

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY INSTITUTE

## OD TORNÁDA K VODNÍ TURBÍNĚ

FROM TORNADO TO HYDRAULIC TURBINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN JÍZDNÝ

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 BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Martin Jízdný

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

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

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:

### **Od tornáda k vodní turbíně**

v anglickém jazyce:

### **From tornado to hydraulic turbine**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Model proudění v jádru tornáda a na výstupu z vodní turbíny vykazuje jistou podobnost. Úkolem je provést rešerši modelů proudění v obou případech, popsat jevy, ke kterým dochází (rozpad víru, vírový cop, ...), modely víru graficky prezentovat. Na bakalářskou práci lze úzce navázat diplomovou prací zabývající se prouděním ve výstupních difuzorech vodních turbín.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše modelů vířivého proudění v přírodě i v technice a jejich porovnání.

Seznam odborné literatury:

1. H. J. Lugt. Vortex flow in nature and technology. Wiley. New York. 1983
2. H. J. Lugt. Introduction to Vortex Theory. Vortex Flow Press. 1996

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

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

V Brně, dne 2.12.2008

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Anotace**

Předložená bakalářská práce se zabývá vírovým pohybem a obsahuje dvě hlavní části. První část popisuje především principy vzniku a vývoje vírového pohybu v přírodě a v technické praxi. V obou těchto oblastech lze nalézt pozitivní i negativní účinky vírového pohybu, které velmi významně ovlivňují okolní svět. Druhá část této bakalářské práce popisuje experiment, jehož cílem bylo ověřit vybrané vlastnosti vírového pohybu a na základě měření stanovit vlastní hypotézy o tomto pohybu. Závěrečná část experimentu je věnována různým metodám vizualizace vírového pohybu v laboratorních podmínkách.

## **Klíčová slova**

Vírový pohyb, vír, vírový cop, tornádo, hurikán

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with vortex motion and contains two main parts. The first part refers to the principles of creation and evolution of vortex motion in nature and in technological applications. In both of these fields it is possible to find positive and negative impacts of vortex motion which influence the world significantly. The second part of this bachelor thesis refers to an experiment which main goal was to verify some selected qualities of vortex motion and to determine hypothesis based on measurements. The final part of the experiment deals with the different methods of making vortex motion visible in laboratory conditions.

## **Key words**

Vortex motion, vortex, vortex rope, tornado, hurricane

## **Bibliografická citace:**

JÍZDNÝ, M. *Od tornáda k vodní turbíně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci, *Od tornáda k vodní turbíně*, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. s využitím zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů a neporušil jsem při tom autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským, ve znění pozdějších předpisů).

V Brně, dne: 24.5.2009

.....

podpis

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za užitečné rady a připomínky při tvorbě této práce a pomoc při určování daných závislostí v kapitole 6.3. Rovněž bych rád poděkoval Ing. Lukáši Rinkovi za změření povrchového napětí a viskozit jednotlivých kapalin, dále pak pracovníkům laboratoře Ústavu fluidního inženýrství v Brně za pomoc při přípravě experimentu. Na závěr bych rád vyjádřil vděčnost rodině za podporu během psaní této práce.

## Obsah:

<b>1. Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2. Základní pojmy</b> .....	<b>11</b>
2.1. Definice vírového pohybu .....	11
2.1.1. Rozložení tlaku uvnitř víru a vznik kavitace .....	12
2.1.2. Separace proudění a separace víru .....	13
2.1.3. Nestabilita a turbulence .....	14
2.1.4. Rozpad víru (Vortex breakdown) .....	15
2.2. Modely základních vírů .....	16
2.3. Spektrum v přírodě se vyskytujících vírů .....	17
<b>3. Vírový pohyb ve vesmíru</b> .....	<b>18</b>
<b>4. Víry v Zemské atmosféře a oceánech</b> .....	<b>19</b>
4.1. Vlastnosti Země ovlivňující tvorbu vírů.....	19
4.1.1. Coriolisova síla .....	19
4.1.2. Ostatní vlastnosti Země ovlivňující pohyb vírů .....	20
4.2. Víry v atmosféře .....	22
4.2.1. Tornáda .....	22
4.2.2. Hurikány .....	23
4.3. Víry v oceánech .....	25
4.3.1. Golfský proud .....	26
<b>5. Víry v technické praxi</b> .....	<b>28</b>
5.1. Pozitivní využití vírového pohybu .....	28
5.2. Negativní účinky vírového pohybu .....	31
5.2.1. Vtokové víry .....	31
5.2.2. Vírový cop .....	32
<b>6. Experiment</b> .....	<b>35</b>
6.1. Popis použitého zařízení .....	35
6.2. Stanovení závislosti rozměru hladinového víru v axiálním směru na Reynoldsově číslu pro různé kapaliny .....	36
6.2.1. Stanovení kinematické viskozity .....	37
6.2.2. Grafické vyjádření naměřených hodnot .....	38
6.2.3. Vliv povrchového napětí na tvorbu hladinového víru .....	44
6.3. Určení radiálního rozměru hladinového víru .....	45
6.3.1. Stanovení závislosti radiálního rozměru hladinového víru na rozměru axiálním .....	45
6.3.2. Experimentální stanovení konstant $K$ a $r^*$ .....	47
6.3.3. Odvození vzorce pro výpočet skutečného radiálního rozměru hladinového víru po deformaci půl-cylindrickou čočkou .....	49
6.4. Vizualizace vírového pohybu .....	50
<b>7. Závěr</b> .....	<b>53</b>
<b>8. Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>54</b>
<b>9. Seznam obrázků a jejich zdroje</b> .....	<b>56</b>
<b>10. Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	<b>57</b>
<b>11. Seznam příloh</b> .....	<b>58</b>

## 1. Úvod

Pravděpodobně žádný vír není popisován v bájích a legendách častěji než vír vznikající na mořích a strhávající s sebou do hlubin lodě a jejich posádky. Nicméně, tento známý vír není zdaleka jediný, který se v přírodě vyskytuje.

