

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ÚLOHA SACÍ TROUBY PRO PRÁCI VODNÍ TURBÍNY DRAFT TUBE ROLE IN HYDRAULIC TURBINE PERFORMANCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL HAVLÁT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Havlát

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Úloha sací trouby pro práci vodní turbíny

v anglickém jazyce:

Draft tube role in hydraulic turbine performance

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sací trouba je difuzorem umístěným na konci vodní turbíny. Jejím úkolem je zpracování té části spádu, která nebyla využita oběžným kolem. Především u nízkošpádových elektráren hraje velice důležitou roli. Cílem závěrečné práce je provést rešerši literatury zabývající se sací troubou. Hlavním úkolem je zaměřit se na veličiny ovlivňující její účinnost.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše literatury se zaměřením na účinnost sací trouby, problematiku vírového copu a vliv vstupního rychlostního pole.

Seznam odborné literatury:

1. Nechleba, M.: Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství. SNTL. 1962
2. Raabe, J: Hydro Power, The Design, Use, and Function of Hydromechanical, Hydraulic and Electrical Equipment. Düsseldorf: VDI Verlag, 1985. 684 s. ISBN 3-18-400616-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 24.11.2008

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o problematice sací trouby. Obsahuje základní popis sacích trub, jejich rozdělení a užití. Dále je zde popsána konstrukce sacích trub, jejich účinnost, ztráty a způsoby, s pomocí kterých lze tyto ztráty eliminovat. Součástí jsou také základní vztahy pro výpočty délky sací trouby, rychlosti kapaliny uvnitř sací trouby a další.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the problems of draft tube. It contains basic description of draft tubes, their division and possibilities of their utilizations. Further, this thesis focuses on description of draft tubes, their efficiency, losses and ways to eliminate these losses. One part of this work also mentions basic relationships required for computing length of draft tube, velocity of the fluid in the draft tube and others.

Klíčová slova:

Vodní energie, sací trouba, kužel, koleno sací trouby, vodní turbína, oběžné kolo, vírový cop

Key words:

Water energy, draft tube, cone, draft tube elbow, water turbine, runner, vortex rope

Bibliografická citace

HAVLÁT, P. *Úloha sací trouby pro práci vodní turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 26. května 2009

.....

Podpis

Poděkování

Úvodem této bakalářské práce bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli potřebné informace k dané problematice, zvláště pak děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlovi Rudolfovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a náměty, čímž mi významně pomohl ke zpracování daného tématu.

Obsah

Úvod	15
1 Sací trouba.....	17
1.1 Sací trouba	17
1.2 Účel sací trouby	17
1.3 Rozdělení sacích trub	19
1.3.1 Sací trouby kuželové přímé	19
1.3.2 Sací trouby kuželové kolenové	19
1.3.3 Násoska	22
1.4 Vývoj konstrukce sacích trub.....	23
2 Účinnost a zisk sací trouby	25
2.1 Účinnost sací trouby	25
2.2 Energetický zisk sací trouby	25
2.3 Ztráty v sací troubě	27
2.4 Způsoby dosažení co nejvyšší účinnosti sací trouby	27
3 Vírový cop v sací troubě	28
3.1 Charakteristika vírového copu	28
3.2 Kavitace a princip vzniku vírového copu	29
3.3 Způsoby zabránění vzniku vírového copu	30
Závěr	33
Seznam použitých zdrojů	35
Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin.....	37

Úvod

Vodní energie je v celé historii lidstva nejdéle využívanou formou energie v přírodě. Její využívání je neoddělitelně spjata s vývojem civilizace. Vodní energie je zdrojem relativně dostupným, čistým a především zdrojem obnovitelným. Voda v přírodě je nositelem energie chemické, tepelné a především mechanické.

Pojem mechanická energie vod v sobě zahrnuje mechanickou energii různých zdrojů. Z hlediska technického využití vodní energie je však nejvýznamnější mechanická energie vodních toků. Využívá se její forma potenciální (polohová) energie a okrajově i kinetická (rychlostní) energie. [2] Při využívání energie vodních toků se voda vlivem gravitace dostává z poloh vyšších do poloh nižších. Z místa s nejnižší potenciální energií (moře) se voda opět vrací na místa vysoké potenciální energie, a to působením slunečního tepla, které udržuje tento koloběh vody v přírodě.

Zatímco např. využívání mechanické energie moří je spíše ve stadiu experimentů, lze energii vodních toků využívat již zvládnutým strojně-technologickým zařízením poměrně vysoké technicko-ekonomické úrovně. V současnosti většinou ve vodních elektrárnách. Nutnou a podstatnou součástí každého vodního díla je vodní motor (turbína), tj. stroj ve kterém dochází k transformaci energie vodního toku (hydraulické energie) na energii mechanickou. [2] Efektivitě tohoto procesu transformace energie napomáhá postupně celá řada konstrukčních inovací i prvků, které dokáží výrazným způsobem ovlivnit účinnost celého soustrojí. Jedním z takových prvků je sací trouba. Toto zařízení má velký význam pro využití vodní energie, která se nedokázala předat při průchodu vodní turbínou.

1 Sací trouba

1.1 Sací trouba

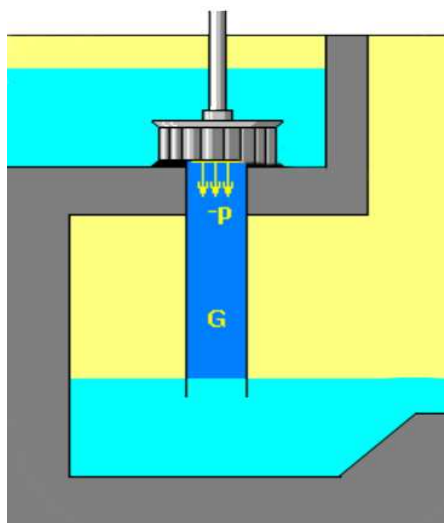
Sací trouba nebo zkráceně savka je pojmem vyskytujícím se většinou v souvislosti s přetlakovými turbínami. U turbín rovnotlakých by použití savky nemělo příliš velký smysl, protože savka pracuje na principu rozdílných tlaků vody před a za turbínou. U rovnotlakých turbín proto mluvíme o odpadním potrubí. Pouze tehdy, je-li za oběžným kolem sloupcem vody vytvořený podtlak, hovoříme o savce.

Ačkoliv skutečným otcem savky je německý technik Henschel (1837), její přednosti naplno vynikly až u turbíny Francisovy, patentované v roce 1848. Díky savce bylo možno umístit turbínu téměř v libovolné výšce nad spodní hladinou, aniž bychom tím přišli o účinný spád. Stroj tak mohl být snáze přizpůsobený potřebám provozovny i dané lokalitě. Často odpadly složité převody a částečně se eliminovalo nebezpečí zatopení strojovny. To byl jeden ze zásadních důvodů, který způsobil rychlé rozšíření Francisovy turbíny do celého světa. [5]

1.2 Účel sací trouby

U přetlakových Francisových a Kaplanových turbín se sacích trub všeobecně používá, přičemž jde v podstatě o dva hlavní účely:

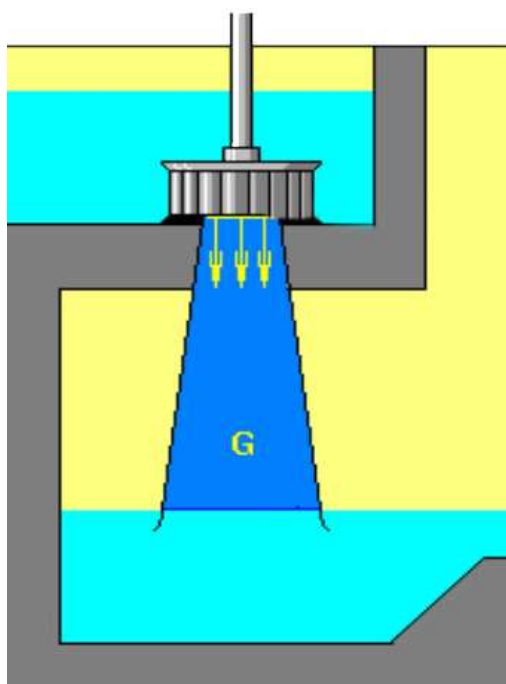
- a) Umožňuje umístění oběžného kola nezávisle na hladině v dolní nádrži. Abychom neztratili nic z účinného spádu, museli bychom oběžné kolo turbíny umístit pod hladinu spodní vody. To by ovšem znamenalo, že by byla strojovna kompletně zatopená, což by znesnadňovalo přístup ke stroji a jeho údržbu. Tento problém řeší savka, která spojuje těsným spojením turbínu se spodní hladinou a vytváří tak plný sloupec vody. Tento sloupec pak svojí tíhou vytváří za oběžným kolem podtlak, který je přímo úměrný výšce vodního sloupce v savce. Tím neztratíme nic ze spádu a turbínu můžeme umístit do jakékoli výšky nad spodní hladinu až do mezí vycházejících z poměru kavitačních vlastností stroje. [5] Tento účinek savky nazýváme hydrostatickým. Nastává i u savek s nerozšiřujícím se průřezem (obr.1.1).



