.6)$$

Obecná rovnice kontinuity pro jednorozměrné proudění [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho \cdot S) + \frac{\partial}{\partial l} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) = 0 \quad (1.7)$$

Kde první část rovnice je lokální změna hmotnosti řešící vliv času $\frac{\partial}{\partial t}$, druhá část je konvektivní změna hmotnosti, která řeší vliv posunutí $\frac{\partial}{\partial l}$.

Zjednodušené rovnice kontinuity [2]:

- Podstatného zjednodušení se dočkáme, pokud uvažujeme **ustálené proudění stlačitelné kapaliny**, kdy platí, že charakteristické veličiny nejsou závislé na čase ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$), takže se rovnice kontinuity zjednoduší na tvar:

$$\frac{\partial}{\partial l} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) = \frac{d}{dl} \cdot (\rho \cdot S \cdot v) = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho \cdot S \cdot v = \text{konst} \quad (1.8)$$

Kde $\rho \cdot S \cdot v$ označíme jako hmotnostní průtok Q_m [kg.s⁻¹], který udává hmotnost kapaliny proteklé za jednotku času.

V každém průřezu daného potrubí musí platit rovnost:

$$Q_m = \rho \cdot S \cdot v = konst \Rightarrow \rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \quad (1.9)$$

- V případě **ustáleného proudění nestlačitelné kapaliny** je hustota konstantní ($\rho = konst.$), tudíž se rovnice dále zjednoduší na tvar:

$$\frac{\partial}{\partial l} \cdot (v \cdot S) = 0 = \frac{d}{dl} \cdot (v \cdot S) = 0 \Rightarrow v \cdot S = konst. \quad (1.10)$$

Kde $v \cdot S$ označíme jako objemový průtok Q_v [$m^3 \cdot s^{-1}$], který udává objem proteklé kapaliny za jednotku času:

$$Q_v = v \cdot S = \frac{Q_m}{\rho} = konst. \quad (1.11)$$

1.3 Zákon o rovnováze sil při proudění

Pro ideální kapalinu

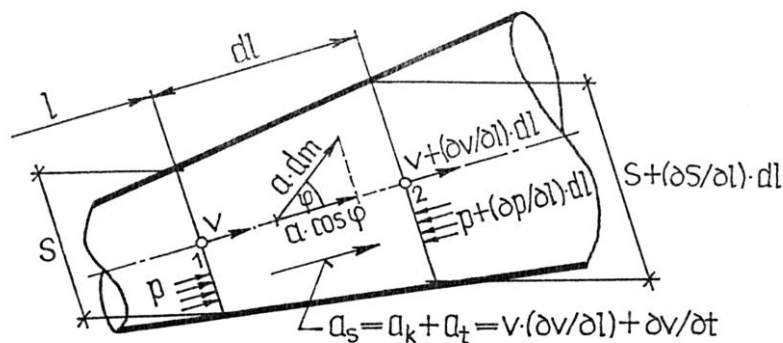
Pro ideální kapalinu se používá Eulerova rovnice hydrodynamiky vyjadřující rovnováhu sil při proudění. V rovnici rovnováhy vystupují síly hmotnostní (objemové), kdy na jednotku hmotnosti (objemu) působí vnější zrychlení, dále normálové síly a síly setrvačné od vlastního pohybu jednotlivých částic kapaliny. Třecí síly vznikající od tečných napětí při počítání s ideální kapalinou zanedbáváme. [3]

A.) Rovnice pro jednorozměrné proudění [2]:

$$\vec{F}_m + \vec{F}_p = \vec{F}_s \quad (1.12)$$

Kde:

- F_m - vnější hmotnostní (objemová) síla
- F_p - tlaková síla daná normálovými napětími
- F_s - setrvačná síla daná zrychlením setrvačným (konvektivním a_k) a tlakovým (lokálním a_t), přičemž bereme do úvahy skutečnost, zda se jedná o ustálené proudění ($a_t=0$) či neustálené ($a_t \neq 0$)



Obr. 1.3.1 Silová rovnováha v proudové trubici [2]

Hmotnostní síla na jednotku hmotnosti – pokud tuto rovnici podělíme jednotkovou hmotností, získáme hmotnostní sílu $\frac{F}{dm}$ [$m \cdot s^{-2}$], kde φ značí úhel sklonu potrubí k vodorovné základně:

$$F_m \Rightarrow a \cdot \cos\varphi \quad (1.13)$$

Tlaková síla na jednotku hmotnosti:

$$F_p = \left[p \cdot S - \left(p + \frac{\partial p}{\partial l} \cdot dl \right) \cdot \left(S + \frac{\partial S}{\partial l} \cdot dl \right) \right] \Rightarrow -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial l} \quad (1.14)$$

Setrvačná síla na jednotku hmotnosti – setrvačné zrychlení a_s je složeno z konvektivního zrychlení a_k a lokálního zrychlení a_l :

$$F_s \Rightarrow v \cdot \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.15)$$

Pro jednorozměrné proudění tedy platí rovnováha sil na jednotku hmotnosti:

$$a \cdot \cos\varphi - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial l} = v \cdot \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.16)$$

B.) Rovnice pro obecné prostorové proudění

Rovnice jsou rozepsané pro směr x:

Hmotnostní síla na jednotku hmotnosti:

$$F_m \Rightarrow a_x \quad (1.17)$$

Tlaková síla na jednotku hmotnosti:

$$F_p \Rightarrow -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.18)$$

Setrvačná síla na jednotku hmotnosti – první člen představuje lokální zrychlení, ostatní členy konvektivní zrychlení

$$F_s \Rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} \cdot v_z \quad (1.19)$$

Výsledné rovnice silové rovnováhy pro prostorové proudění ve složkovém tvaru mají tedy tvar:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} \cdot v_z = a_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot v_y + \frac{\partial v_y}{\partial z} \cdot v_z = a_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_z}{\partial y} \cdot v_y + \frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot v_z = a_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1.22)$$

Tuto rovnici je praktičtější přepsat do vektorového tvaru:

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p = \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (1.23)$$

Pro skutečnou kapalinu

Pro výpočet proudění skutečné newtonovské kapaliny se používá Navierova-Stokesova rovnice hydrodynamiky, kterou odvodili nezávisle na sobě Claude-Louis Navier v roce 1927 a George Gabriel Stokes v roce 1945. Od Eulerovy rovnice hydrodynamiky se liší třecí silou F_t , která v této rovnici rovnováhy také vystupuje: [1]

$$F_m + F_p + F_t = F_s \quad (1.24)$$

Kde:

- F_m - vnější hmotnostní (objemová) síla
- F_p - tlaková síla daná normálovými napětími
- F_s - setrvačná síla daná zrychlením setrvačným (konvektivním a_k) a tlakovým (lokálním a_t), přičemž bereme do úvahy skutečnost, zda se jedná o ustálené proudění ($a_t=0$) či neustálené ($a_t \neq 0$)
- F_t - třecí síla způsobená viskozitou kapaliny, daná tečnými napětími

Vektorový zápis Navier-Stokesovy rovnice:

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \cdot \Delta \vec{v} = \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (1.25)$$

1.4 Bernoulliho rovnice

Pro ideální kapalinu

Bernoulliho rovnice je vztah, který vyjadřuje zákon zachování energie přepočtené na jednotku hmotnosti odvozeným Danielem Bernoullim, který ji vydal roce 1738 ve svém stěžejním díle Hydrodynamica. Její odvození vychází Eulerovy rovnice hydrodynamiky pro ideální kapalinu či ji lze získat přímo ze zákona zachování mechanické energie:

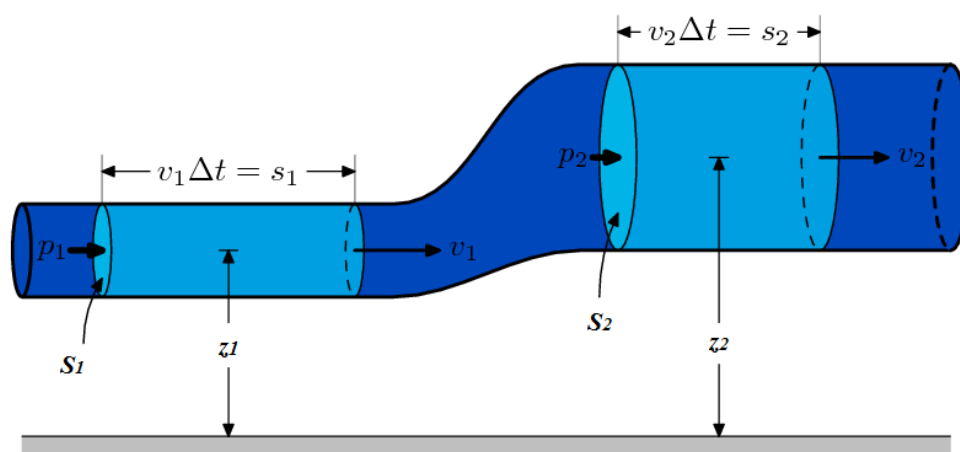
$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z + p \cdot V = \text{konst.} \quad (1.26)$$

Kde součin $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ odpovídá kinetické energii, součin $m \cdot g \cdot z$ potencionální energii a nakonec $p \cdot V$ je potencionální tlaková energie. Množství této energie v systému se nemění a musí tedy být konstantní, její jednotka je Joule [J].