Víry, resp. vírový pohyb ovlivňuje život na Zemi hned na několika úrovních. Vznik a formování galaxií je příkladem vírů těch největších rozměrů ovlivňujících samotný vznik Země. Naopak mezi ty nejmenší lze řadit víry vznikající za křídly různých druhů hmyzu. Mezi těmito dvěma extrémy se nachází vírový pohyb, který každý den ovlivňuje naše životy. Cirkulace atmosféry a mořských proudů jsou založeny na pohybu nesčetného množství neustále se měnících vírových struktur. Pohyb vírů je tedy důležitý při předpovědích počasí a výzkumu proudění v oceánech. Při určitých podmínkách v atmosféře mohou vzniknout i víry, které mají obrovskou obvodovou rychlost a tudíž i velké destrukční schopnosti (tornáda, hurikány). Naopak pozitivní vliv vírového pohybu v přírodě je možné nalézt u pohybu mořských proudů (např. Gofského proudu), které ovlivňují podnebí na Zemi.

Vírový pohyb lze také pozorovat v různých technických aplikacích. V některých zařízeních je využíváno vírového pohybu cíleně a v jiných zařízeních jsou víry přítomné jako vedlejší, mnohdy nežádoucí jevy. Příkladem cíleného (pozitivního) využívání vírového pohybu jsou oddělovače částic, pomocí kterých je možné poměrně jednoduchým způsobem čistit různé tekutiny. Mezi nežádoucí projevy vírového pohybu lze řadit vírový cop, vznikající za oběžným kolem vodní turbíny především mimo optimální otáčky soustrojí (tzn. především při najíždění a odstavování turbíny nebo provozu na částečný výkon). Při vzniku tohoto jevu dochází k tlakovým pulsacím, které značně snižují trvanlivost ložisek a mají vliv na únavové chování jednotlivých komponent oběžného kola.

Vznik a vývoj vírových struktur v přírodě i v technických zařízeních jsou poměrně komplikované procesy, které v dnešní době ještě nejsou dokonale prozkoumány. Dokonalejší poznatky o vzniku a vývoji vírů by v budoucnu mohly vést ke zvýšení účinnosti a životnosti některých technických zařízení a také k dokonalejší predikci bouří, hurikánů a tornád a tím i ke zmírnění jejich destrukčních účinků. Z těchto a jistě i mnoha dalších důvodů je důležité vírový pohyb studovat a získané poznatky vhodně aplikovat.

Tato práce sumarizuje nejdůležitější poznatky o vírovém pohybu a zaměřuje se na principy vzniku a vývoj vírů v přírodě a v technické praxi. V závěrečné části této práce je prezentován experiment, který ověřuje a z části prohlubuje poznatky o vírovém pohybu.

## 2. Základní pojmy

### 2.1. Definice vírového pohybu

Pohledy na vírový pohyb jsou různé, ale všechny spojuje jedna základní vlastnost. Touto vlastností je rotační pohyb. Tento poznatek je samozřejmě zakotven (přímo či nepřímo), v různých definicích vířivého pohybu a víru. Mezi nejpoužívanější definice patří následující dvě:

- Víř je rotující pohyb velkého počtu hmotných bodů kolem společného středu [1].
- Pojmem víř je označována oblast dané tekutiny, ve které převažuje vířivost nad smykovými deformacemi.

Vířivost vytvářená na povrchu obtékaných pevných těles (zvláště v blízkosti hran) se šíří v tekutině pomocí dvou mechanismů:

- **Pomocí difúze** - Difúze je obecně molekulární předávání fyzikálních vlastností (hmotnost, rychlost a energie) elementární částice další blízké elementární částici. Difúze jako mechanismus pro přenos vířivosti je brána jako předávání rychlostí mezi částicemi. Tento děj je způsoben především viskózními silami v tekutině [1].
- **Pomocí konvekce (proudění)** - Konvekce může být obecně chápána jako přenos fyzikálních vlastností vlivem pohybu tekutiny samotné. Konvekce vířivosti má zvláštní vlastnost, že vířivost je na trajektorii dané elementární částice zachována. Z tohoto důvodu může být vířivost přenesena na sousední částici (s paralelní trajektorií) pouze pomocí difúze. Principem konvekce je působení fyzikálních sil [1].

Z matematického pohledu je vířivost definována vztahem:

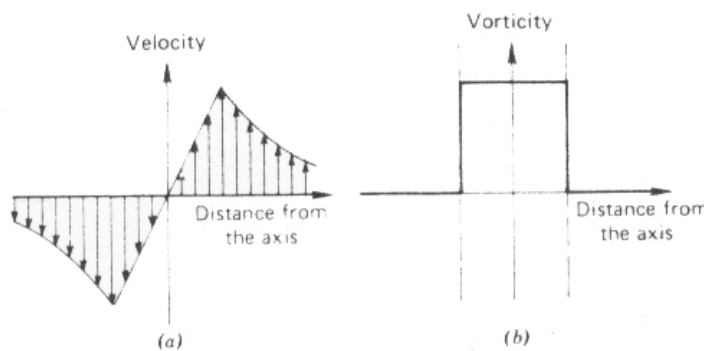
$$\vec{\omega} = \text{rot} \vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix} \quad (1)$$

Pomocí velikosti vektoru vířivosti je možné rozdělit proudění ideální kapaliny do dvou skupin následujícím způsobem:

- $\vec{\omega} = 0$  : Potenciální proudění – částice nerotují kolem vlastní osy
- $\vec{\omega} \neq 0$  : Vířivé proudění – částice rotují kolem vlastní osy [2]

Je velmi podstatné si uvědomit, že ačkoliv žádný víř nemůže existovat bez vířivosti, vířivé pole nemusí vždy znamenat existenci víru [1].

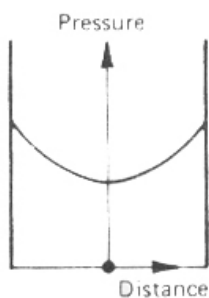
Pohyb kapaliny složený z potenciálního proudění a vířivého proudění v jádru se nazývá Rankinův vír. Tento vír je možné si představit jako rotující dutý válec umístěný v dané tekutině, přičemž uvnitř válce se jedná o vířivé proudění ( $\vec{\omega} \neq 0$ ) a vně válce se jedná o proudění potenciální ( $\vec{\omega} = 0$ ) [1]. Rozložení rychlosti a vířivosti v závislosti na vzdálenosti od osy rotace je zobrazeno na obr. 2.1.