Obr.1.1 Nerozšiřující se potrubí sací trouby [5]

- b) Sací trouba umožňuje částečné využití výtokové rychlosti z oběžného kola turbíny, což se označuje jako energetický zisk savky. Tato její funkce je důležitější než první zmiňovaná a spočívá v tom, že savka dokáže zužitkovat energii vody, která by jinak zbytečně unikala.

Voda opouští oběžné kolo poměrně velkou rychlostí. Protože se již dostala mimo dosah lopatek, je tato zbytková energie zdánlivě nevyužitelná. Nikoliv však, použijeme-li za oběžným kolem turbíny pozvolna se rozšiřující savku, jako na obr.1.2. Odpadní voda proudící kuželem je nucena zaujímat čím dál tím širší průřez. V širším průřezu kapalina samozřejmě musí proudit pomaleji. Důsledkem toho vzniká za turbínou výrazný podtlak, který se přenáší sloupcem vody zpět až na lopatky oběžného kola turbíny. Přeměna pohybové energie na tlakovou se v savce řídí Bernoulliho rovnicí. Účinnost této přeměny u přímých savek dosahuje 70% až 90% a u savek kolenových 60% až 85%. [5] Tento účinek savky můžeme nazvat účinkem hydrodynamickým.



Obr.1.2 Rozšiřující se potrubí sací trouby [5]

Za oběžným kolem je tedy podtlak způsobený nejen tím, že je turbína v určité výšce nad spodní vodou, ale sčítá se s podtlakem vznikajícím zpomalením vody v savce. Při velkých výtokových rychlostech z oběžného kola (zejména u Kaplanových turbín) může být tento podtlak značně velký a může být často jednou z příčin kavitace.

Čím rychloběžnější je turbína, tím větší rychlostí opouští voda její oběžné kolo. Tím by také byla větší ztráta, kdyby se za oběžným kolem savka nepoužila. Proto pro většinu moderních přetlakových turbín je savka naprostou nezbytností zaručující jejich dobrou hydraulickou účinnost. [5]

1.3 Rozdělení sacích trub

Sací trouby lze dělit podle jejich tvaru a to jak podle tvaru průřezu, tak podle toho, zda se po jejich délce mění směr proudnice. Tím se myslí, mění-li se směr proudění kapaliny v savce vlivem vložení kolena.

1.3.1 Sací trouby kuželové přímé

Nejdokonalejší přeměnu rychlosti kapaliny na tlak dává sací trouba kuželová přímá. Kónus se však nesmí příliš rozšiřovat, aby nedošlo k odtržení kapaliny od stěn sací trouby. Uspořádané proudění v sací troubě je omezeno na kužel o vrcholovém úhlu do mezních hodnot 8° až 13° . Při menších vrcholových úhlech vychází, pro danou výtokovou rychlost (výtokovou plochu) sací trouby, kužel příliš dlouhý a ztráty třením kapaliny o prodloužené stěny zmenšují účinnost sací trouby. Mimo to je ze stavebních důvodů žádoucí, aby savka byla co nejkratší. Podmínku vhodné kuželovitosti sací trouby vyjadřuje vztah:

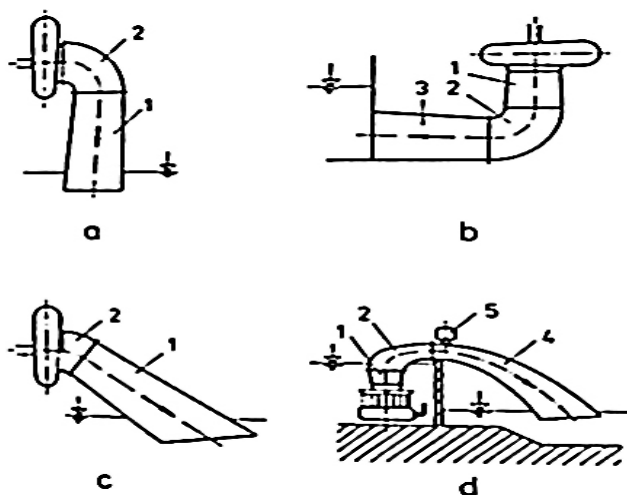
$$(S_4^{0,5} - S_3^{0,5}) \cdot l^{-1} = 1/5 \text{ až } 1/8 \quad (1.1)$$

kde S_4 je plocha koncového průřezu sací trouby, S_3 plocha počátečního průřezu sací trouby a l je jejich osová vzdálenost (délka sací trouby). Tento vztah platí i pro nekruhové průtokové průřez, předpokládá se však rovnoměrné rozšiřování průtokových průřezů po celé délce sací trouby. [2]

Pokud konstrukcí vstupní části savky dovolíme, aby mohla voda vstupovat do savky s větší rotací, tak kužel savky může mít i vyšší vrcholový úhel než 8° až 13° . Na rotující kapalinu totiž působí odstředivá síla a to zabraňuje odtržení kapaliny od stěny difuzoru.

1.3.2 Sací trouby kuželové kolenové

Ve výstupním průřezu sací trouby S_4 nemá být rychlost c_4 menší než $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aby se v sací troubě nehromadil vzduch. Přitom poměrná výtoková ztráta $0,5 \cdot \alpha_4 c_4^2 \cdot E^{-1}$ nemá překročit hodnotu 0,04. Tato podmínka vede u axiálních turbín, kde vstupní rychlost vody do savky je vysoká, k příliš dlouhé sací troubě. Proto je nutné u rychloběžných vertikálních turbín provést sací troubu zahnutou, aby větší část její délky byla vodorovná. U turbín horizontálních se skoro vždy musí užít kolena. [2]

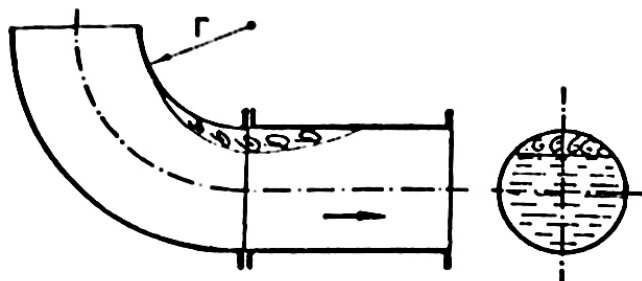


Obr.1.3 Varianty řešení kolenových kuželových sacích trub [2]

a - s jedním difuzorem
b - se dvěma difuzory
c - se šikmým difuzorem
d - s násoskou

1 - difuzor
2 - koleno
3 - výstupní difuzor
4 - difuzor násosky
5 - zavzdušňovací ventil

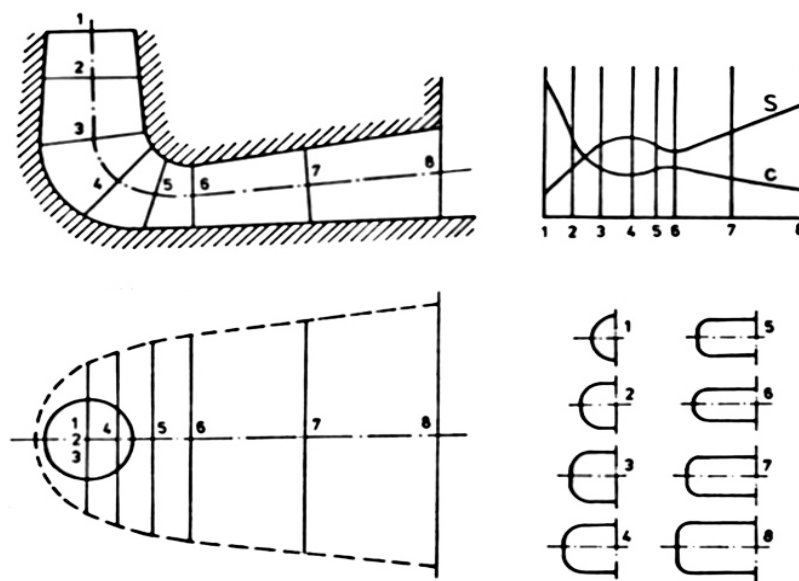
Vložení kolena do sací trouby, ať horizontálních či vertikálních turbín, je vždy nepříznivé, a to proto, že se na vnitřní straně kolena tvoří víry, které pohlcují kinetickou energii vody. Vložení kolena do sací trouby je nepříznivé tím více, čím větší rychlostí proudí kapalina kolenem. Proto se někdy umísťuje před koleno část kuželové trouby (difuzor). Bezprostřední napojení kónusu za kolenem je horší než napojení přímého válcového úseku. Vysvětlení je patrné z obr.1.4.