Pokud rovnici 1.26 podělíme hmotností, získáme energetický tvar Bernoulliho rovnice:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g \cdot z = \text{konst.} \quad (1.27)$$

Kde výsledná energie má jednotku [J.kg⁻¹].



Obr. 1.4.1 Schéma pro odvození Bernoulliho rovnice [20]

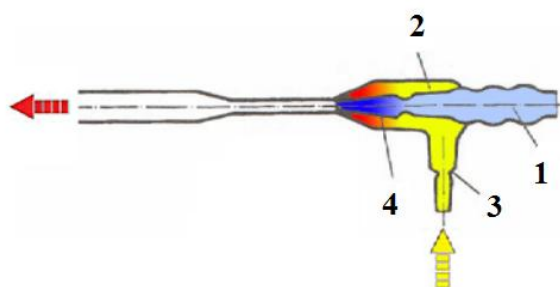
Existují i další používané tvary Bernoulliho rovnice, například tvar tlakový [Pa], který získáme vynásobením rovnice (číslo rovnice) hustotou ρ :

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p + \rho \cdot g \cdot z = konst. \quad (1.28)$$

Případně pokud rovnici podělíme tíhovým zrychlením g , získáme tzv. výškový tvar [m]:

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z = konst. \quad (1.29)$$

Z Bernoulliho rovnice vyplývá, že důsledkem zvýšení rychlosti dojde ke snížení tlaku v potrubí. Tento jev se nazývá hydrodynamický paradox (či jinak hydrodynamické paradoxon) a je využíván celou řadou přístrojů, jako například stříkácí pistole, karburátory či Venturiho trubice, která se používá pro nepřímé měření rychlosti proudící kapaliny v potrubí. Rychlost kapaliny může být tak velká, že vznikne podtlak. Tohoto jevu využívá například vodní vývěva. [1]



Obr. 1.4.2 Schéma vodní vývěvy [21]

- 1 – Přívod rychle proudící kapaliny
- 2 – Tělo vývěvy
- 3 – Přívod k odsávanému prostoru
- 4 – Tryska, ve které dochází ke snížení tlaku

Bernoulliho rovnice se nejčastěji využívá pro zjištění parametrů potrubního systému v bodě 2 za předpokladu znalosti těchto parametrů v bodě 1:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 \quad (1.30)$$

Pro skutečnou kapalinu

Při počítání proudění skutečné kapaliny, musíme vzít v potaz třecí síly F_t , které jsou důsledkem viskozity proudící kapaliny. Proto k předešlé rovnici musíme přičíst měrnou ztrátovou energii Y_z [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$], která mechanickou energii (tzn. energii kinetickou, tlakovou a potenciální) mění na teplo. Tento člen se připisuje pouze na jednu stranu rovnice a to na tu, která je co se týče směru proudění vzdálenější.

$$Y_z = \zeta_c \cdot \frac{v^2}{2} = \left(\sum \zeta_m + \sum \zeta_l \right) \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.31)$$

Kde ζ_c je celkový ztrátový součinitel v daném úseku, závisí na druhu hydraulického odporu či ztráty. Je daný součtem dílčích ztrát a to ζ_m , což jsou místní ztráty v potrubí a ζ_l , který udává ztráty třením po délce.

V případě potřeby lze měrnou ztrátovou energii převést jako tlakovou ztrátu p_z , případně jako ztrátovou výšku h_z : [2]

$$Y_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z \quad (1.32)$$

Výsledná Bernoulliho rovnice pro skutečnou kapalinu bude vypadat:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 + Y_z \quad (1.33)$$

1.5 Silový účinek kapaliny odvozený z ERHD

Silový účinek kapaliny lze odvodit také z Eulerovy rovnice hydrodynamiky. Tento způsob je obecněji použitelný, potřebujeme ovšem znát více vstupních parametrů, než při odvození silového účinku z věty o změně hybnosti, která bude uvedena v kapitole 1.6. Pro názornost ovšem tuto možnost též uvedu.

Rovnice ERHD pro ideální kapalinu, jejíž vektorový tvar vypadá:

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p = \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad (1.34)$$

Kde člen \vec{a} na levé straně rovnice představuje zrychlení vyvolané vnějším polem, $\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p$ je zrychlení vyvolané plošnou tlakovou silou, první člen na pravé straně rovnice představuje setrvačné zrychlení konvektivní a poslední člen lokální setrvačné zrychlení.

Za předpokladu ustáleného proudění, tj. $\frac{d}{dt} = 0$ můžeme vyškrtout poslední člen. Tuto rovnici vynásobíme hustotou ρ a zintegrujeme přes kontrolní objem V :

$$\int_V \rho \cdot \vec{a} dV - \int_V \text{grad } p dV = \int_V \rho \cdot \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v} dV \quad (1.35)$$

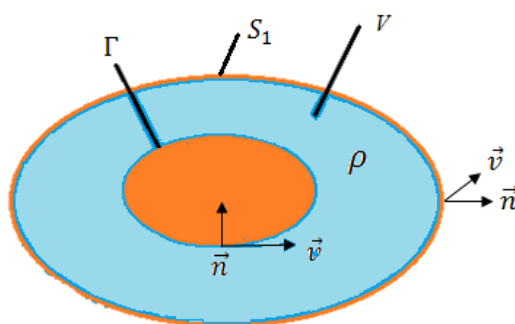
První člen gravitačního zrychlení nahradíme výrazem \vec{G} . Zbytek rovnice pomocí Gaussovy – Ostrogradského věty převedeme na plošný integrál:

$$\vec{G} - \oint_{S_1+\Gamma} p \cdot \vec{n} dS = \oint_{S_1+\Gamma} \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (1.36)$$

Kde $(\vec{v} \cdot \vec{n})$ je skalární součin vektoru rychlosti a normály. Normála \vec{n} je kolmá na hranici a orientována ven z kontrolního objemu.

Pokud si tyto integrály rozepíšeme, dostaneme:

$$\vec{G} - \oint_{S_1} p \cdot \vec{n} dS - \oint_{\Gamma} p \cdot \vec{n} dS = \oint_{S_1} \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\Gamma} \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (1.37)$$



Obr. 1.5.3 Ilustrace kontrolního objemu

Vzhledem k tomu, že rychlost na povrchu obtékaného tělesa a normály je na sebe kolmá, skalární součin tudíž bude nula:

$$\oint_{\Gamma} \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (1.38)$$

Třetí integrál z prava v rov. 1.37 vyjadřuje sílu, kterou působí kapalina na obtékané těleso:

$$\vec{F} = \oint_{\Gamma} p \cdot \vec{n} dS \quad (1.39)$$

Po konečné úpravě dostaneme tvar:

$$\vec{F} = \vec{G} - \oint_{S_1} p \cdot \vec{n} dS - \oint_{S_1} \rho \cdot \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (1.40)$$

Rovnice 1.40 je finální tvar impulsové věty. První člen na pravé straně představuje rychlostní, či jinak řečeno dynamické síly, druhý člen představuje tlakové síly. [24]

1.6 Věta o změně hybnosti

Druhou možností pro výpočet je použití věty o změně hybnosti, jinak též impulsové věty. Použití této metody je omezené pouze na výsledný silový účinek na desku.

Z mechaniky tuhého tělesa je známo, že imupls síly se rovná změně hybnosti:

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot dt = \int_{v_1}^{v_2} m \cdot d\vec{v} \quad (1.41)$$

Kde za předpokladu $t_1 = 0$, $t_2 = t$, $F = konst.$ a $m = konst.$ po integraci dostaneme:

$$\vec{F} \cdot t = m \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (1.42)$$

Pokud tuto rovnici podělíme časem t , získáme:

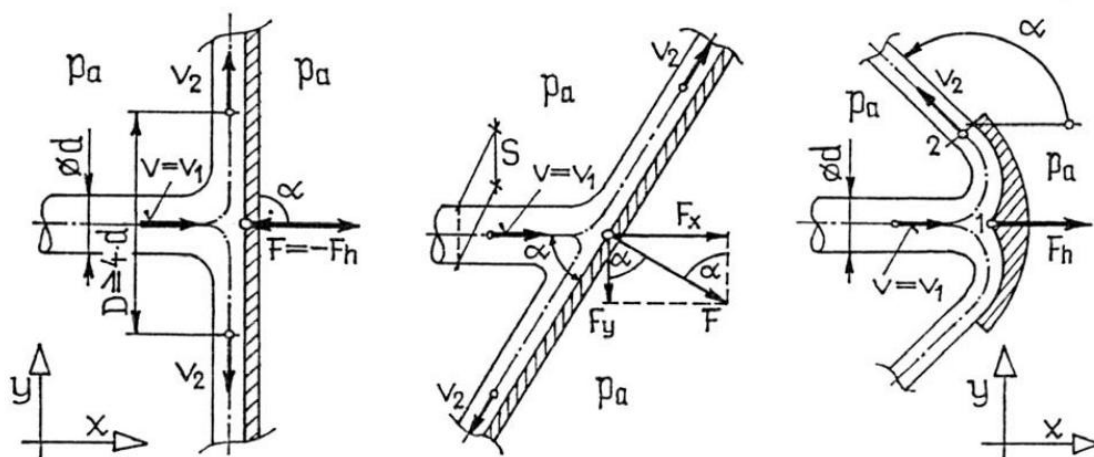
$$\vec{F} = \frac{m}{t} \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = |Q_m| \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = \vec{H}_2 - \vec{H}_1 = \Delta\vec{H} \quad (1.43)$$

Kde Q_m [kg·s⁻¹] je hmotnostní průtok a H [kg·m·s⁻²] je průtoková hybnost.