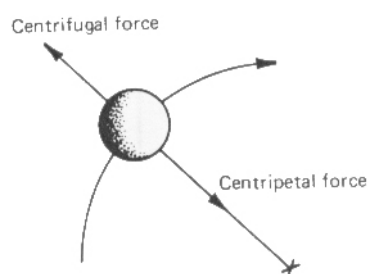
Obr. 2.1 Průběh rychlosti (a) a vířivosti (b) Rankinova víru

### 2.1.1. Rozložení tlaku uvnitř víru a vznik kavitace

Rozložení tlaku uvnitř víru není konstantní a spolu s rozložením rychlosti (vířivosti) je důležitou charakteristikou každého víru. Za předpokladu vířivého proudění je rozložení tlaku parabolické (obr. 2.2). Tlak roste s rostoucí vzdáleností od osy rotace. Důvodem růstu tlaku je zvětšování odstředivé síly směrem ke stěnám nádoby. Proti této odstředivé síle musí působit (z důvodu zachování silové rovnováhy) síla dostředivá stejné velikosti [1]. Tento základní princip rotačního pohybu je zobrazen na obr. 2.3.



Obr. 2.2 Rozložení tlaku při vířivém proudění



Obr. 2.3 Rovnováha odstředivých a dostředivých sil při rotačním pohybu

Pokud se v nádobě s rotující tekutinou vyskytují částice těžší nebo lehčí než je daná tekutina, například olejové kapky ve vodě nebo prachové částice ve vzduchu, pak je silová rovnováha narušena. Těžší částice se pohybují směrem ke stěnám nádoby a lehčí částice se shromažďují ve středu. V přírodě se tento jev oddělování těžších částic od lehčích vyskytuje velmi často například v prашných bouřích nebo v obrovském měřítku v rotujících hvězdách.

Tlak ve středu víru ve vodě může poklesnout tak výrazně, že se voda dostane do stavu syté páry i při pokojové teplotě, případně se nejprve odloučí jiné plyny, které jsou přítomné ve vodě [1]. Tímto způsobem vznikají bublinky vodních par. Tento jev se nazývá kavitace. Při

zvýšení tlaku tyto bublinky implodují. Pokud k implozi dojde v blízkosti materiálu, např. lopatek lodního šroubu, lopatek oběžného kola vodní turbíny apod., je v jejím důsledku tento materiál vytrháván [3]. (obr. 2.4)

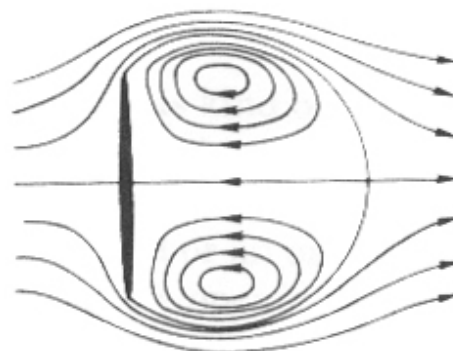


Obr. 2.4 Kavitace v blízkosti materiálu (vlevo) a důsledek působení kavitace (vpravo)

### 2.1.2. Separace proudění a separace víru

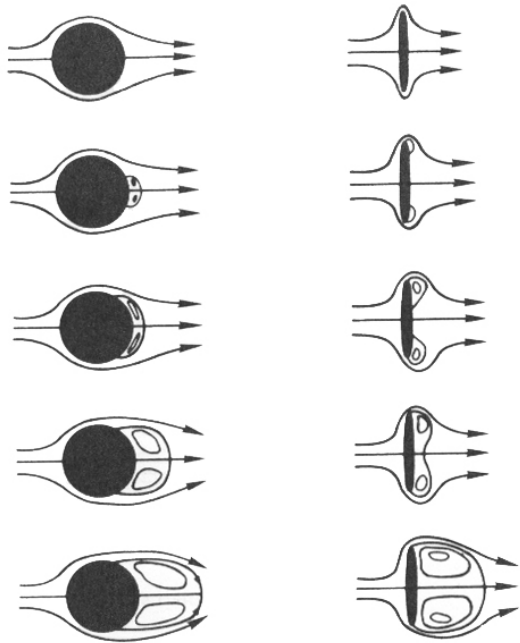
Ve většině případů se proudění separuje (odděluje) na hranách tělesa. V blízkosti hrany se proudnice přibližují tak výrazně, že to vyvolává strmý rychlostní gradient a tvorbu vířivosti [1]. Tento jev je zobrazen na příkladu kruhového disku (obr. 2.5).

Rozdílná situace nastane, pokud do ustáleného proudění ponoříme kouli. U koule vznikají vírové kroužky v blízkosti středu její zadní části a šíří se podél povrchu tělesa [1]. V případě kruhového disku tomu je naopak. Srovnání časového průběhu tvorby víru za kouli a za rotačním diskem je na obr. 2.6. Dalšími případy, kdy dochází k separaci proudění a tvorbě víru, je například potrubí, které se náhle rozšíří (obr. 2.7), nebo proudění za otvorem trysky (obr. 2.8).

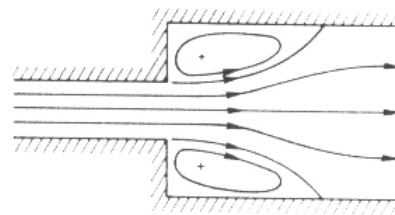


Obr. 2.5 Separace víru v blízkosti hrany

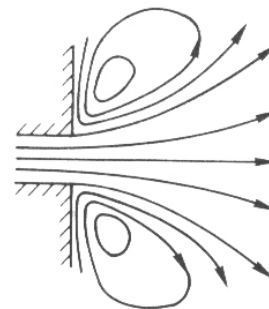
Víry zůstávají vázány u tělesa jen pro malá Reynoldsova čísla (malé axiální rychlosti) (viz. kap. 2.1.3) a v tomto případě tvoří část ustáleného proudění. Při vyšších Reynoldsových číslech se proudění stává neustáleným (nestacionárním) a víry se oddělují od tělesa. Pojem separace víru je tedy rozdílný od separace proudění. Separace víru je vždy časově závislý (neustálený) proces, narozdíl od separace proudění, které je možné pozorovat jak v neustáleném proudění tak i v proudění ustáleném. Vývoj vírového kroužku za kouli a diskem na obr. 2.6 závisí na velikosti Reynoldsova čísla a tohoto důvodu může a nemusí docházet k odtržení víru od koule (disku). Zvláštním případem je tzv. startovací vír, který se odtrhne od hrany tělesa, například disku (obr. 2.5), při náhlém zrychlení nebo zpomalení proudu [1].