Obr.1.4 [2]
Schéma vírové oblasti na vnitřní straně kolena

V koncové části kolena se vytváří na straně menšího poloměru zakřivení prostor vyplněný víry. Tento prostor zmenšuje průtokový průřez, přičemž víry pohlcují část energie kapaliny. Když se bezprostředně za koleno napojí difuzor, rozšíří se do něho vírová oblast a tím se naruší funkce difuzoru. Jestliže následuje za kolenem úsek s přímou troubou, pak proud kapaliny má příležitost přilehnout ke stěně trouby a účinnost kolenové sací trouby se zlepší. Pak difuzor připojený na konci přímé trouby může nerušeně uplatnit svoji funkci. Z této úvahy plyne směrnice pro konstrukci kolenové sací trouby. [2]

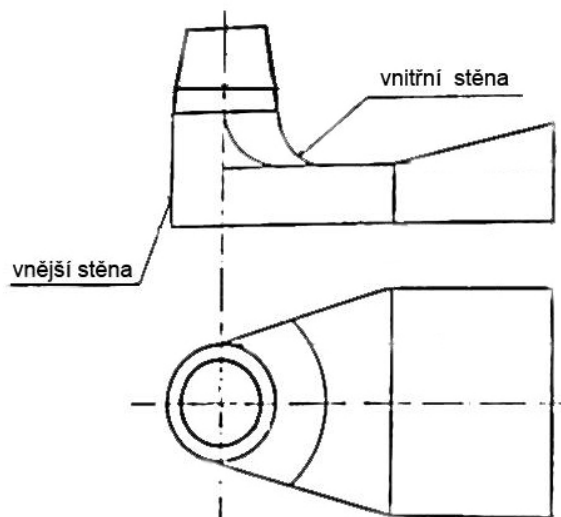
Hlavní zásadou je zabránit odtržení kapaliny od stěny kolena. Toho se dosáhne tak, že průtokové průřezy kolena v jeho výstupní části se zmenšují, asi tak jako kdyby se na obr.1.4 provedla vnitřní stěna kolena po hraniční ploše mezi oblastí nerušeného proudění a oblastí vírů. Za touto oblastí může pak pokračovat zvětšování průtokové plochy sací trouby. Vzorec (1.1) se použije jen na ty části sací trouby, v nichž dochází ke zmenšování průtokové rychlosti. Horizontální část sací trouby přechází v obdélníkový průřez, aby výškový rozměr sací trouby zůstal malý. Tím dostává sací trouba s kolenem vzhled znázorněný na obr.1.5. V tomto obrázku je vyznačen průběh rychlosti c a průtokové plochy sací trouby podél rozvinuté střední proudnice (úsek 1 až 8). [2]



Obr.1.5 Schéma pro tvarování kolenové sací trouby [2]

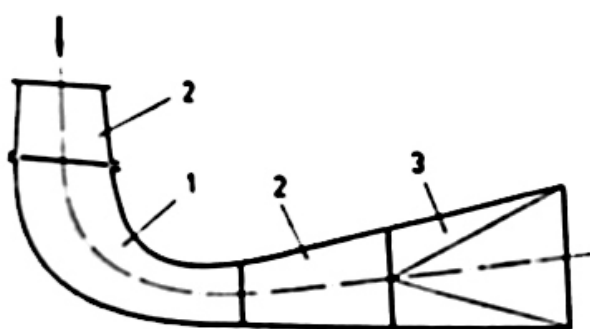
Vlivem obvodové složky rychlosti vzniká za oběžným kolem u kolenových sacích trub nerovnoměrný výtok ze sací trouby. Přesto však má taková sací trouba lepší účinnost než sací trouba, ve které by bylo rovnoměrného výtoku dosaženo násilným potlačením obvodové složky rychlosti, např. vkládáním žeber za oběžné kolo nebo do kolena savky. [1]

Hlavním zdrojem ztrát v koleně sací trouby je tedy vnitřní stěna s ostřejším zakřivením. Na vnější stěně tolik nezáleží, což dokazuje pravoúhlá sací trouba (tzv. Kaplanova sací trouba), u níž vnější stěna mění svůj směr pod pravým úhlem. Na obr.1.6 je tvar takové sací trouby.



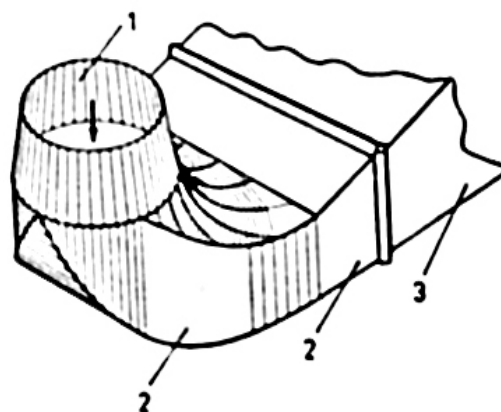
Obr.1.6 Pravoúhlá sací trouba

Tyto trouby se ale dnes už moc nepoužívají. Prudký ohyb se totiž vyplní vodním polštářem, který však není zcela nehybný. Jeho pohyb absorbuje část energie kapaliny a proto tato sací trouba má přece o něco nižší účinnost než dobře zhotovená sací trouba s oblým přechodem (obr.1.7), popř. její varianta na obr.1.8, které vyžadují velmi hladký povrch vnější obtékané stěny. [1] [2]



Obr.1.7 Kolenová sací trouba s obdélníkovým výstupním průřezem [2]

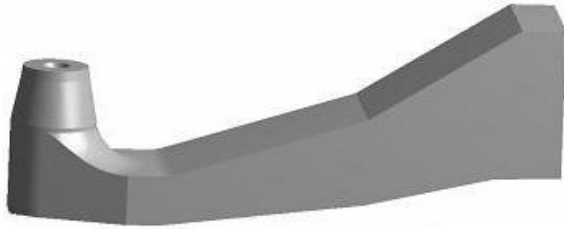
- 1 - koleno
- 2 - difuzor
- 3 - přechodový výstupní difuzor



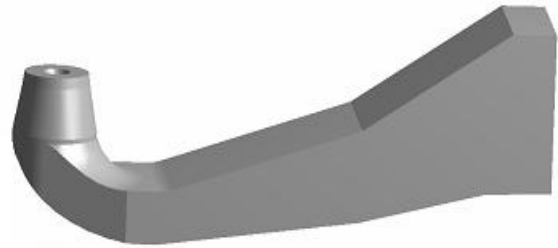
Obr.1.8 Variantní řešení kolenové sací trouby z obr.1.7 [2]

- 1 - difuzor
- 2 - přechodové koleno
- 3 - výstupní difuzor

Ukázkou konkrétního případu optimalizace pravoúhlé sací trouby může být například savka použitá na vodní elektrárně Hölleforsen ve Švédsku. Původní návrh savky z roku 1949 je vlevo, na obr.1.9. Zoptimalizovaný tvar savky z roku 2003 pak na obr.1.10. Optimalizací se účinnost turbíny se savkou zvýšila o 0,5%. [3]



Obr.1.9 Původní návrh savky [3]