Reakce \vec{F}_h na sílu \vec{F} od proudící kapaliny, která proteče kontrolní plochou, musí být stejně velká, ale opačně orientovaná [1]:

$$\vec{F}_h = -\vec{F} = -|Q_m| \cdot (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = |Q_m| \cdot (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) = \vec{H}_1 - \vec{H}_2 \quad (1.44)$$

1.7 Aplikace věty o změně hybnosti



Obr. 1.7.1 Paprsek dopadající na plochu [2]

Paprsek dopadající kolmo na rovinnou desku

Po dopadu paprsku na plochu proud kapaliny mění směr o 90° a dochází k rozlité po desce. Jak můžeme vidět na obrázku, pokud chceme, aby se všechna vlákna vychýlila o 90°, je nutné, aby průměr desky byl větší, než je průměr paprsku a to konkrétně $D \geq 4 \cdot d$.

Pokud kapalina vytéká při atmosférickém tlaku, je tlak konstantní. Pro zjednodušení zanedbáváme tíhovou sílu a hydraulické odpory (po dopadu na desku). Proto musí být výtoková rychlost v_1 stejná, jako odtoková rychlost v_2 , což vyplývá s Bernoulliho rovnice.

Hybnostní síla:

$$F_x = \rho \cdot Q_v \cdot (v_{1x} - v_{2x}) = \rho \cdot Q_v \cdot v = \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (1.45)$$

Kde $v_{1x} = v = v_1 = v_2$, $v_{2x} = v \cdot \cos \alpha = 0$, $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ přičemž d je průměr proudícího paprsku. [2]

Paprsek dopadající šikmo na rovinnou desku

V případě, že paprsek dopadá na šikmou plochu, jak vyplývá z obrázku je třeba sílu rozdělit do složek, přičemž normálová síla F_n je kolmá na desku.

$$F_n = \rho \cdot Q_v \cdot v \cdot \sin \alpha = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot \sin \alpha \quad (1.46)$$

Kde složku síly do osy x spočítáme jako:

$$F_x = F_n \cdot \sin \alpha = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (1.47)$$

A složku síly do osy y: [2]

$$F_y = F_n \cdot \cos \alpha = \frac{\rho \cdot S \cdot v^2}{\tan \alpha} \quad (1.48)$$

Paprsek dopadající na rotační plochu (koreček)

V tomto případě hybnostní síla vychází ze vzorce:

$$F_x = \rho \cdot Q_v \cdot (v_{1x} - v_{2x}) = \rho \cdot Q_v \cdot v = \rho \cdot S \cdot v \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (1.49)$$

Kde $v_{1x} = v = v_1 = v_2$, $v_{2x} = v \cdot \cos \alpha$.

Takže můžeme vytknout:

$$v_{1x} - v_{2x} = v \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (1.50)$$

Pokud bychom docílili vychýlení paprsku o $180^\circ \Rightarrow \cos \alpha = -1$, získáme tím maximální velikost hybnostní síly:

$$F_{x \max} = 2 \cdot \rho \cdot Q_v \cdot v \quad (1.51)$$

Tato rovnice je základem pro návrh oběžného kola Peltonovy turbíny, nicméně je třeba vzít v potaz rotaci oběžného kola, takže pro výpočet síly paprsku je třeba zahrnout do rovnice unášivou rychlost u lopatky turbíny: [1]

$$F_{x\ skut} = 2 \cdot \rho \cdot Q_v \cdot (v - u) \quad (1.52)$$

2 Aplikace vodního paprsku

V této kapitole budou představeny dva nejzákladnější způsoby využití vodního paprsku. Nejdříve se podíváme na Peltonovu turbínu, která je využívána pro výrobu elektrické energie a to především v horských oblastech. Krátce bude zmíněna turbína Turgo. V poslední kapitole bude rozebrán jeden z nekonvenčních způsobů dělení materiálu a to řezání vodním paprskem.

2.1 Peltonova turbína

Úvod

Peltonova turbína je rovnotlaká vodní turbína s parciálním tangenciálním ostřikem vynalezena Lesterem Allanem Peltonem v roce 1880 v Nevadě, kde byla původně určena pro pohon strojů využívaných při těžbě zlata. Patří mezi nejúčinnější vodní turbíny s účinností u malých turbín 80 až 85% a u velkých 85 až 95%. Vyrábí se ve všech možných velikostech od desítek centimetrů až po jednotky metrů s vertikálním i horizontálním uložením. Při použití více dýz je osa obvykle orientována vertikálně. Používá se tam, kde je vysoký spád (od zhruba 20 do 2000 metrů) a malý průtok (od jednotek do tisíců litrů za sekundu). Díky tomu je vhodná pro užití zejména v horských oblastech. V případě vyššího průtoku se proud vody rozdělí mezi více Peltonových turbín.

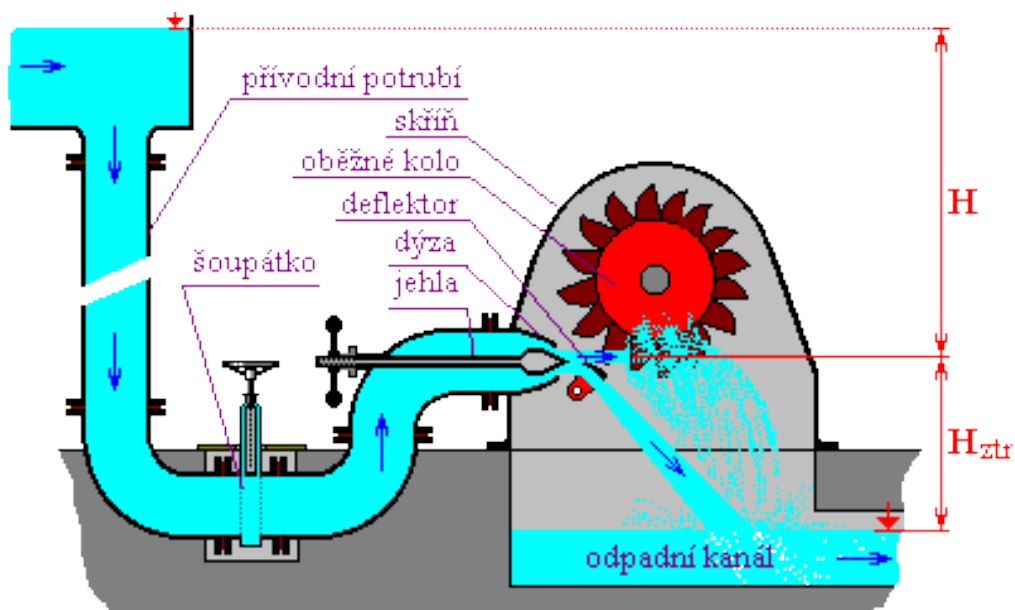
Mimo to mohou najít uplatnění například v průmyslových podnicích, kde je využívána kapalina za vysokých tlaků a zpětně se tak využije naakumulovaná energie. [5]



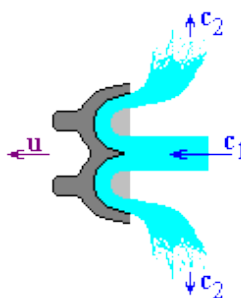
Obr. 2.1.1 Oběžné kolo Peltonovy turbíny [11]

Princip

Voda je přiváděna velkou rychlostí skrze ústí jedné či více kruhových dýz. Vodní paprsek následně tangenciálně dopadá na dvojité lžicovité lopatky oběžného kola. Tento způsob je použit proto, aby hrana uprostřed vodní paprsek rozdělila na dvě poloviny. Lžicovitý tvar lopatky se poté snaží otočit vodní paprsek o 180° a díky tomu se oběžnému kolu předá velké množství energie. Využitý spád je označen H , výškový rozdíl H_{ztr} je ztracený a energeticky nevyužitý. [5]



Obr. 2.1.2 Schéma mechanické části vodní elektrárny s Peltonovou turbínou [5]

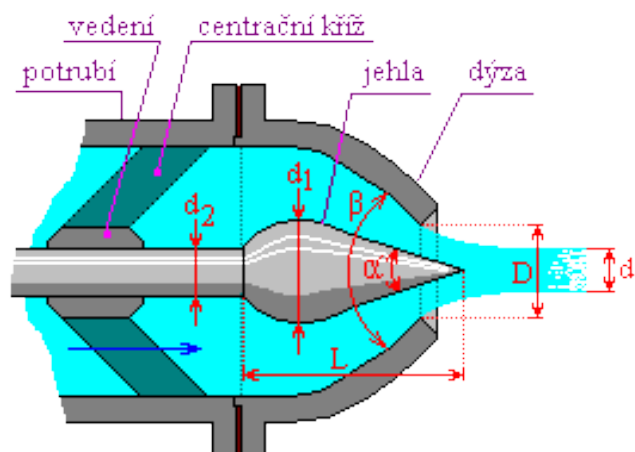


Obr. 2.1.3 Schéma dělení vodního paprsku [5]

Regulace výkonu

Výkon lze regulovat zasouváním jehly do dýzy, čímž změním průtočný průřez. Tato jehla je zasouvána nejčastěji buď mechanicky či u větších výkonů hydraulicky pomocí servomotoru. Jehla je kvůli erozi konstruována jako výměnná.