Obr. 2.6 Vývoj tvorby vírových kroužků za koulí a diskem v čase



Obr. 2.7 Separace proudění (tvorba víru) v důsledku náhlého rozšíření potrubí



Obr. 2.8 Separace proudění za otvorem

### 2.1.3. Nestabilita a turbulence

Žádný jev v mechanice tekutin nemá tak velký význam jako nestabilita proudění. Tento stav proudění byl poprvé zmíněn na konci 19. století (Helmholtz, Lord Rayleigh, Lord Kelvin). Pomocí toho mechanismu jsou vytvářeny nové modely proudění a ve většině případů vede nestabilita k tvorbě turbulencí a téměř všechny proudění v přírodě i technice jsou turbulentní [1]. Druh nestability je z velké části závislý na druhu působících sil v tekutině, což je kritériem následujícího dělení:

- Nestabilita z důvodu setrvačných sil (např. Kelvin–Helmholtzova nestabilita)
- Nestabilita z důvodu odstředivých sil a síly Coriolisovy (např. vírový cop)
- Nestabilita z důvodu termální nestejnorodosti (vztlak)
- Nestabilita z důvodu gravitačních sil, magnetických sil nebo povrchovému napětí (např. vodní skok)

Výskyt nestability je popsán kvantitativně pomocí podobnostních čísel [1]. Jedním z nich je Reynoldsovo číslo ( $Re$ ), které vyjadřuje poměr setrvačné síly a síly třecí. Jinými slovy lze konstatovat, že Reynoldsovo číslo charakterizuje vliv vnitřního tření při proudění skutečné kapaliny [2]. Matematická definice je následující:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (2)$$

kde  $L$  je charakteristický rozměr,  $V$  je rychlost a  $\nu$  je kinematická viskozita. Existuje kritická hodnota Reynoldsova čísla, která rozděluje proudění na laminární a turbulentní. Například pro

kruhové potrubí je kritická hodnota Reynoldsova čísla přibližně 2320. Proudění s nižším Reynoldsovým číslem je tedy laminární a proudění s vyšším Reynoldsovým číslem než je kritická hodnota se nazývá turbulentní. Toto turbulentní proudění se může stát po uplynutí dostatečně dlouhé doby ustáleným nebo může zůstat neustáleným (periodickým) [1]. Příkladem nestabilního periodického proudění je tzv. Karmanova vírová stezka vznikající za válcovým tělesem při daných parametrech proudění (obr. 2.9). V tomto případě se střídavě oddělují jednotlivé víry od válce a jsou unášeny proudem. Na jejich místech vznikají víry nové a tento proces se neustále opakuje.



Obr. 2.9 Karmanova vírová stezka

Pravděpodobně každá tekutina se při dostatečně velké hodnotě Reynoldsova čísla dostane do nestabilního stavu a následně dochází ke vzniku turbulencí (u většiny případů). Základní vlastnosti turbulencí jsou shrnuty v následujících výrocích:

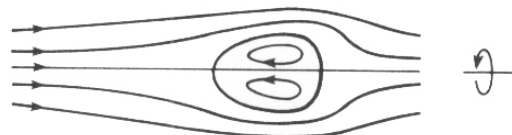
- Turbulence je nepravidelný pohyb tekutiny, ve kterém rychlost a tlak oscilují v prostoru a čase.
- Turbulence zintenzivňuje přenosové jevy, což je uskutečňováno především pomocí velké vířivosti.
- Energie je obecně přenášena z velkých vírů do malých.
- Turbulence není zcela statisticky probíhající děj, jedná se o deterministický chaos.

#### 2.1.4. Rozpad víru (Vortex breakdown)

Rozpad víru byl poprvé vědecky komentován v roce 1957, kdy byl pozorován vědci Peckhamem a Atkinsonem na křídlech letadla. Nezávisle na nich byl rozpad víru sledován také u potrubí za kruhovým otvorem (Peake a Tobak, 1959). Další výskyty rozpadu víru lze nalézt například v přímém potrubí bez zúžení či překážek, v rotující tekutině uvnitř nádoby nebo v tornádu. Existují tři hlavní teorie, které popisují rozpad víru [1]:

- 1) Rozpad víru je druh separace proudění uvnitř rotující tekutiny.
- 2) Rozpad víru je následek nestability.
- 3) Rozpad víru je závislý na existenci kritického stavu.

V následujícím vysvětlení rozpadu víru jsou zmíněny všechny tři teorie: Čím silnější víření, tím nižší tlakové minimum se vyskytuje v ose víru. Po proudu podél osy se vířivost rozprostírá postupně dále od osy díky difúzi a konvekci. Z tohoto důvodu roste tlak podél osy, který může být v případě difuzoru ještě dále navýšen pomocí rozcházejících se proudnic. Nárůst tlaku způsobuje zpomalování axiálního proudění, které (pokud je dostatečně silné) může vést až do tzv. bodu stagnace (bodu zastavení) na ose. Tekutina



Obr. 2.10 Zobrazení proudnic při rozpadu



Obr. 2.11 Skutečné zobrazení rozpadu víru

blízko tohoto bodu proudí opačně (obr. 2.10). Dále se v blízkosti bodu stagnace výrazně rozcházejí proudnice a velikost tangenciální a úhlové rychlosti se zmenší v důsledku rovnice kontinuity. Tento proces narušuje rovnováhu a vzniká tak vlnový charakter rotující tekutiny. Následně se proudnice opět sbíhají, což způsobuje nárůst tangenciální rychlosti a pokles rychlosti axiální v blízkosti osy. Vytvoří se oddělená oblast (přezdívaná „vajíčko“, za kterou se ve většině případů vytvoří nestabilní turbulentní proudění (obr. 2.11).

Při vyšších Reynoldsových číslech nestabilita způsobuje osově nesouměrný rozpad víru, který se projevuje jako spirálovité vířivé proudění, nazývané vírový cop (obr. 2.12). Nejčastěji se vyskytuje ve formě jednoduché či dvojité spirály. Vírový cop bývá zviditelněný díky kavitaci, která tento jev doprovází [1].