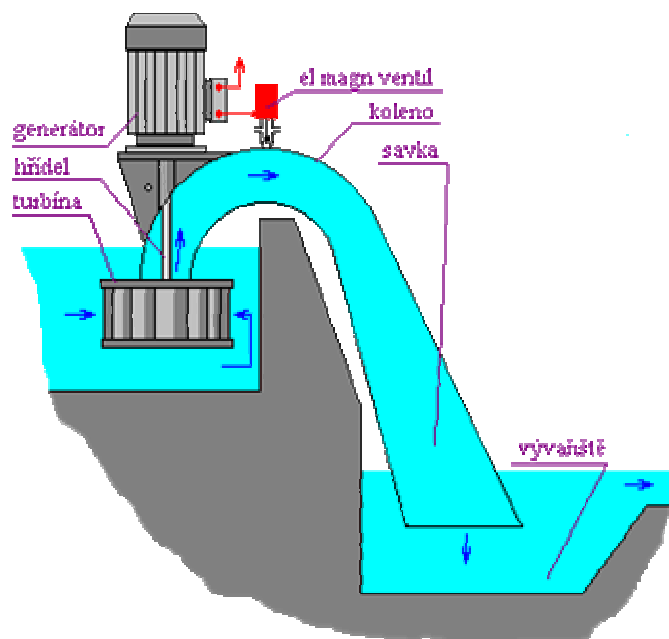


Obr.1.10 Zoptimalizovaný tvar savky [3]

1.3.3 Násoska

Násoska je zahnuté přívodní potrubí vedoucí z akumulární nádrže k turbíně. Je to nejjednodušší systém, jak lze zabezpečit cyklické spouštění a zastavování neregulovaného vodního motoru. [5]

Násoska ale nemusí být vždy jenom regulátor. Také může být turbína umístěna nahoře a násosku může tvořit její dlouhá savka za oběžným kolem, jak je znázorněno na obr.1.11.



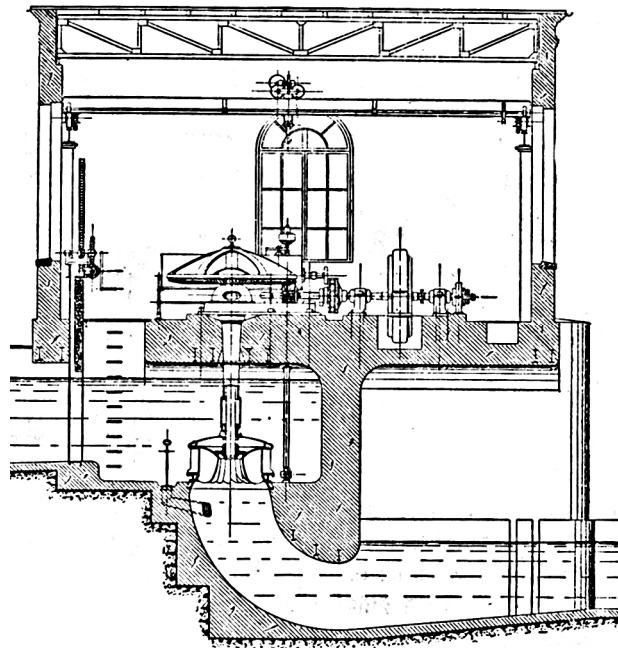
Obr.1.11 Sací trouba s funkcí násosky [5]

Soustrojí se pak spouští motorickým roztočením ponořené turbíny. Ta pracuje prvně jako čerpadlo a zavodní násosku. Když začne voda proudit samospádem, přejde plynule do turbínového provozu. Zastavení zajišťuje vzduchový ventil na vrcholu násosky. Ten vpustí dovnitř násosky vzduch a vodní sloupec se přeručí. [5]

1.4 Vývoj konstrukce sacích trub

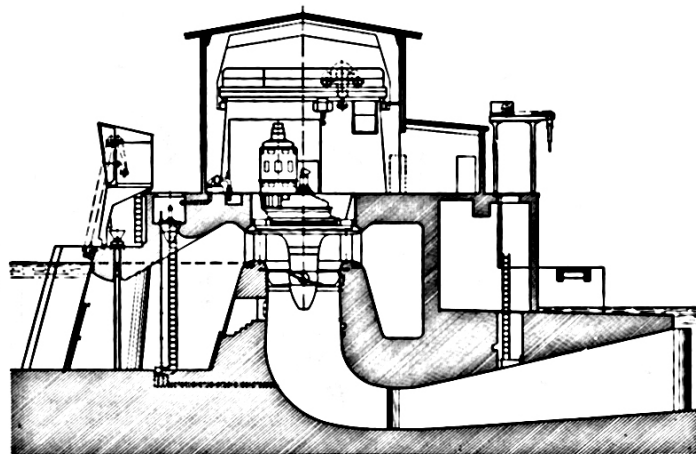
V dřívějších dobách, kdy bylo využívání vodní energie pomocí vodních motorů v počátcích, neměli konstruktéři tolik zkušeností jako mají konstruktéři dnešní. Neměli ani moderní softwarové nástroje a tak díky neoptimalizované konstrukci sacích trub i vodních turbín přicházeli o značnou část výkonu. Účinnost byla v porovnání s účinností dnešních strojů také mnohem nižší.

Na obr.1.12 je vidět příklad sací trouby dřívější konstrukce. Těsně za turbínou je vloženo koleno což není úplně ideální. Navíc celá savka v podstatě neobsahuje žádný difuzor a tak se v ní může projevit pouze hydrostatický účinek.



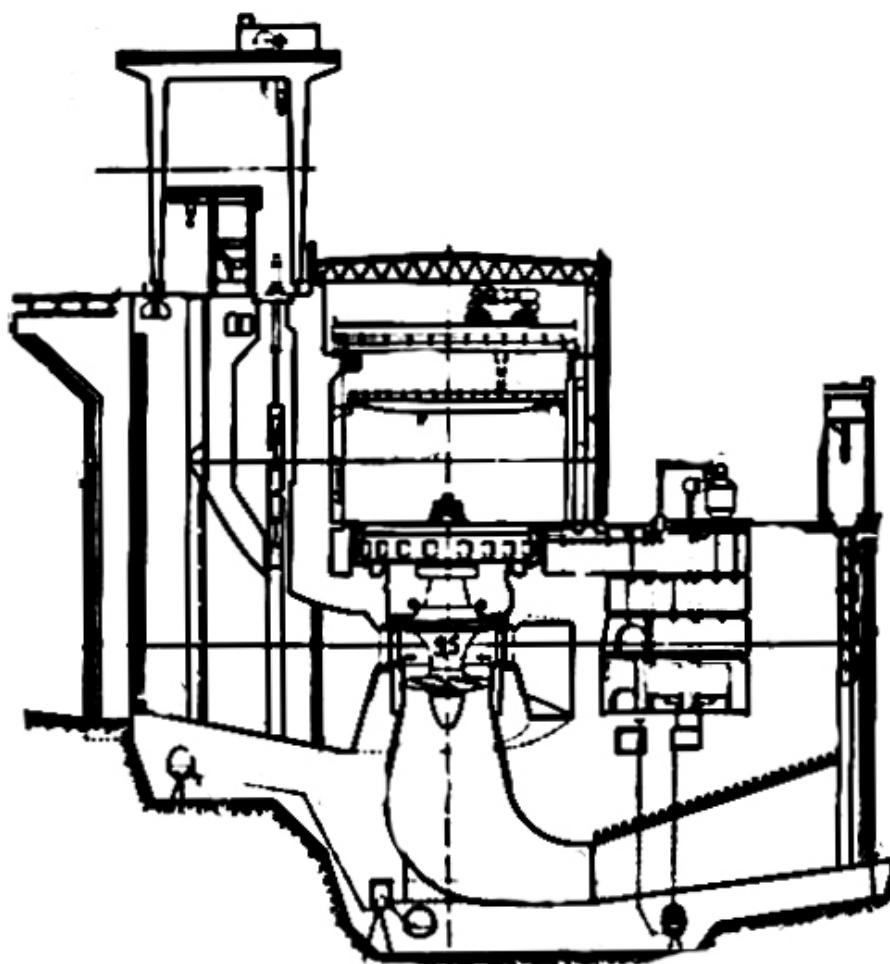
Obr.1.12 Zastaralé řešení sací trouby

Sací trouba modernější konstrukce je na obr.1.13. Tady už je v horizontální části savky použit difuzor, tak jak ho používáme dnes. Vstupní část savky, mezi turbínou a kolenem, je však tvořena nerozšiřujícím se průřezem. V této části proto nemůže docházet ke zpomalování proudící kapaliny a tím snižování tlaku za turbínou.



Obr.1.13 Modernější řešení sací trouby

V moderním řešení sacích trub se snažíme, pokud je to pro dané konkrétní podmínky na díle výhodné, umisťovat u kolenových sacích trub těsně za turbínu difuzor. Díky tomu se voda vytékající z turbíny zpomalí ještě dřív než projde kolenem a tím se zmenší ztráty vířením. V koncové části kolena je mírné zúžení, kvůli potlačení vířů, a dále pak trouba pokračuje horizontálně orientovanou částí s difuzorem. Takto konstruovaná kolenová sací trouba má nejlepší účinnost.