Ovšem pokud je potřeba turbínu rychle odstavit či rychle změnit výkon, nelze to udělat jen pomocí posuvné jehly, jelikož bychom způsobily vodní rázy v potrubí. Vodní paprsek se nejdříve pomocí deviátoru či deflektoru odkloní a až poté pomalým zasunutím jehly zastavíme či omezíme proud vody. [5]

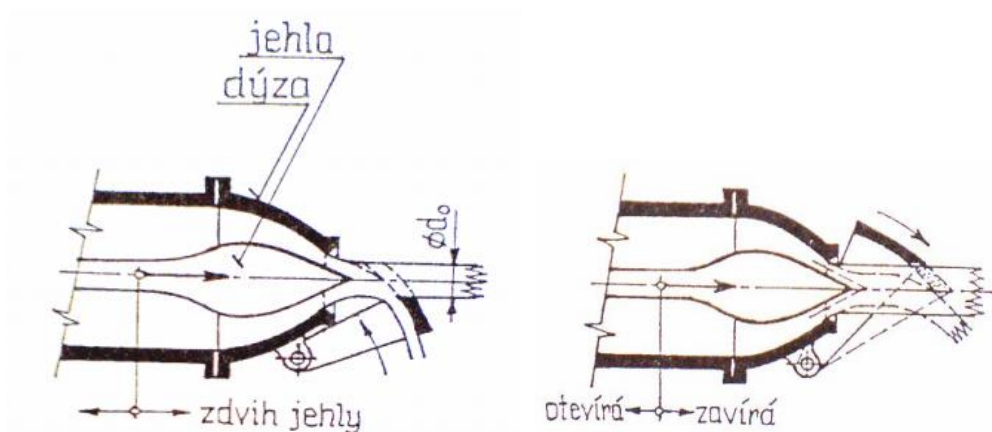


Obr. 2.1.4 Průřez dýzou [5]

Deflektor a deviátor

Při nutnosti rychlého odstavení Peltonovy turbíny, či jen výrazného snížení výkonu nelze kvůli vzniku vodních rázů v přívodním potrubí použít k regulaci pouze jehlu. K tomuto účelu jsou součástí každého zařízení buď deflektor nebo deviátor. Jsou to velmi jednoduchá obloukovitá zařízení z nerezové lité oceli připojena k hřídeli, který postupně zasahuje do vodního paprsku až plně odkloní jeho dráhu. K pohonu slouží servomotor. Rozdíl mezi deflektorem a deviátorem je velikost zdvihu, který musí vykonat k úplnému odklonu paprsku. Deflektor zasahuje do paprsku z vnější strany a k úplnému odklonění je třeba vykonat zdvih ve velikosti průměru paprsku, kdežto deviátor zasahuje do paprsku z vnitřní strany a k odklonu mu stačí pouze polovina průměru vodního paprsku, jelikož horní polovina odkloněného paprsku rozruší i tu spodní.

Až po tomto zásahu do vodního paprsku může započít plynulé zasouvání jehly do vodní trysky. [5]



Obr. 2.1.5 Schéma odklonu paprsku pomocí deflektoru (obr. vlevo) a deviátoru (obr. vpravo) [2]

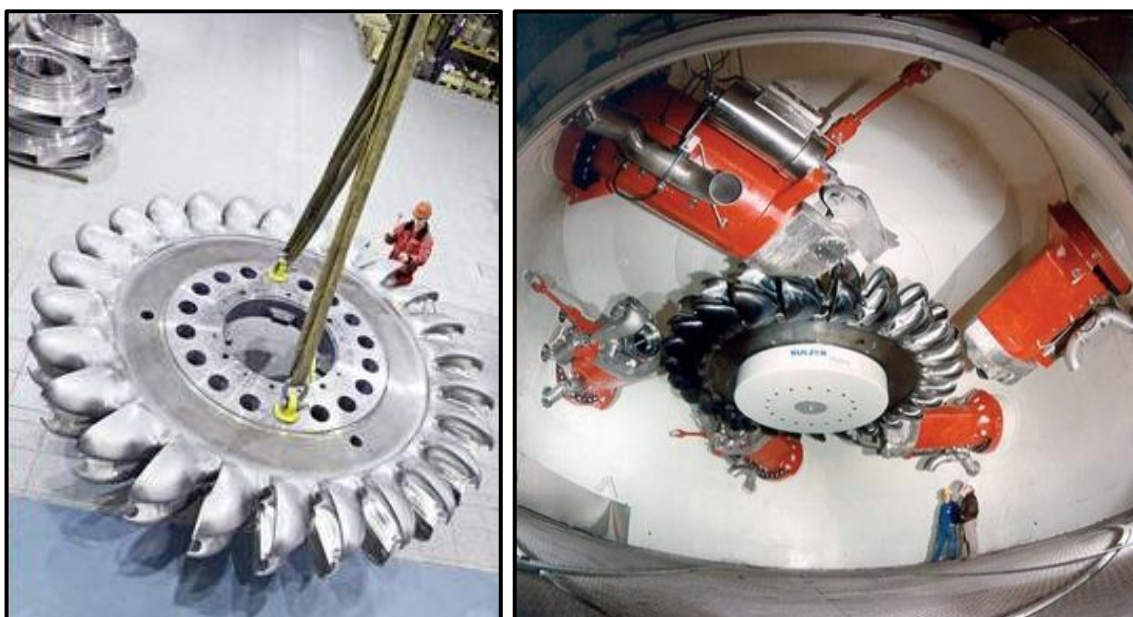
Výroba oběžného kola

Nevýhoda Peltonovy turbíny spočívá v obtížné výrobě oběžného kola díky svému specifickému tvaru. Základní způsoby jsou dva, vyrábí se buď v celku a nebo všechny lopatky jednotlivě, které se posléze připevní na kotouč. V druhém případě je mnohem jednodušší výroba, nicméně hlavní výhodou druhého způsobu spočívá v tom, že v případě nějakého poškození lopatky není potřeba vyměňovat celé oběžné kolo, ale pouze danou lopatku. [5]

Příklady použití

Vzhledem k absenci vhodných podmínek pro Peltonovu turbínu v České Republice je její použitelnost výrazně omezena. Zřejmě nejvýkonnější Peltonovy turbíny na našem území používají v přečerpávací vodní elektrárně Černé jezero, kde je instalována jedna turbína o výkonu 1500 KW a druhá o výkonu 370 KW. [7]

Na vodní energii a konkrétně využití Peltonových turbín spoléhají především v hornatějších zemích, jako je Norsko či Švýcarsko. Právě ve Švýcarsku se nachází dosud nejvýkonnější vodní elektrárna založená na Peltonových turbínách. Leží na jihu ve švýcarských Alpách v přečerpávací elektrárně Bieudron Hydro Project. Nachází se zde 3 turbíny s výkonem 423 MW, celkem tedy 1269 MW. Voda do ní spadá 1883 metrů při průtoku až $75\text{m}^3/\text{s}$. [6]



Obr. 2.1.6 Oběžné kolo elektrárny Bieudron Hydro Project [8] [11]

2.2 Turbína Turgo

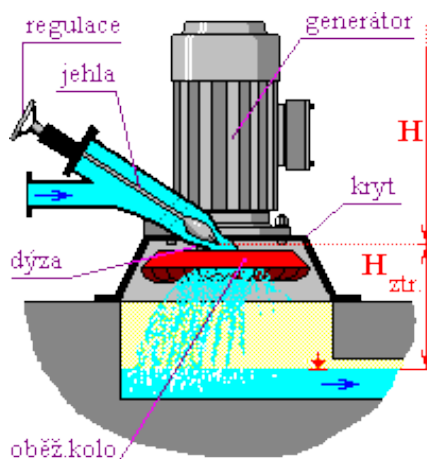
Turbína Turgo je rovnotlaká vodní turbína s parciálním ostřikem. Vynalezl ji v roce 1919 Eric Crewdson z firmy Gilkes a patentována byla v roce 1920. Funguje na podobném principu, jako Peltonova turbína, tj. voda vstupuje do potrubí, které je zakončené jednou či vícero kruhovými dýzami, nicméně dýza je umístěna šikmo vůči oběžnému kolu, jehož osa je téměř vždy uložena vertikálně. Oběžné kolo je tvořeno dvěma prstenci, mezi kterými jsou lžícovité lopatky natočeny směrem k dýze. Tvar lopatek způsobí, že vodní paprsek předá téměř všechnu kinetickou energii oběžnému kolu a poté volně odteče do odpadu.