Obr. 2.12 Vírový cop

## 2.2. Modely základních vírů [4]

Pro popis rychlostního pole za generátorem víru nebo vodní turbínou se využívá různých modelů založených na teoretických profilech základních vírů. Mezi tyto základní modely patří následující tři:

- **Rankinův vír:**

Vykreslení průběhu tangenciální rychlosti  $v_\varphi$  v závislosti na vzdálenosti od osy rotace je na obr. 2.1. Tato závislost je popsána následujícími rovnicemi:

$$v_\varphi = \Omega \cdot r \qquad v_{ax} = V_{ax} \qquad \text{pro } r < r^* \qquad (3)$$

$$v_\varphi = \frac{\Omega r^{*2}}{r} \qquad v_{ax} = V_{ax} \qquad \text{pro } r \geq r^* \qquad (4)$$

- **Lambův vír (Q- vír):**

$$v_\varphi = \frac{\Omega r^{*2}}{r} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r^{*2}}\right) \right] \qquad v_{ax} = V_{ax} \qquad \text{pro } 0 < r < R \qquad (5)$$

- **Batchelorův vír:**

Batchelor jako první odvodil vztah mezi rozložením tangenciální rychlosti a rychlosti axiální. Následně byla jeho práce zdokonalena a výsledkem jsou následující vztahy:

$$v_\varphi = \frac{\Omega r^{*2}}{r} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r^{*2}}\right) \right] \qquad 0 < r < R \qquad (6)$$

$$v_{ax} = V_{ax0} + V_{ax1} \exp\left(-\frac{r^2}{r^{*2}}\right) \quad 0 < r < R \quad (7)$$

Superpozice těchto tří základních modelů vírů může být použita pro popis složitějších rychlostních polí, které vznikají například za oběžným kolem Francisovy turbíny.

### 2.3. Spektrum v přírodě se vyskytujících vírů [1]

V přírodě lze nalézt víry všech velikostí. Od kvantových vírů supratekutého kapalného helia až po rotaci galaktických systémů ve vesmíru lze pozorovat vírový pohyb. Tyto víry vznikají především z důvodu rozdílnosti v hustotě a teplotě, kvůli tření nebo z důvodu působení gravitačního pole. Následující tabulka (tab. 1) poskytuje přehled nejběžnějších v přírodě se vyskytujících vírů seřazených podle velikosti.

Druh víru	Velikost víru (průměr)
Kvantové víry v supratekutém kapalném heliu	$10^{-8}$ cm
Nejmenší turbulentní víry	0,1 cm
Víry vytvářené hmyzem	0,1 – 10 cm
Víry za listy	
Vírové kroužky vznikající při pohybu olivní	
Víření prachu na ulicích	1 – 10 m
Vodní víry ve slapových proudech	
Prašné bouře	
Vírové kroužky při vulkanických erupcích	100 – 1000 m
Větrné a vodní smrště	
Proudění v mracích	
Víry, které se separují od Golského proudu	100 – 2000 km
Hurikány	
Fronty nízkého a vysokého tlaku	
Cirkulace v oceánech	2000– 5000 km
Obecná cirkulace v atmosféře	
Proudění v supercelách v atmosféře Země	
Atmosféry planet	5000 – $10^5$ km
„Great Red Spot“ Jupiteru (velké červená skvrna)	
Skvrny na Slunci	
Rotace uvnitř hvězd	Závisí na velikosti hvězdy
Galaxie	V řádu světelných let

Tab. 2.1 Přehled nejběžnějších v přírodě se vyskytujících vírů

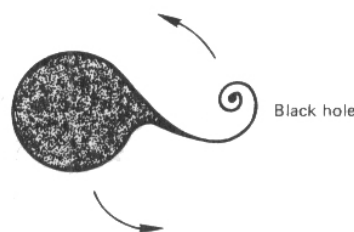
### 3. Vírový pohyb ve vesmíru

Hvězdy s planetami, hvězdokupy i galaxie jsou rotující systémy obrovských rozměrů. Galaktické víry lze řadit mezi doposud největší víry, které byly kdy pozorovány. Galaxie se dělí do tří základních typů: eliptické, spirální a nepravidelné. Galaxie Mléčná dráha, do které patří i naše Sluneční soustava, je jednou z mnoha galaxií spirálních. Právě u spirálních galaxií je nejvíce zřetelný rotační (vírový) pohyb (obr. 3.1).



Obr.3.1 Spirální galaxie

Dalším příkladem vírového pohybu ve vesmíru je černá díra. Astrofyzikové jsou přesvědčeni, že v případě hvězdy s hmotností větší než trojnásobek hmotnosti našeho Slunce, nukleární síly nemohou zabránit gravitačnímu zhroucení hvězdy a vznikne černá díra [1]. Přímá pozorování černých děr nejsou možná, protože jejich gravitační síla je tak velká, že jim neunikne ani světlo. Z tohoto důvodu je velmi obtížné černé díry ve vesmíru identifikovat. V současné době je hlavním důkazem existence černých děr působení jejich gravitačního pole na okolní vesmírná tělesa. Černá díra rotuje kolem své osy a proto vesmírná tělesa, která jsou vystavena jejímu gravitačnímu působení, spirálovitě krouží kolem jejího středu, podobně jako vodní vír při vypouštění vody z umyvadla [1]. Schématické zobrazení tohoto pohybu je na obr.3.2.

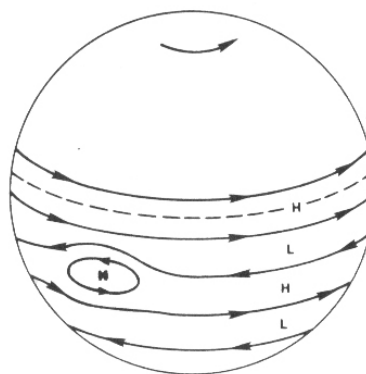


Obr.3.2 Důsledek působení černé díry

Většina planet je obalena plynovou vrstvou (atmosférou) nebo se přímo skládá převážně z plynů s pevným nebo tekutým jádrem. V takovém plynném prostředí se odehrávají různé meteorologické jevy, způsobené především rotací samotných planet. Tyto meteorologické jevy jsou ovšem odlišné od pozemských, a to především z důvodu odlišnosti v chemickém složení a fyzikálních parametrech planet. Atmosférické pohyby záleží především na úhlové rychlosti dané planetou a intenzitě tepelné výměny mezi rovníkem a póly [1]. Důkaz atmosférických pohybů je viditelný na největší planetě Sluneční soustavy, Jupiteru (obr.3.3). Především z důvodu malého teplotního rozdílu (méně než 3 °C) mezi póly a rovníkem je atmosféra Jupiteru charakteristická svým rozdělením do zón (pásů) vysokého a nízkého tlaku (obr.3.4) [1]. Tyto tlakové pásy se pohybují navzájem opačnými směry a na jejich rozhraní často vzniká víření obrovských rozměrů. Jedním z dobře viditelných a poměrně stálých vírů Jupiteru je tzv. „The Great Red Spot“ (obr.3.3). Tento obří vír tvoří překážku v tryskovém proudění v atmosféře Jupiteru, což má za následek vznik výrazných turbulentních stop [1].