Obr.1.14 Moderní řešení sací trouby

2 Účinnost a zisk sací trouby

2.1 Účinnost sací trouby

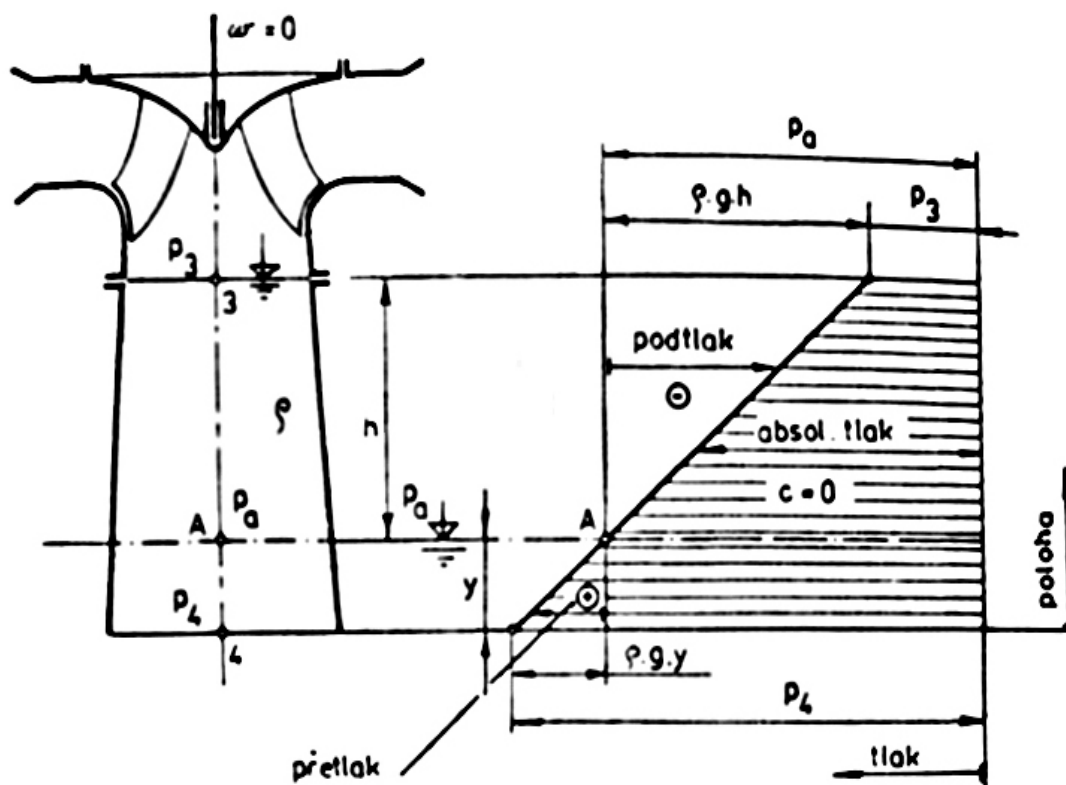
Účinnost sací trouby ovlivňují poměry, s jakými vystupuje kapalina z oběžného kola turbíny a samotná konstrukce savky. Proto může sací trouba, která se osvědčila u jednoho oběžného kola, zklamat ve spojení s jiným oběžným kolem. Z tohoto důvodu se u rychloběžných turbín zkouší modelová turbína již s troubou, jaké má být použito u skutečné turbíny a nedoporučuje se měnit tvar vyzkoušené sací trouby. [1]

Při optimálních podmínkách a při správném hydraulickém řešení savky mohou přímé sací trouby dosáhnout až 90% účinnosti a sací trouby kolenové až 85%. [2]

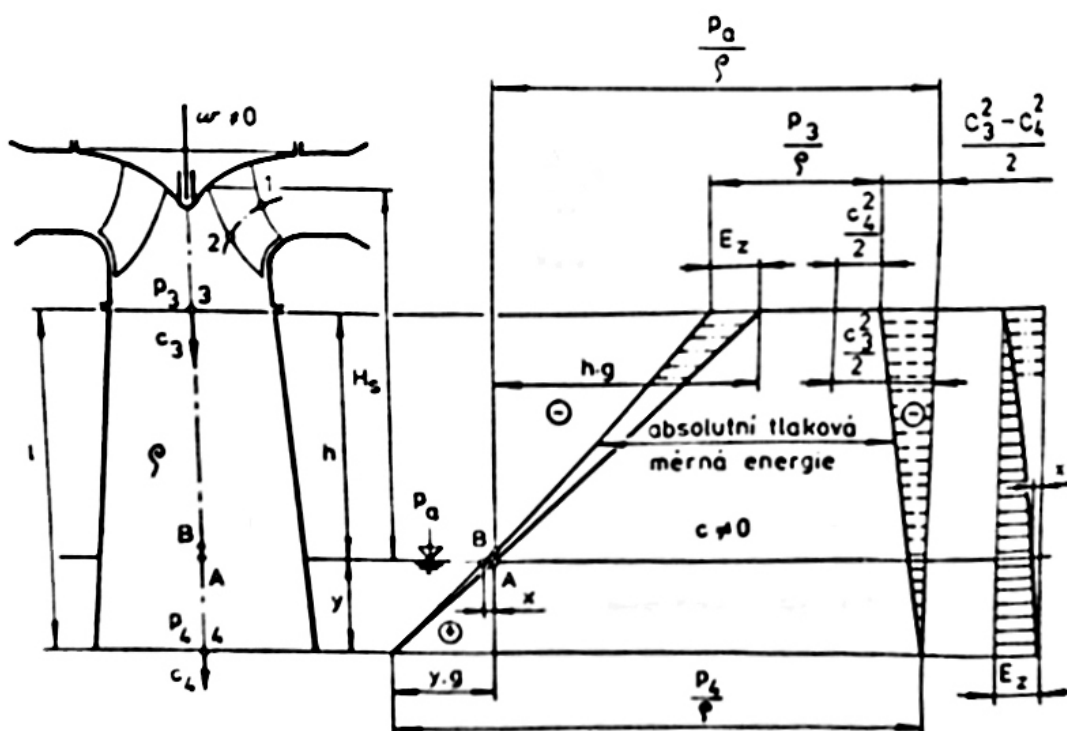
2.2 Energetický zisk sací trouby

Teoretickým ziskem sací trouby je rozdíl $0,5 \cdot (\alpha_3 c_3^2 - \alpha_4 c_4^2)$, kde c_3 je rychlost na vstupu a c_4 je rychlost na výstupu savky. Tuto hodnotu však bohužel snižují existující hydraulické ztráty v sací troubě. Korekcí teoretického zisku sací trouby je účinnost sací trouby, kterou můžeme vyjádřit jako $\eta_s = 1 - E_z [0,5 \cdot (\alpha_3 c_3^2 - \alpha_4 c_4^2)]^{-1}$, kde E_z ($J \cdot kg^{-1}$) jsou veškeré hydraulické ztráty v sací troubě, jejíž délka je l. [2]

Energetické poměry dané tlakovými, polohovými, kinetickými a ztrátovými hodnotami měrné energie jsou schematicky znázorněny na obr.2.1 a obr.2.2.



Obr.2.1 Energetické poměry v sací troubě bez průtoku ($c = 0$) [2]



Obr.2.2 Energetické poměry v sací troubě s průtokem ($c \neq 0$)[2]

V obr.2.1 jsou znázorněny poměry bez průtoku kapaliny sací troubou ($c = 0$), kdy v utěsněném prostoru oběžného kola byl vyčerpán vzduch tak, že atmosférický tlak p_a vyzvedl spodní hladinu kapalin v sací troubě do úrovně h nad spodní hladinu. Na počátku sací trouby (bod 3) je absolutní tlak p_3 a vůči atmosférickému tlaku p_a vznikl podtlak ($\rho \cdot g \cdot h$). V místě A sací trouby, které je na úrovni spodní hladiny, je tlak p_a . Ponoření výstupního průřezu sací trouby pod hladinou je y . Tlak na spodním konci sací trouby je $p_4 = p_a + \rho \cdot g \cdot y$.