Obr. 2.2.1 Oběžné kolo turbíny Turgo [9]

Účinnost této turbíny je vysoká, pohybuje se od 85-90%. Hlavní výhodou je fakt, že již při 20% plnění dosahuje účinnost 70%, což je výhoda především u horských toků s proměnlivým průtokem. Turbína je citlivá na udržení konstantních otáček, jinak rychle ztrácí na účinnosti. Stejně, jako Peltonova turbína, je tato určena pro menší průtoky a vyšší spády, od 10 metrů výše.

Pro regulaci turbíny se využívá zasouvací jehla v dýze, u menších toků se používá manuální zasouvání pomocí šroubu, větší průtoky mají automatickou regulaci. Pro úplné odstavení turbíny je ovšem v přívodním potrubí obvykle nainstalované šoupátko.



Obr. 2.2.2 Schéma mechanické části elektrárny s turbínou Turgo [5]

Tato turbína není moc rozšířená i přes to, že na rozdíl od Peltonovy turbíny je mnohem jednodušší na výrobu, údržbu a díky tomu levnější. [5]

2.3 Řezání vodním paprskem

Úvod

Řezání vodním paprskem je nekonvenční metoda obrábění, při které se využívá kinetické energie vody na řezání široké škály materiálů od plastů, dřeva, skla či keramiky až po měkké kovy či vysokopevnostní oceli. [4]

Počátek této technologie sahá do druhé poloviny 19. století, kdy byla využívána kalifornskými zlatokopy pro odstranění nánosů písku a kamení, tehdy ještě šlo o nízkotlaké systémy. Nicméně v první polovině 20. století byl v Rusku vynalezen a patentován systém vrtání děr v báňském průmyslu, kde již byl využíván proud vysokotlaké vody vehnaný do trysky.

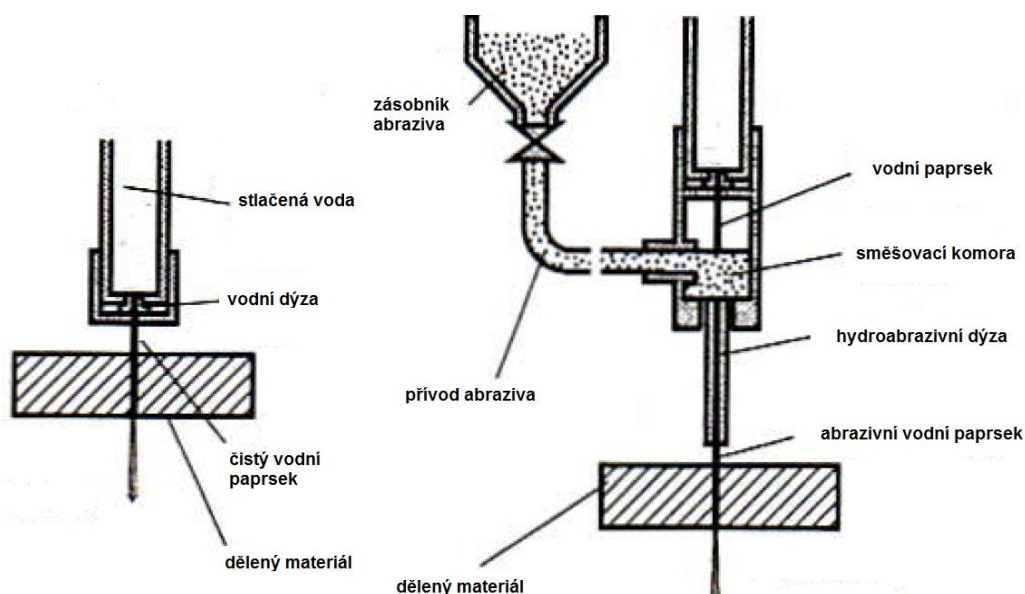
Skutečného rozvoje se tato technologie dočkala až na přelomu 70. a 80. let, kdy Dr. Mohamed Hashish vymyslel způsob přidání abraziva do proudu vody, což umožnilo použití vodního paprsku i pro řezání materiálů s vyšší pevností a větší tloušťkou. [12]

V současné době je vodní paprsek využíván stále častěji jakožto alternativa například k laseru, kde vodní paprsek vítězí nižší pořizovací cenou, která se pohybuje mezi 2 ÷ 4 miliony v základních verzích.

Princip metody

Princip současných systémů spočívá ve vodě zbavené nežádoucích prvků vehnané vysokotlakými čerpadly (10 až 75 kW) a za vysokých rychlostí do úzké trysky. Řezací hlava je řízena NC či CNC systémem. Velikost tlaku (500 až 6500 Bar) a průtoku (1,2 až 7,6 l/min) závisí na tloušťce řezaného materiálu (0,1 až 250 mm) a především druhu materiálu. Výhoda této metody spočívá v tom, že na rozdíl od jiných obráběcích metod nedochází k tepelnému ovlivnění rezné plochy. Na typu obráběného materiálu závisí hlavní rozdělení typu vodního paprsku a to: [12] [13] [15]

- Řezání vodním paprskem bez abrazivní příměsi
- Řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí



Obr. 2.3.1 Rozdělení vodních paprsků bez abraziva (v levo) a s abrazivem (v pravo) [4]

Řezání vodním paprskem bez abrazivní příměsi

Technologie WJM (Water Jet Machining), jinak zvaná jako hydrodynamické obrábění pracuje na principu čistého vodního paprsku vystupujícího z trysky o průměru 0,1 až 0,5 mm, který dopadá vysokou rychlostí a kinematickou energií na obráběný materiál, kdy vzhledem k rozměru paprsku vznikne velmi tenká řezná spára. Díky těmto rozměrům lze řezat přesné geometrické tvary s minimální ztrátou materiálu. Trysky mohou být vyrobeny ze slinutých karbidů, safíru či diamantu, kdy obvykle platí, že vyšší životnost je vykoupena vyšší pořizovací cenou.

Čistý vodní paprsek se využívá pro obrábění především nekovových materiálů jako je keramika, laminát či sklo. Vzhledem k nižší pevnosti obráběných materiálů se tento způsob vyznačuje vysokou řeznou rychlostí (až 20 m/min). Využití nalezne například v potravinářském průmyslu, kde řezné rychlosti mohou dosahovat i vyšších hodnot. [4] [12] [14]

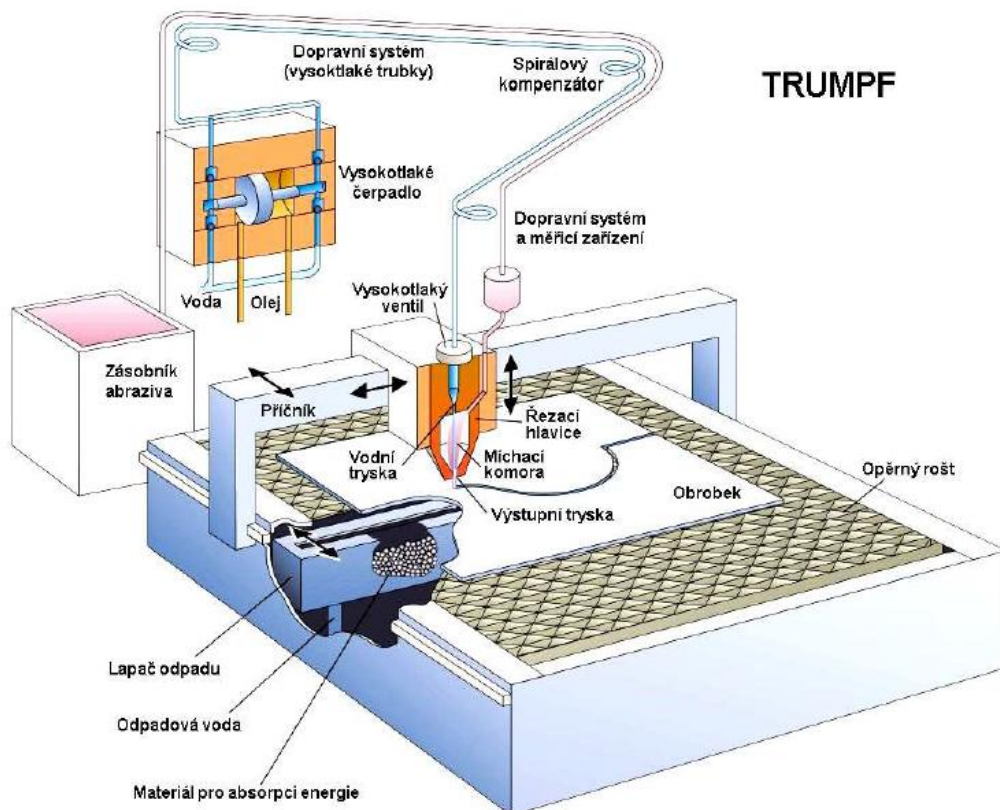
Řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí

Pokud chceme řezat materiály s vyšší pevností, nejčastěji kovy, museli bychom u vodního paprsku docílit velmi vysokých tlaků až 1000 MPa, což je velmi obtížné z důvodu nároků na výkon čerpadel a rozváděcího systému a mělo by to výrazný vliv na výslednou cenu výrobků obroběných touto metodou. Z tohoto důvodu se vodní paprsek ve směšovací komoře promíchá s jemným brusivem ať už ze syntetického, či přírodního materiálu, díky čemuž se výrazně vylepší řezná účinnost vodního paprsku. Tento způsob se nazývá technologie AWJ (Abrasive Waterjet Machining). Typ příměsi se určuje podle tvrdosti řezaného materiálu. Nejčastěji se používá granátový písek, nicméně objevit se může i olivín či karbid křemíku.