Obr.3.3 Vírový pohyb na Jupiteru



Obr.3.4 Schéma tlakových pásů Jupiteru

## 4. Víry v Zemské atmosféře a oceánech

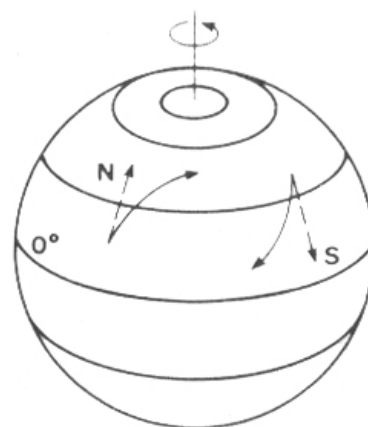
### 4.1. Vlastnosti Země ovlivňující tvorbu vírů

#### 4.1.1. Coriolisova síla [1]

Pro místní proudění (například v laboratorních experimentech) se často předpokládá, že rotace Země má zanedbatelný vliv na vírový pohyb. Tento předpoklad je většinou pro místní proudění správný. Rozdílná situace ovšem nastane ve vírech větších rozměrů, které jsou výrazně ovlivněny rotací Země. Newtonovy pohybové zákony pro rotující systém (Zemi) jsou odlišné od Newtonových zákonů pro přímočarý pohyb. Tato odlišnost spočívá ve zrychlení. Pro rotující systém je zavedeno tzv. Coriolisovo zrychlení a odstředivé zrychlení. Tyto dvě složky zrychlení vynásobené hmotností se objeví i v rovnici silové rovnováhy. Lze tedy hovořit o odstředivé a Coriolisově síle. Odstředivá síla působí vždy ve směru kolmém na osu rotace a její velikost se mění lineárně se vzdáleností od této osy a kvadraticky s úhlovou rychlostí. Coriolisova síla ovšem působí kolmo na osu rotace a také kolmo na relativní rychlost. Tento poznatek přímo vyplývá z definice Coriolisova zrychlení (z vektorového součinu):

$$\vec{a}_{cor} = 2 \cdot (\vec{\omega}_{un} \times \vec{v}_{rel}) \quad [5] \quad (8)$$

Působení Coriolisovy síly a její vliv na tvorbu víru na Zemi je patrný na následujícím příkladě: Částice na povrchu Země se pohybuje směrem od rovníku na sever a protíná zeměpisné šířky, které jsou reprezentovány pomyslnými kružnicemi. Poloměr těchto kružnic se s postupem částice zmenšuje. Z důvodu zachování své úhlové rychlosti, kterou měla na rovníku, se musí částice v závislosti na svém postupu na sever otáčet větší úhlovou rychlostí než Země. Z tohoto důvodu se bude tato částice odklánět směrem doprava (obr. 4.1). Částice, která se naopak pohybuje ze severu směrem k rovníku bude zpomalována vzhledem k povrchu Země a proto je odkláněna také vpravo (pohled ve směru pohybu částice) (obr. 4.1). Na jižní polokouli by se tato částice v obou případech odkláněla z důvodu působení Coriolisovy síly opačně, tedy vlevo. Smysl otáčení shodný s otáčením hodinových ručiček se nazývá anticyklonický (oblast vysokého tlaku) a smysl otáčení proti směru hodinových ručiček se nazývá cyklonický (oblast nízkého tlaku). Je tedy zřejmé, že rotace Země je schopna vytvořit víry v atmosféře i v oceánech přerovzdělováním vířivosti. Tyto víry se však zásadně odlišují od vírů v nerotujících systémech. Zatímco v nerotujícím systému je tlak minimální vždy ve středu víru (viz. např. Rankinův vír), tlak ve středu víru v rotujícím systému může být minimální nebo maximální, v závislosti na směru rotace. Při cyklonické rotaci je tlak ve středu víru minimální, zatímco při anticyklonické rotaci je tlak ve středu víru maximální. Toto pojetí nízkého a vysokého tlaku je dobře známé z meteorologických map.



Obr. 4.1 Vliv Coriolisovy síly na pohyb částice

Podmínky, při kterých Coriolisova síla způsobuje pozorovatelný účinek, závisí na velikosti okolních sil. V atmosféře i oceánech se vyskytují setrvačné a třecí síly. Jejich poměr

vyjadřuje Reynoldsovo číslo (viz. kap. 2.1.3). V souvislosti s Coriolisovou silou je možné definovat dvě nová bezrozměrná čísla: Poměr setrvačné síly k síle Coriolisově se nazývá Rossbyho číslo ( $Ro$ ), a poměr třecí síly k síle Coriolisově se nazývá číslo Ekmanovo ( $Ek$ ). Ve většině pohybech v atmosféře a oceánech je setrvačná síla výrazně větší než síla třecí. Z tohoto důvodu má Rossbyho číslo větší význam než číslo Ekmanovo. Rossbyho číslo je proto často používáno jako kritérium ke stanovení vlivu rotace Země na pohyb tekutin. Rossbyho číslo může být matematicky vyjádřeno následujícím způsobem:

$$Ro = \frac{V}{L \cdot f} = \frac{\omega}{f} \quad (9)$$

kde  $L$  je charakteristická délka,  $V$  je charakteristická rychlost,  $\omega$  je charakteristická vířivost vztahená k rotujícímu systému a  $f$  je Coriolisův parametr daný vztahem:  $f = 2 \cdot \Omega \cdot \sin \Phi$ , kde  $\Omega$  je úhlová rychlost rotace Země a  $\Phi$  je zeměpisná šířka. K popisu vírů je užitečné používat druhou formu Rossbyho čísla. Kritická hodnota Rossbyho čísla, která udává hranici pro pozorovatelný vliv zemské rotace, je okolo  $Ro = 10^4$ . Z definice Rossbyho čísla je patrné, že čím menší je toto číslo, tím větší vliv na daný pohyb má rotace Země (Coriolisova síla).