Když nastane průtok turbínou ($c \neq 0$), změni energetické poměry v sací troubě kinetická energie $0,5 \cdot \alpha \cdot c^2$ a hydraulické ztráty E_z , viz obr.2.2. Tyto poměry vystihuje Bernoulliho rovnice vyjádřená pro vstupní a výstupní průřez sací trouby vzhledem k srovnávací rovině, procházející výstupním průřezem sací trouby: [1] [2]

$$(h + y) \cdot g + p_3 \cdot \rho^{-1} + 0,5 \cdot \alpha_3 \cdot c_3^2 = 0 + p_4 \cdot \rho^{-1} + 0,5 \cdot \alpha_4 \cdot c_4^2 + E_z \quad (2.1)$$

Ve výstupním průřezu sací trouby je absolutní tlak kapaliny dán součtem atmosférického tlaku a tlaku odpovídajícímu polohové energii příslušné ponoření sací trouby pod spodní hladinu y :

$$p_4 = p_a + \rho \cdot g \cdot y \quad (2.2)$$

Po dosazení (2.2) do (2.1) vychází energetická bilance v sací troubě:

$$(h + y) \cdot g + p_3 \cdot \rho^{-1} + 0,5 \cdot \alpha_3 \cdot c_3^2 = p_a \cdot \rho^{-1} + g \cdot y + 0,5 \cdot \alpha_4 \cdot c_4^2 + E_z \quad (2.3)$$

Z toho měrná tlaková energie kapaliny vstupující do sací trouby:

$$p_3 \cdot \rho^{-1} = p_a \cdot \rho^{-1} + E_z + 0,5 \cdot \alpha_4 c_4^2 + E_z - 0,5 \cdot \alpha_3 c_3^2 - g \cdot h \quad (2.4)$$

Měrná tlaková energie na výstupu ze sací trouby je pak z rovnice (2.1), popř. (2.2):

$$p_4 \cdot \rho^{-1} = (h + y) \cdot g + p_3 \cdot \rho^{-1} + 0,5 \cdot \alpha_3 c_3^2 - 0,5 \cdot \alpha_4 c_4^2 - E_z = p_a \cdot \rho^{-1} + g \cdot y \quad (2.5)$$

Porovnáme-li poměry v sací troubě bez průtoku kapaliny (obr.2.1) a poměry při průtoku kapaliny turbínou (obr.2.2) zjistíme následující:

- 1) Energetická ztráta v sací troubě E_z zvyšuje absolutní tlak na počátku sací trouby, tj. snižuje podtlak kapaliny.
- 2) Difuzorový průtočný prostor sací trouby naopak snižuje tlakovou energii kapaliny, tj. zvyšuje podtlak na počátku sací trouby o hodnotu $0,5 \cdot (\alpha_3 c_3^2 - \alpha_4 c_4^2)$. [1] [2]

2.3 Ztráty v sací troubě

Ztráty v sací troubě jsou způsobeny především třením kapaliny o stěny savky a také vířením kapaliny v prostoru savky. Víry v sací troubě mohou vznikat jednak vlivem rotační složky rychlosti kapaliny vystupující z oběžného kola turbíny, ale i odtržením kapaliny od stěn savky. Dílčí ztráty se sčítají, postupně nabývají na významu a to má samozřejmě neblahý dopad na celkovou účinnost sací trouby. Její energetický zisk je tak pomalu zmenšován o tyto ztráty a její účinnost prudce klesá. Proto je velice důležité snažit se tyto ztráty co nejvíce eliminovat.

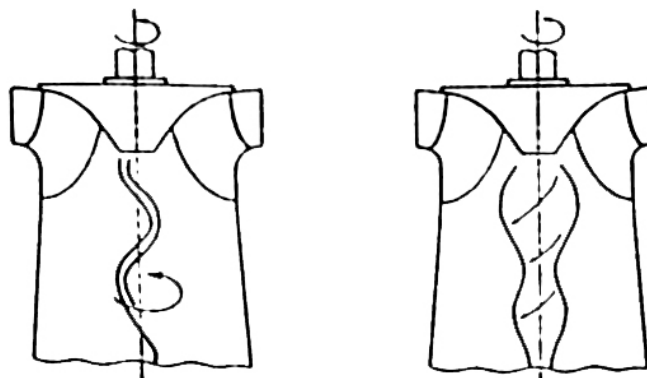
2.4 Způsoby dosažení co nejvyšší účinnosti sací trouby

Hlavní zásadou je využít co možná nejvíce z meridiální složky rychlosti kapaliny opouštějící oběžné kolo turbíny a přitom zabránit odtržení kapaliny od stěn kónusu, popřípadě kolena. V kuželové části savky toho dosáhneme zvolením správného vrcholového úhlu kónusu, a to v rozmezí 8° až 13° dle konkrétních požadavků a podmínek. U kolena toho docílíme tak, že průtokové průřezy kolena v jeho výstupní části se zmenšují, jak je podrobně vysvětleno v podkapitole 1.3.2.

3 Vírový cop v sací troubě

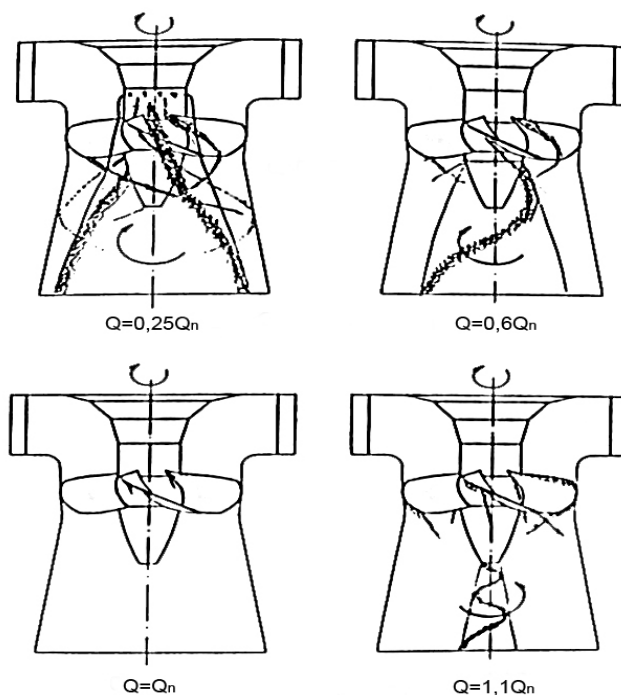
3.1 Charakteristika vírového copu

U turbín s jednostupňovou regulací, převážně u Francisových turbín, se při zatížení odlišného od optimálního tvoří za oběžným kolem v sací troubě tzv. vírový cop. Jeho vysoká nestabilita je příčinou pulsací tlaků, které mohou být velice nebezpečné pro provoz turbíny. Na obr.3.1 je schematicky uveden tvar vírových copů v sací troubě.



Obr.3.1 Schéma vírového copu při sníženém (vlevo) a zvýšeném (vpravo) průtoku Francisovou turbínou [2]

Při snížených průtocích, asi o 40% vzhledem k jmenovitému průtoku (obr.3.1 vlevo), má vírový cop smysl otáčení stejný jako oběžné kolo, ale frekvence otáčení copu je o dvě třetiny nižší než otáčky oběžného kola. Při průtocích vyšších než nominálních má vírový cop opačný smysl rotace (obr.3.1 vpravo) než je směr otáčení kola turbíny. Obdobná situace tvorby vírových oblastí u axiální turbíny je schematicky vyznačena na obr.3.2 pro průtoky $Q < Q_n$, $Q = Q_n$, $Q > Q_n$. [2]