Průměr výstupního otvoru trysky je závislý na zrnitosti abraziva a pohybuje se od 0,5 až 2,5 mm. [4] [12] [14]

Hlavní součásti zařízení

Následující obrázek popisuje základní prvky stroje od firmy TRUMPF.



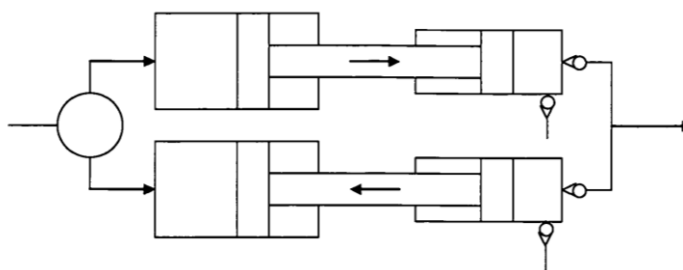
Obr. 2.3.2 Schéma stroje pro řezání vodním paprskem [16]

Hydraulická jednotka

Základ zařízení tvoří speciální vysokotlaká čerpadla, která i za pomoci multiplikátorů mají za cíl vytvořit dostatečný tlak pro vodní paprsek. V závislosti na požadovaném tlaku může jedna jednotka obsluhovat více strojů. Vysokotlaká čerpadla obvykle bývají umístěna mimo dosah obsluhy, aby v případě poruchy zařízení nebyly ohroženy lidské životy. [4]

Multiplikátor

Multiplikátor je speciální zařízení na zvýšení tlaku, které pracuje na principu poměrů pracovních ploch navzájem spojených pístem. Zvýšení tlaku se pohybuje v násobcích vstupního tlaku. [4]



Obr. 2.3.3 Multiplikátor [17]

Akumulátor tlaku

Akumulátor tlaku je vysokotlaká nádoba, která se používá pro vyrovnání rázů potrubí způsobených multiplikátorem. Cílem akumulátoru je udržet stabilní tlak a rychlost vody proudící z trysky. [4]

Úprava vody

Pokud chceme dosáhnout maximální životnosti jak dýzy, tak přívodního potrubí či ventilů a těsnění, musíme používat vodu zbavenou všech nečistot a minerálů. Mezi základní způsoby úpravy vody patří

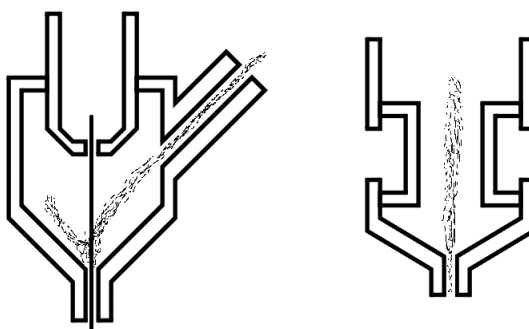
- **Filtrace** - k základním metodám úpravy vody patří použití systému filtrů pro separování pevných částic od částic kapalných.
- **Změkčování vody** – odstranění vápníku a hořčíku
- **Deionizace** – pomocí syntetických přiskyřic se snažíme z vody odstranit rozpuštěné ionty
- **Reverzní osmóza** – voda za vysokého tlaku prostupuje polopropustnou membránou, kde jsou zachycovány nečistoty [4]

Rozvodné potrubí

Potrubí a různé armatury musí být vyrobeny z nerezové oceli. Toto potrubí musí být flexibilní vzhledem k tomu, že řezný pohyb koná tryska s vodním paprskem. [4]

Dýza

K promíchání abraziva s vodou dochází ve směšovací komoře. Existují dva základní typy a to s radiální či axiálním přívodem abraziva.



Obr. 2.3.4 Řez směšovací komorou s radiálním (v levo) a axiálním přívodem abrazivní příměsí (v pravo) [23]

Výhoda radiálního přívodu abrazivní příměsí spočívá v jednoduché konstrukci a možnosti použití této dýzy i pro řezání čistým vodním paprskem. Naopak výhodou axiálního přívodu je rovnoměrnější promíchání brusiva s vodním paprskem, čímž dochází i k nižšímu opotřebení obvodu dýzy. Nicméně je náročnější na výrobu a tím pádem jsou vyšší pořizovací náklady.

Vzhledem k velkým abrazivním účinkům abraziva musí být přívodní potrubí i směšovací komora vyrobena z odolného materiálu, často je využíván karbid wolframu. Životnost takové trysky při běžných podmínkách (tlak 4100 Bar, křemičitý písek o

zrnitosti 0,4 mm) se pohybuje kolem 100 hodin. Při využití dýzy ze safíru se životnost až zdvojnásobí. Nejlepší materiál pro výrobu dýzy z hlediska životnosti je diamant, jeho výhoda mimo jiné spočívá i v tom, že lze výstupní šterbinu vícekrát očistit od nánosů minerálů a jiných nečistot. Nicméně cena diamantové trysky se pohybuje v násobcích běžné safírové či wolframové dýzy.

Vzdálenost trysky od obráběného materiálu (anglický výraz standoff) se volí co nejmenší v závislosti na požadované přesnosti, obvykle se pohybuje kolem 2 mm. [4]

Lapač vody

Problém vodního paprsku je, že nelze nijak regulovat velikost jeho záběru. Z tohoto důvodu je pod roštem nádoba, s hloubkou obvykle 300 ÷ 600 mm, která je naplněná vodou a slouží k pohlcení kinetické energie paprsku. V případě, kdy nedisponujeme dostatečným prostorem, lze použít i nižší nádoby, v tom případě je naplněná kovovými kuličkami.

Lapač vody má ještě jednu důležitou funkci a tou je tlumení hluku, který při řezání abrazivním vodním paprskem může dosahovat až 105 dB [4], přičemž dovolená hranice podle zákona pro osmihodinovou směnu je 85 dB [18].

Výhody řezání vodním paprskem

- Vysoká produktivita práce
- Žádné tepelné ovlivnění místa řezu (studený řez), nevzniká vnitřní pnutí
- Vysoká přesnost řezu
- Nevznikají otřepy, řezná hrana obvykle nepotřebuje další opracování
- Nevznikají mikrotrhliny v okolí řezu
- Lze řezat i vrtat zároveň
- Odpadají náklady na výměnu či přebroušení opotřebovaných nástrojů
- Tenká řezná hrana – malý objem odpadu
- Odpad je odplaven do lapače – nevzniká polétavý prach
- Oproti trvanlivosti konvenčních nástrojů vyšší životnost dýzy
- Možnost řezání bez upínání obrobku
- Pořizovací cena stroje
- Řízení pomocí NC/CNC – snadnost obsluhy
- Přívětivé k životnímu prostředí
- Možnost řezání dílů z vrstvených materiálů [4]

Nevýhody řezání vodním paprskem

- Kontakt s vodou (pro kovové materiály riziko koroze, nutno povrch okamžitě ošetřit)
- Delší vysoušení u nasákavých materiálů

- Nelze vyrobit vnitřní ostrou hranu, závislost na průměru vodního paprsku
- Poškození podkladu
- Vyšší hlučnost
- Životnost dýzy
- Cena abraziva a náklady na recyklaci [4]

Použití

- Kosmický a letecký průmysl (řezání keramiky, kompozitů, hliníkových plechů, titanu)
- Potravinářský průmysl (dělení masa, ovoce, zeleniny, čokolády)
- Chemický průmysl (řezání výbušných látek)
- Stavebnictví (řezání žuly, izolace, azbestu)
- Strojírenství (řezání nástrojových a jiných těžkoobrobitelných ocelí, litin a kompozitů)
- Elektrotechnický průmysl (řezání plošných spojů, magnetů, keramiky)
- Gumářský průmysl
- Sklářský průmysl
- Papírenský průmysl [4]

3 Experimentální ověření věty o změně hybnosti

Pro experimentální ověření odvozených vzorců jsem navštívil laboratoř Odboru fluidního inženýrství při Energetickém ústavu, kde jsem měl silový účinek vodního paprsku na plochu získat nepřímo pomocí zjištěného průtoku kapaliny skrze dýzu.