#### 4.1.2. Ostatní vlastnosti Země ovlivňující pohyb vírů

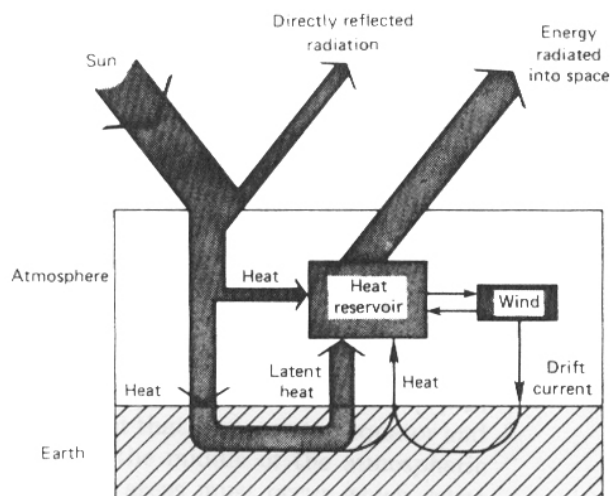
V nehomogenní tekutině (tj. tekutina s odlišnou hustotou v různých místech) lze pozorovat jisté odlišnosti v jejich pohybech, které v homogenní tekutině spatřit nelze. Tekutina, skládající se z jednotlivých médií o různé hustotě (způsobené rozdílností tlaků, teplot nebo složením), se nazývá vrstvená. Atmosféra a oceán jsou typickým příkladem takové tekutiny. Nejdůležitější vlastností vrstvených tekutin, přesněji proudění ve vrstvených tekutinách, je jejich schopnost přenášet energii ve formě vln. Mezi vlnami a víry existuje zásadní odlišnost. Zatímco vlny nepřemísťují žádnou hmotu, ale energii ano, vírový pohyb je spojen s přemísťováním hmoty i energie. Proudění ve vrstvených tekutinách má kromě schopnosti vytvářet vlny další důležitou vlastnost. Je schopné produkovat vířivost. Doposud byla vždy uvažována homogenní tekutina, kde vznik vířivosti je podmíněn existencí obtékaného povrchu (viz. kap. 2.1.2 – obtékání těles v podobě disku a koule). Ve vrstvených tekutinách může být vířivost vytvářena i uvnitř (mimo povrch) prostřednictvím vln. Ve viskózních vrstvených tekutinách je tedy vířivost vytvářena v blízkosti povrchů i prostřednictvím vln [1]. Za vrstvenou tekutinu lze tedy považovat i atmosféru a oceány na Zemi. Z tohoto důvodu jsou výše popsání skutečnosti důležité pro pochopení jevů odehrávajících se v atmosféře Země.

Dalším významným faktorem ovlivňujícím tvorbu vírů na Zemi je přenos tepla z rovníku, kde je vyšší intenzita dopadajícího slunečního záření, směrem k pólům, kde je tato intenzita nižší. Tento proces přenosu tepla je uskutečňován především prostřednictvím proudění v atmosféře a prostřednictvím mořských proudů. Na obr. 4.2 je schematicky zobrazen proces přenosu tepla mezi Zemí a okolním vesmírem. Ve smyslu výměny tepla mezi rovníkem a póly je vliv místních větrů zanedbatelný. Mnohem významnější však jsou pasátové větry (pasáty) a monzunové větry (monzuny). Popsání obecné cirkulace atmosféry je velmi složité především z důvodu mnoha neustále se měnících parametrů. Je třeba také zahrnout mnoho rušivých vlivů. Postupem času vznikaly různé hypotézy pro obecnou cirkulaci atmosféry. Z dosavadních znalostí vznikla hypotéza, kterou je možné považovat za

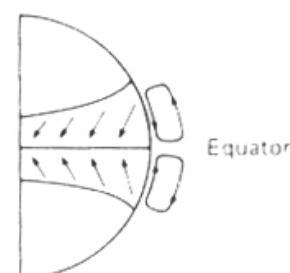
doposud nejpřesnější. Podmínkou platnosti této hypotézy je uvažování Země jako homogenní a symetrické, což znamená, že pohyby atmosféry jsou zrcadlově podobné na severní a jižní polokouli. Nejstabilnějším větrným systémem jsou pasáty. Skládají se ze dvou vírových kroužků severně a jižně od rovníku. Na rovníku je vzduch nejvíce ohříván slunečními paprsky a z tohoto důvodu stoupá vzhůru a proudí až ke  $30^\circ$  zeměpisné šířky, kde klesá a vrací se zpět směrem k rovníku. Tato cirkulace je ovšem ovlivněna působením Coriolisovy síly, a proto jsou pasátové větry stáčeny příslušným směrem (obr. 4.3). Meridiánové proudění na Zemi lze rozdělit do tzv. buněk (někdy také nazývané cely) (obr. 4.4). Pasáty tvoří tzv. Hadleyovu buňku. V rozmezí  $30^\circ - 60^\circ$  zeměpisné

šířky jsou pohyby atmosféry proměnné v porovnání se stabilními pasáty. Tlakové výše a níže vznikají a zanikají v závislosti na zápodo-východním proudění. V těchto zeměpisných šířkách je teplotní gradient mezi rovníkem a póly největší a výměnu energií a hybností nelze zajistit pouze jednoduchou cirkulací se stálými lokálními rychlostmi proudění, jak je tomu v případě Hadleyho buňky. Proudění se stává nestabilním a vyvíjejí se vírové systémy, které přebírají kontrolu nad přemísťováním energií a hybností. Nicméně průměrné roční charakteristiky proudění v těchto zeměpisných šířkách vykazují existenci meridiánové cirkulace atmosféry. Tato cirkulace, nazývaná Ferrellova buňka, ovšem existuje jen ze statistického pohledu. Slabá polární buňka doposud nebyla přímo měřena [1].