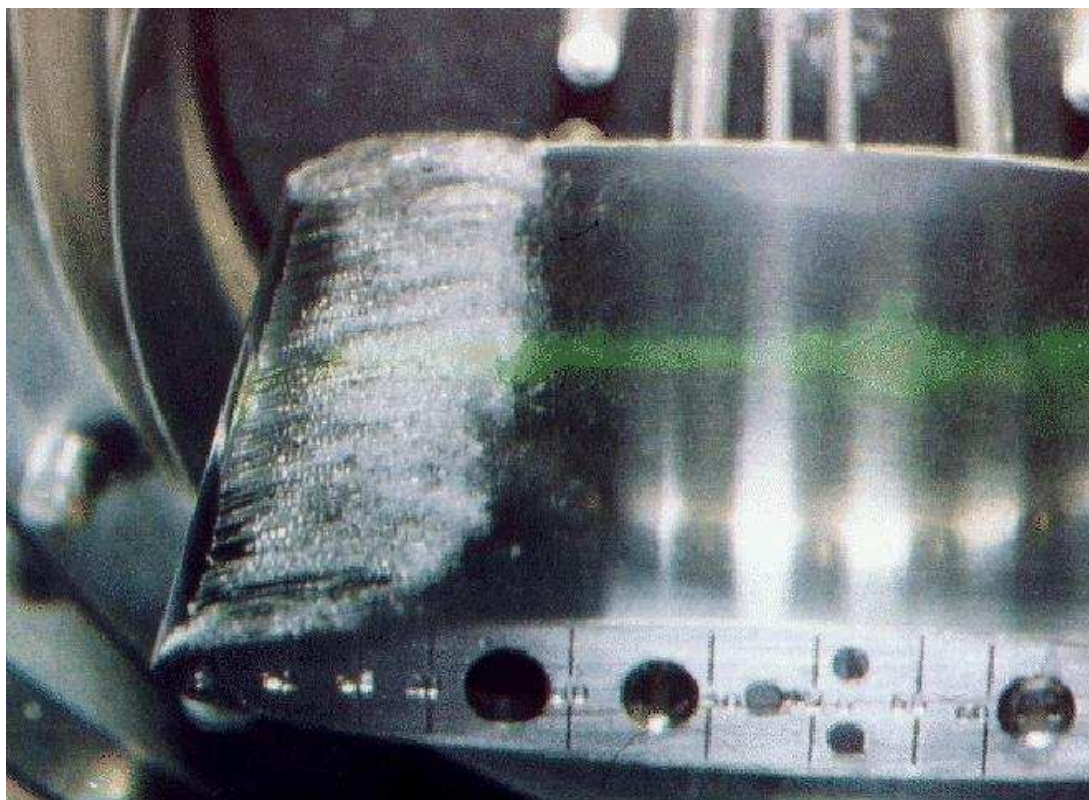


Obr.3.2 Tvorba vírových oblastí u axiální turbíny pro různé průtoky [2]

3.2 Kavitace a princip vzniku vírového copu

Tlak p_3 není nejnižší tlak, který se vyskytuje v kapalině při průchodu turbínou. Je to tlak přímo na konci oběžných lopatek, na začátku sací trouby. Uvnitř kanálu oběžného kola bude tlak ještě nižší, protože voda působí na lopatky silami v obvodovém směru. Musí tedy být její tlak na lopatku z jedné strany (tlakové strany) větší a z druhé strany (sací strany) menší. Na konci lopatky mají oba tlaky stejnou hodnotu p_3 , a proto musí být uvnitř kanálu na sací straně lopatky tlak nižší. Tento tlak může mít různou velikost. Je-li však velikost tohoto tlaku nižší než napětí par kapaliny protékající turbínou při její teplotě, začne se kapalina v těchto místech odpařovat ve formě bublinek.

Tyto bublinky páry, jež se tvoří na sací straně lopatky v místě nižšího tlaku, jsou unášeny proudem kapaliny podél sací strany lopatky a jsou tedy zanášeny do míst, kde je tlak opět vyšší. V těchto místech bublinky páry kondenzují a zaplňují se vodou, jejich dutiny implodují. Implodace bublinek je velmi rychlá, takže okolní kapalina, která zaplňuje jejich místo, narazí velmi prudce na lopatku, čímž vznikají slyšitelné rychlé rázy nebo chvění stroje. Tento jev má destruktivní účinky především na lopatky turbíny a říkáme mu kavitace. [1] Na obr.3.3 je vidět tvorba kavitačních bublin na modelovém lopatkovém profilu.

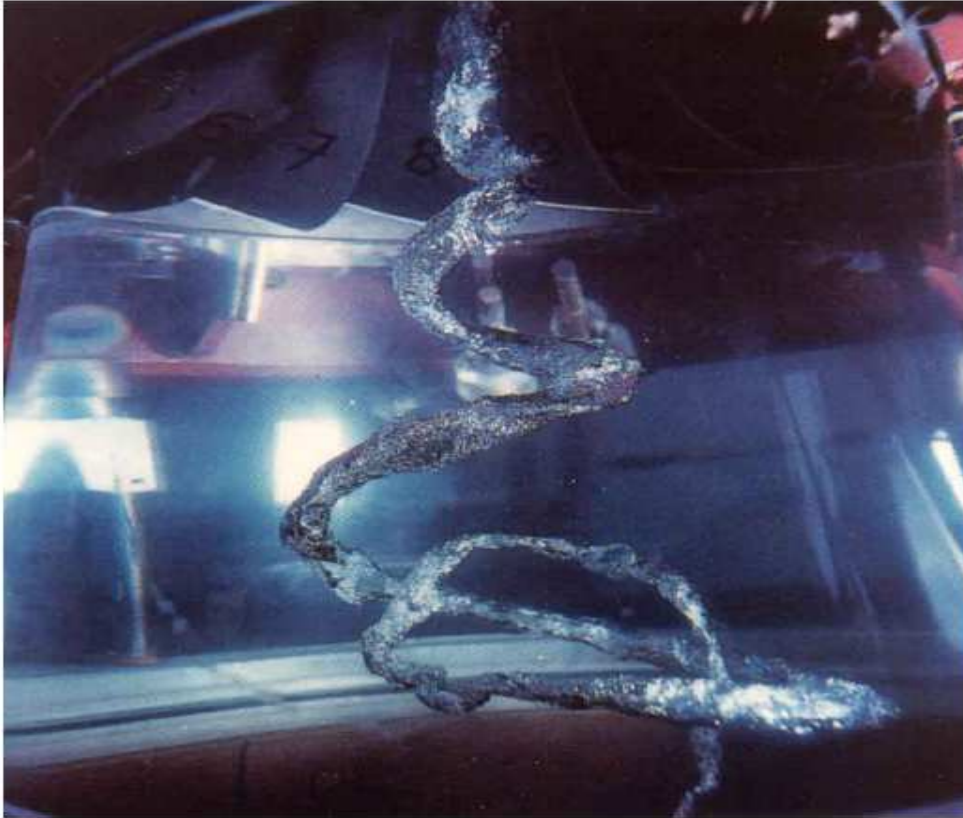


Obr.3.3 Tvorba kavitačních bublin na obtékaném lopatkovém profilu [3]

Vlivem rotační složky rychlosti kapaliny na výstupu z oběžného kola turbíny se tvoří vír. Pokud je podtlak uvnitř víru dostatečně velký, začnou se v tomto víru tvořit bublinky páry, které vytvoří dutinu v ose rotace víru. V momentě, kdy nastane tento stav hovoříme o vírovém copu. Ten se odpoutává od náboje oběžného kola. Při velkých průtocích je tento

vírový cop protažen v ose rotace oběžného kola, při malých průtocích se utváří spirálovitý vírový cop, který zasahuje do celého prostoru sací trouby obr.3.4. [2]

V místech vírového copu vznikají tlakové rázy, které se kapalinou šíří i do přívodní části turbíny. Tento stav je pro provoz turbíny nebezpečný a proto nežádoucí. V úzké oblasti optimálních provozních stavů turbíny víry v sací troubě nevznikají. [2]



Obr.3.4 Vírový cop za modelovým oběžným kolem Francisovy turbíny [3]

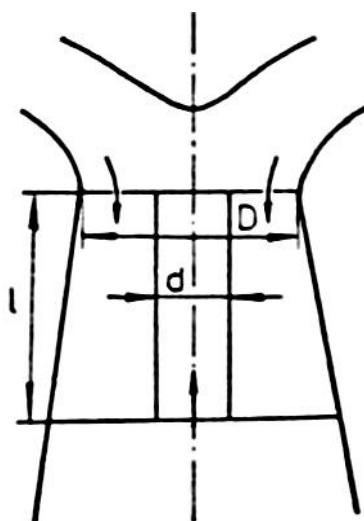
3.3 Způsoby zabránění vzniku vírového copu

K zabránění vzniku vírů se v první řadě používá regulace stroje. Toho však můžeme využít spíše jen u turbín s dvoustupňovou regulací, jako je Kaplanova turbína. Regulací se zde myslí natáčení rozváděcích lopatek spolu s lopatkami oběžného kola. Francisova turbína má pouze jedноступňovou regulaci, protože u ní můžeme natáčet pouze rozváděcí lopatky. To pro potlačení vzniku víru často nestačí.

Samotná regulace tak není vždy zcela účinná a proto se využívají další způsoby, které nám pomáhají zamezit vzniku vírových struktur v sací troubě.