3.1 Měření a zpracování dat

Popis měřícího přístroje

Měření jsem prováděl na zařízení, kde byla voda pomocí čerpadla dopravena z dolní nádrže do horní, kde byla konstantní výška hladiny udržována pomocí přepadové hrany. Voda odchází potrubím na dně nádrže, průtok se seřizuje dle potřeby pomocí ventilu. Za tímto ventilem je umístěna dýza s výstupním průměrem 11,75 mm, ze které vodní paprsek dopadá na rovinnou desku. Rozměry této desky jsou mnohem větší než průměr paprsku, čímž je zajištěn odklon všech proudových vláken paprsku o 90°. Tato deska je připevněna na otočném čepu společně s pákou, na které je posuvné závaží s měrkou, kde jsem si nastavil teoretickou hodnotu síly F . Po otevření ventilu jsem si zajistil požadovaný průtok pomocí měřky, kterou je potřeba orientovat do svislého směru.



Obr. 3.1.1 Experimentální zařízení



Obr. 3.1.2 Silová rovnováha

Voda po dopadu na desku padá do střední nádrže. Zde bylo potřeba několik minut počkat, než se dostatečně ustálí hladina v nádrži. Až poté jsem pomocí tyčkového indikátoru mohl odečíst výšku hladiny.

Popis měření

Vzhledem k tomu, že experimentální zařízení se připravuje na rekonstrukci, nebyl zde k dispozici digitální měřič průtoku, který by mi velice usnadnil a především zpřesnil naměřené hodnoty. Spokojit jsem se tedy musel s méně přesnou metodou, která spočívala ve změření změny výšky hladiny v nádrži, kdy znám parametry trojúhelníkového přepadu a pomocí těchto údajů jsem si následně vypočítal průtok Q .

Jako první jsem si změřil nulovou výšku, tj. vzdálenost od výchozí hodnoty tyčkového indikátoru, kdy hladina dosahuje počátku přepadu. Naměřil jsem 100 [mm], od této hodnoty budu později odečítat naměřené výšky pro různé průtoky.

Následně jsem měřil sílu paprsku po 0,5 N, byl to nejmenší možný krok, měřka nedovolovala přesnější měření. U nejnižších hodnot 0,5 a 1,0 N je zřetelně vidět vliv tíhového zrychlení na tvar proudových vláken viz obr. 3.1.3. Dá se tedy očekávat výraznější odchylka od nastavené hodnoty.



Obr. 3.1.3 Vliv tíhového zrychlení na tvar paprsku

Při zvýšení průtoku tento problém vymizel a opticky nešlo poznat zakřivení již na hodnotě 1,5 N. Bohužel další problém nastal na maximální nastavitelné síle, kterou toto zařízení s danou výškou a průtokem dokázalo vyvinout, na síle 2,5 N. Zřejmě kvůli nečistotám v dýze se vodní paprsek mírně vychýlil směrem vzhůru, což mělo vliv na nastavení průtoku pomocí výchylkové měřky a tudíž se dá předpokládat, že výsledná hodnota se bude výrazně lišit od předpokladu.



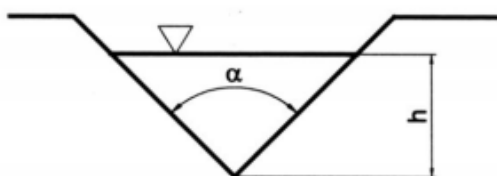
Obr. 3.1.4 Vychýlení paprsku při vyšším průtoku

Naměřené a vypočtené hodnoty

Průtok Q_v se vypočítá pomocí odvozeného vzorce pro trojúhelníkový přepad: [19]

$$Q_v = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (3.1)$$

Kde μ je součinitel přepadu, g tíhové zrychlení, α je úhel který svírají odvěsny trojúhelníka a h je výška přepadu, tj. hodnota, kterou získáme odečtením výšky hladiny při nastaveném průtoku od nulové hladiny h_0 .



$$\begin{aligned} \mu &= 0,5926 \\ \alpha &= 90^\circ \end{aligned}$$

Obr. 3.1.5 Trojúhelníkový přepad [19]

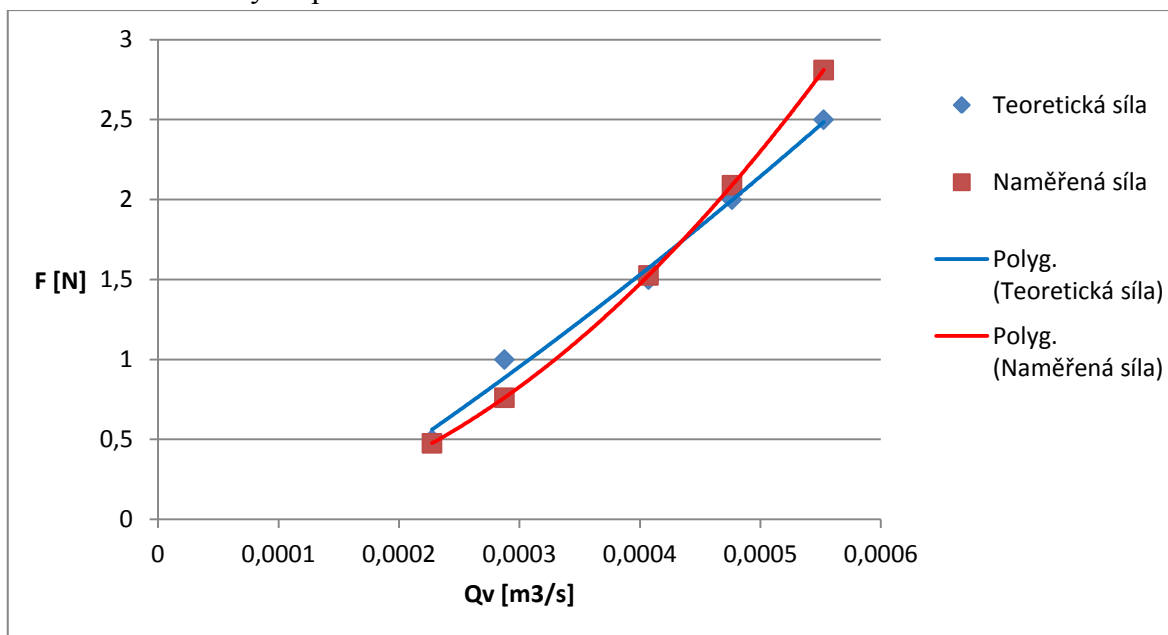
Pro výpočet síly jsem použil dříve odvozenou rovnici, ale jelikož v rovnici figuruje rychlost, kterou neznám, z rovnice kontinuity jsem si rychlost vyjádřil jako Q_v/S a dosadil:

$$F = \rho \cdot Q_v \cdot v = \rho \cdot \frac{Q_v^2}{S} \quad (3.2)$$

Tabulka 1 Naměřené a vypočítané hodnoty silových účinků

Pořadí měření	Naměřená výška [mm]	Výška přepadu [mm]	F [N]	Q_v [m ³ /s]	F_v
1	69,5	30,5	0,5	0,00022744	0,4762
2	66,5	33,5	1,0	0,00028756	0,7612
3	61,5	38,5	1,5	0,00040716	1,5261
4	59,0	41,0	2,0	0,00047651	2,0902
5	56,5	43,5	2,5	0,00055250	2,8101

Graf 1 Závislost síly na průtoku



3.2 Diskuze výsledků

Jak můžeme vidět v tabulce, první hodnota 0,5 N se i přes mé obavy kvůli malé rychlosti paprsku a tudíž nezanedbatelnému vlivu tíhového zrychlení nijak výrazně neliší od ideální. Naopak výraznější propad vidíme na hodnotě 1,0 N. Další dvě hodnoty poměrně přesně kopírují předpoklad, nicméně na hodnotě 2,5 N vidíme opět výraznější odchylku způsobenou výše zmíněnou dýzou.

V samotném měření bylo přítomno mnoho nejistot měření, které ovlivnily výsledek. První nepřesnost byla již zmíněna, pravděpodobně ji způsobily nečistoty v trysce a měly za následek mírnou odchylku při vyšších průtocích. Druhý problém způsobila poměrně velká vzdálenost mezi tryskou a rovinnou deskou, kvůli které jsem mohl pozorovat především u nižších průtoků problémy s vlivem tíhového zrychlení. Tato nepřesnost zapříčinila, že paprsek nedopadal kolmo a tudíž se hodnoty odchýlily od očekávání. Další problém způsoboval trojúhelníkový přepad, kde kvůli kapilárním jevům bylo obtížné určit klidovou hladinu. Poslední nejistotu představuje výchylová měrka, která dovoluje jen přibližné nastavení silové rovnováhy.

Část těchto nejistot by šlo odstranit instalací digitálního průtokoměru, problém s přesností u vyšších průtoků zase pravidelnější údržbou přístroje. Nicméně i přes všechny vyjmenované problémy je z grafu patrné, že platnost rovnic pro silový účinek vodního paprsku na rovinnou plochu byl potvrzen.

4 Závěr

V kapitole Teorie hydrodynamiky byly uvedeny zákony o proudění kapalin pro ideální i skutečnou kapalinu. Dále byly uvedeny dva základní přístupy k odvození rovnice pro stanovení akční síly od vodního paprsku. Jedná se o odvození z Eulerovy rovnice hydrodynamiky a odvození z věty o změně hybnosti.

Druhá kapitola pojednává o využití síly vodního paprsku. Jedna z možností spočívá v přeměně energie v elektrickou pomocí Peltonovy turbíny. Tento způsob výroby elektřiny z vody patří mezi nejčistší a zároveň nejlevnější způsoby výroby elektrické energie. Naše toky však nemají dostatečný průtok či spád, čímž jsou v České republice spíše doplňkový zdroj, ale díky jejich schopnosti rychlého najetí na plný výkon však mohou efektivně vyrovnávat deficity v elektrické přenosové soustavě. Vlivem výše zmíněného nedostatečného spádu jsou na území ČR instalovány Peltonovy turbíny pouze malých výkonů v malých vodních elektrárnách případně jako mikroturbíny.

Pro sílu vodního paprsku se lidé snažili najít další využití. Jednou z nich a pro technickou praxi jedna z nejdůležitějších aplikací je v této práci popsání řezání vodním paprskem. Tento nekonvenční způsob obrábění je znám poměrně dlouhou dobu, ale až v posledních letech prochází progresivním vývojem. Tato technologie v sobě kombinuje výhody třískového obrábění jako je produktivita či kvalita obrobeneho povrchu, přináší však další benefity v podobě nulového tepelného ovlivnění obrobku či odpadající potřeba přebroušovat nástroje. Tento způsob dělení materiálu se již nepoužívá pouze ve strojírenství nebo stavebnictví, ale najdeme ho například i v potravinářském průmyslu. To jen podtrhuje obrovský potenciál této technologie.

V praktické části bylo provedeno měření na stanici vodního paprsku. Odchylku od předpokládaných hodnot můžeme pozorovat na obou koncích měřeného intervalu. Maximální odchylku 0,3101 N při průtoku 0,00055250 m³/s jsem pozoroval na hodnotě 2,5 N. Příčinou této difference byl vodní paprsek, který nedopadal na rovinnou desku kolmo, což způsobily nečistoty v trysce a vliv tíhového zrychlení. Naměřené hodnoty nicméně kopírují teoretické předpoklady.

Seznam obrázků

Obr. 1.1.1 Rychlost proudící tekutiny [22].....	10
Obr. 1.1.2 Proudící trubice [1]	11
Obr. 1.3.1 Silová rovnováha v proudové trubici [2]	14
Obr. 1.4.1 Schéma pro odvození Bernoulliho rovnice [20]	17
Obr. 1.4.2 Schéma vodní vývěvy [21].....	17
Obr. 1.4.3 Ilustrace kontrolního objemu	19
Obr. 1.7.1 Paprsek dopadající na plochu [2]	20
Obr. 2.1.1 Oběžné kolo Peltonovy turbíny [1]	23
Obr. 2.1.2 Schéma mechanické části vodní elektrárny s Peltonovou turbínou [5]	24
Obr. 2.1.3 Schéma dělení vodního paprsku [5]	24
Obr. 2.1.4 Průřez dýzou [5]	25
Obr. 2.1.5 Schéma odklonu paprsku pomocí deflektoru (obr. vlevo) a deviátoru (obr. vpravo) [2]	25
Obr. 2.1.6 Oběžné kolo elektrárny Bieudron Hydro Project [8] [11]	26
Obr. 2.2.1 Oběžné kolo turbíny Turgo [9]	27
Obr. 2.2.2 Schéma mechanické části elektrárny s turbínou Turgo [5]	27
Obr. 2.3.1 Rozdělení vodních paprsků bez abraziva (v levo) a s abrazivem (v pravo) [4]	28
Obr. 2.3.2 Schéma stroje pro řezání vodním paprskem [16]	30
Obr. 2.3.3 Multiplikátor [17]	30
Obr. 2.3.4 Řez směšovací komorou s radiálním (v levo) a axiálním přívodem abrazivní příměsí (v pravo) [23]	31
Obr. 3.1.1 Experimentální zařízení	34
Obr. 3.1.2 Silová rovnováha	35
Obr. 3.1.3 Vliv tíhového zrychlení na tvar paprsku	35
Obr. 3.1.4 Vychýlení paprsku při vyšším průtoku	36
Obr. 3.1.5 Trojúhelníkový přepad [19]	36

Seznam použitých zdrojů

- [1] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2016-02-11]. ISBN 978-80-248-1508-4. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Drabkova-Mechanikatekutin.pdf>
- [2] ŠOB, František. *Hydromechanika*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 238 s. ISBN 80-214-2037-5.
- [3] JANALÍK, Jaroslav a Pavel ŠTÁVA. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0038-1.
- [4] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.

Seznam internetových zdrojů

- [5] Abeceda malých vodních pohonů. [online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz>
- [6] PICK Vladimír. VTM. [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/clanek/kolaps-a-zachrana-alpske-elektrarny>
- [7] Černé jezero. [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/obnovitelne-zdroje/voda/cerne-jezero.html>
- [8] Hydroworld. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.hydroworld.com/content/dam/etc/medialib/new-lib/hrw/print-articles/Vol-20/issue-4/39716.res/_jcr_content/renditions/pennwell.web.400.390.jpg
- [9] Pentair. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.southerncross.pentair.com/images/ProductImages/Turbines/Turgo_Hydro_Turbines.png
- [10] PB Swiss Tools. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.pbswisstools.com/en/service/media/company-news/shooting-2014/arch-dam.html>
- [11] Pelton wheel. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://i01.i.aliimg.com/img/pb/603/541/777/777541603_632.jpg
- [12] Vodní paprsek. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.vodnipaprsek.com/clanky/o-vodnim-paprsku.html>
- [13] HomeN VŠB. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>
- [14] WaterJets. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.waterjets.org>
- [15] Awac. [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.awac.cz/cz/2-Rezani-vodnim-paprskem-br-a-vyroba-dilu/1>

- [16] HUMÁR, A., *Technologie I – Technologie obrábění – 3.část.* [online]. [cit. 2016-02-13]. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2005. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl_met_obr/C/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [17] Google Patents. [online]. [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://patentimages.storage.googleapis.com/EP1985866A1/imgf0001.png>
- [18] DANDOVÁ, Eva. [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: http://bozpinfo.cz/rady/otazky_odpovedi/ochrana_pred_riziky/limity_hluku070328.html
- [19] Hydromechanika. [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: https://sites.google.com/site/5hydromechanika/laboratorni-cviceni/navod_paprsek.pdf
- [20] Wikipedia. [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/BernoullisLawDerivationDiagram.png>
- [21] ERBEN, Milan. *Vakuová technika.* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf>
- [22] ŠEVČÍK, Radek. [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://mog.wz.cz/fyzika/1rocnik/kap403_soubory/image001.jpg
- [23] Engineer on a disk [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://engineeronadisk.com/notes_manufact/abrasivea5.html
- [24] Study Energy Web [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/file/561_1_1/

Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratka	Jednotka	Popis
ERDH	[-]	Eulerova rovnice hydrodynamiky

Symbol	Jednotka	Popis
D	[m]	Kontrolní průměr
F	[N]	Síla
F_m	[N]	Vnější hmotnostní (objemová) síla
F_p	[N]	Tlaková síla
F_s	[N]	Setrvačná síla
F_t	[N]	Třecí síla
H	[kg.m.s ⁻²]	Průtoková hybnost
Q_m	[kg.s ⁻¹]	Hmotnostní průtok kapaliny
Q_v	[m ³ .s ⁻¹]	Objemový průtok kapaliny
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Re_{krit}	[-]	Kritická hodnota Reynoldsova čísla
S	[m ²]	Obsah průřezu potrubí
S₁	[m ²]	Kontrolní plocha
V	[m ³ g]	Objem
Y_z	[J.kg ⁻¹]	Ztrátová energie v potrubí
a	[m.s ⁻²]	Hmotnostní zrychlení
a_k	[m.s ⁻²]	Konvektivní zrychlení
a_s	[m.s ⁻²]	Setrvačné zrychlení
a_t	[m.s ⁻²]	Lokální zrychlení
d	[m]	Průměr potrubí
g	[m.s ⁻²]	Tíhové zrychlení
h_z	[m]	Ztrátová výška
l	[m]	Délka
m	[kg]	Hmotnost
n	[-]	Normálový vektor

p	[Pa]	Tlak
p_z	[Pa]	Tlaková ztráta v potrubí
t	[s]	Čas
u	[m.s ⁻¹]	Unášivá rychlost lopatky oběžného kola
v	[m.s ⁻¹]	Rychlost tekutiny
z	[m]	Výška
Γ	[m ²]	Kontrolní plocha
α	[°]	Úhel mezi vodním paprskem a dopadovou plochou
ζ_c	[-]	Celkový ztrátový součinitel
ζ_l	[-]	Součinitel ztrát po délce
ζ_m	[-]	Součinitel místních ztrát
η	[Pa.s]	Koeficient dynamické viskozity
ν	[m ² .s ⁻¹]	Kinematická vazkost proudící tekutiny
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota
τ	[Pa]	Tečné napětí