Jedním z těchto způsobů je zavzdušňování prostoru, v němž se tvoří parní dutiny. Zavádění vzduchu se provádí např. otvorem v ose hřídele turbíny, opatřeným zpětným ventilem. Má-li být zavzdušnění účinné, musí se zavádět objemové množství vzduchu 1% až 2% průtoku turbíny. [1]

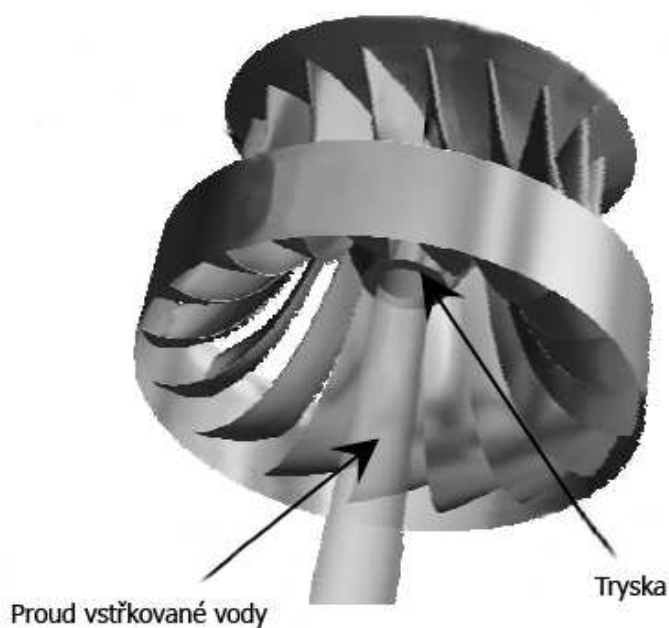
Lépe se však osvědčuje metoda vestavby koncentrické (soustředné) trubky do vstupní části sací trouby (obr.3.5).



Obr.3.5 Sací trouba s vestavěnou koncentrickou trubkou [2]

Nejvhodnější rozměry trubky jsou $d/D=0,5$ a $l/D=1,25$. Trubka je v sací troubě uchycena několika náležitě dimenzovanými radiálními žebry. Protože ve spodní části trubky má kapalina vyšší tlak (vlivem difuzorového účinku sací trouby) než je tlak na horním konci trubky, proudí kapalina uvnitř trubky vzhůru a zaplňuje tvořící se dutiny víru za oběžným kolem turbíny. [2]

Další metodou řešící problém vírového copu je poměrně nová metoda vstřikování vody (Water injection) do prostoru, kde se tvoří vírový cop. Princip této metody spočívá v tom, že se tryskou v ose turbíny vstříkují do místa těsně za turbínou voda (obr.3.6).



Obr.3.6 Metoda Water injection [4]

Právě v tomto místě by jinak vznikl vírový cop. To se ale v tomto případě nestane, protože tvořící se dutinu víru zaplní vstříkovaná voda a tím zabrání jeho vzniku. Voda je do trysky dodávána přímo ze spirální skříně a to tak, že proudí skrz dutinu v ose turbíny. Další způsob jak lze zásobovat trysku vodou je přivádět vodu z výstupní části sací trouby. Tento způsob přivádění vody do trysky je dokonce výhodnější než dodávání vody přímo ze spirální skříně, protože nesnižuje průtok vody turbínou. [4]

Na obr. 3.7 je průběh testu této metody na modelové turbíně. Na levém obrázku je průběh bez vstříkování vody a v průhledné savce je jasně vidět vírový cop. Na pravém obrázku je již vír potlačen proudem vstříkované vody.



Obr.3.7 Test metody Water Injection [4]

Dříve se zkoušela využívat ještě jiná metoda a to metoda potlačení vírů pomocí vkládání žeber do prostoru sací trouby. Tato metoda násilného potlačování obvodové složky rychlosti proudící kapaliny se však ukázala jako neefektivní. Savka totiž ztrácela na své účinnosti víc, než kdy se v ní vírovým strukturám takto nezabraňovalo. Z tohoto důvodu se tento způsob dnes už nevyužívá.

Závěr

Při využívání jakéhokoli energetického zdroje je vždy cílem minimalizovat ztráty, zužitkovat co největší možné množství energie a tu pak použít ve vlastní prospěch. Bez sacích trub by vodní motory ztratily hodně ze své výkonnosti a jejich celková účinnost by byla nesrovnatelně nižší. Sací trouba má tak velice důležitou a nenahraditelnou úlohu při využívání vodní energie.

Proto má veliký význam navrhování konkrétních řešení sacích trub na konkrétních strojích. V dnešní době je nám v tomto oboru velikým pomocníkem výpočetní technika. Specializované softwary jsou schopny řešit proudění v každém bodě modelového zařízení a tím nám poskytnout potřebné informace k návrhu sací trouby nebo jakékoli jiné části turbínového soustrojí. Tím se výrazně snižují náklady na realizaci a zároveň je optimalizace celého soustrojí mnohem přesnější a stroje tak dosahují větších účinností než tomu bylo dříve. Stroje navržené v době, kdy softwarové nástroje nebyly k dispozici nebo nebyly na tak vysoké úrovni jako nyní, se tak mohou znovu řešit a po optimalizaci dosahují při stejných podmínkách vyšších účinností a výkonů.

Naše zeměpisná poloha a přírodní podmínky nejsou příliš výhodné pro budování vodních energetických děl. Toky českých řek nedodávají velké množství vody a nemají ani potřebný spád. Ale i tak máme na našem území přehradní nádrže, na kterých se využívají vodní motory a savky. V tomto směru je již však u nás potřeba vodních motorů nasycena. Budoucnost u nás patří budování malých vodních elektráren na jezích. Používají se zde rychloběžné turbíny, které tu pracují s malým spádem. Proto je zde funkce savky velice důležitá. Savka zde může mít i padesátiprocentní podíl na celkové účinnosti soustrojí.

Podíl elektrické energie vyrobené ve vodních elektrárnách je však ve srovnání zejména s produkcí elektřiny jaderných a tepelných elektráren relativně malý. Ale i tak je výroba vodní energie velice důležitá. Žádný jiný zdroj energie totiž nedokáže naběhnout z nulového na plný výkon během tak krátké doby, a to řádově během několika desítek sekund. Tím se stává tento zdroj energie výborným pomocníkem při regulaci dodávání elektrické energie do sítě. V případě nedostatku elektrické energie může prakticky ihned naběhnout na maximální výkon a dodávat proud. V případě přebytku elektrické energie v síti je tento zdroj energie opět nezastupitelný. Díky přečerpávacím vodním elektrárnám můžeme přebytečnou elektrickou energii akumulovat v podobě potenciální energie tak, že turbínu přepneme do čerpadlového provozu a přečerpáváme vodu ze spodní nádrže do horní. Tím spotřebováváme přebytečnou energii ze sítě a zároveň si vytváříme zásobu potenciální energie, kterou pak můžeme v případě potřeby kdykoli znovu využít.

Seznam použitých zdrojů

- [1] NECHLEBA, Miroslav. Vodní Turbíny: Jejich konstrukce a příslušenství. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1962. 672 s.
- [2] MELICHAR, J. - VOJTEK, J. - BLÁHA, J. Malé vodní turbíny (Konstrukce a provoz). Praha, Vydavatelství ČVUT, 1998. 229 s.
- [3] RUDOLF, P. Přednášky z hydromechaniky pro 3. ročník
- [4] MUNTEAN, S. - SUSAN-RESIGA, R. - BOSIOC, A. - BERNAD, S. - ANTON, I. Hydro-Power Engineering and Water Management
- [5] <http://mve.energetika.cz/>

Seznam použitých zkratek, symbolů a veličin

α	... Coriolisovo číslo
η_s	... hydraulická účinnost sací trouby
ρ [kg. m ⁻³]	... hustota kapaliny
g [m.s ⁻²]	... tíhové zrychlení
l [m]	... délka sací trouby
h [m]	... výška sací trouby nad spodní hladinou
y [m]	... výška sací trouby pod spodní hladinou
p [Pa]	... tlak kapaliny
p_a [Pa]	... tlak atmosferický
c [m.s ⁻¹]	... rychlost kapaliny
d [m]	... průměr koncentrické trubky
D [m]	... průměr savky na vstupu
S [m ²]	... příčný průřez sací trouby
Q [m ³ .s ⁻¹]	... průtok kapaliny sací troubou
Q_n [m ³ .s ⁻¹]	... nominální průtok kapaliny sací troubou
E_z [J.kg ⁻¹]	... hydraulické ztráty v sací troubě