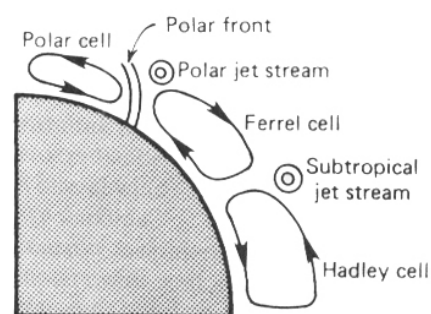
Další vlastností atmosféry, která ovlivňuje tvorbu vírů na Zemi (především hurikánů a tornád) je tryskové proudění neboli „jet stream“. Tryskové proudění dosahuje rychlostí v řádech stovek kilometrů za hodinu a je charakterizováno čtyřmi úzkými klikatícími se proudy vzduchu, které jsou několik stovek kilometrů široké a několik kilometrů vysoké a rozprostírají se tisíce kilometrů kolem naší planety (obr. 4.5). Poprvé bylo objeveno během druhé světové války, kdy průzkumné letouny a těžké bombardéry letící ve vysokých nadmořských výškách byly těmito proudy urychlovány a dosáhly své destinace dřív, než se předpokládalo [1]. V současné době jsou tyto proudy částečně využívány v letecké dopravě. Z důvodu jejich nestability je však jejich predikce velice náročná.



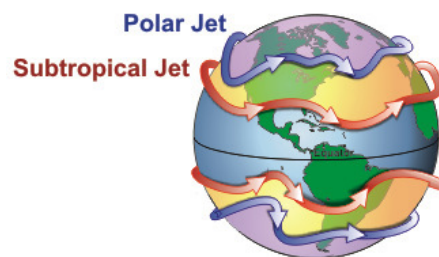
Obr. 4.2 Proces přenosu tepla mezi Zemí a vesmírem



Obr. 4.3 Vliv Coriolisovy síly na pasátové proudění



Obr. 4.4 Cirkulace atmosféry



Obr. 4.5 Tryskové proudění

## 4.2. Víry v atmosféře

Vrstva vzduchu, která obklopuje Zemi, je v porovnání s jejími rozměry velice tenká. V atmosféře vznikají víry mnoha velikostí, jak uvádí tab. 1 (kap. 2.3). Za předpokladu, že bereme v úvahu víry s průměrem v rozmezí přibližně 10 m – 2000 km, lze provést rozdělení do následujících dvou skupin:

- **Víry rovinné** – Poměr průměru víru k délce jeho osy je velmi vysoký (řádově deset a více). Typickým příkladem vírů tohoto druhu jsou hurikány, které mají průměr pohybující se okolo 1000 km, zatímco jejich výška (délka osy) dosahuje přibližně 10 km.
- **Víry sloupcové (lokální)** – Poměr průměru víru k délce jeho osy je malý (řádově setiny, desetiny). Typickým příkladem takovýchto vírů jsou tornáda nebo prашné bouře [1].

### 4.2.1. Tornáda

V tornádech je dosahováno největších lokálních rychlostí vzduchu na Zemi. Tyto sloupcové vzdušné víry s průměrem do 500 m a výškou okolo 3 km dosahují obvodových rychlostí až 200 m/s. Tornáda mohou být pozorována na všech kontinentech, nicméně kromě Spojených států amerických a Austrálie je jejich výskyt spíše výjimečný. Nejčastější výskyt tornád je přisuzován americkému státu Texas, kde jich lze pozorovat více než 130 za rok. Tornáda se také velmi často vyskytují uvnitř hurikánů. Pro vznik a udržování tornáda je nutná podmínka existence vířivosti, která má ve většině případů původ v atmosférických cyklónách. Cyklonický pohyb je charakterizován smyslem otáčení proti směru hodinových ručiček. Samotné tornádo má relativně malé rozměry vzhledem k Zemi, a tudíž účinek Coriolisovy síly se téměř neprojeví. Coriolisova síla však výrazně ovlivňuje rotaci cyklón (viz. kap. 4.1.1.) a nepřímo tedy i rotaci tornád. Mezi další důležité faktory ovlivňující vznik a vývoj tornáda patří tryskové proudění a studené fronty. Většina tornád v USA vzniká právě v blízkosti těchto dvou jevů. Studené fronty se pohybují rychleji než fronty teplé a mohou způsobovat nestabilní stav atmosféry, kdy studený vlhký vzduch je tlačěn směrem vzhůru. Tato nestabilita způsobuje prudké bouře, krupobití nebo právě tornáda.

Tornáda jsou typická svým nálevkovitým (komínovým) tvarem, který se s narůstající výškou rozšiřuje dokud nedosáhne základního (mateřského) mračna (obr. 4.6). Nálevkovitá část tornáda bývá většinou označována jako chobot tornáda. Na obrázku 4.7 jsou zobrazeny čtyři základní tvary, které se často vyskytují během „životního“ cyklu tornáda. První fáze je poměrně nestabilní a vzniklé vířivé proudění se povrhu Země dotýká jen v určitých intervalech a krátce (obr. 4.7a). Vzdálený pozorovatel může sledovat „poskakování tornáda“ po povrhu [1]. Vířivé proudění, které se nedotkne zemského povrhu ani jednou, se nazývá tromba. Tento jev nemá téměř žádné ničivé



Obr. 4.6 Skutečné tornádo

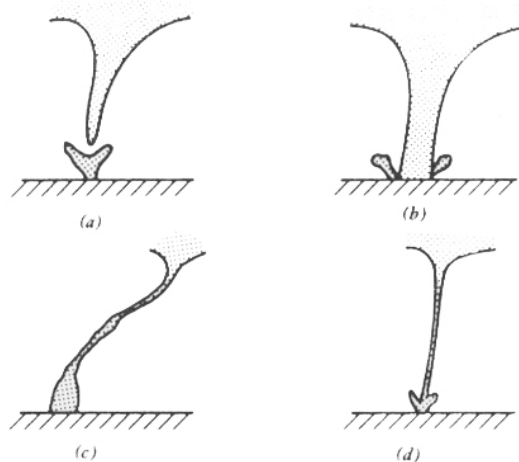
účinky a je poměrně častý i v našich zeměpisných šířkách. Průměrný výskyt pozorovaných tromb na území ČR se pohybuje okolo 14 za rok [6]. Silné tornádo je zobrazeno na obr. 4.7b. Tato fáze je stabilní a vyznačuje se poměrně širokým chobotem. V poslední fázi „životního cyklu“ se chobot tornáda značně zúží a jeho osa je vychýlena z vertikální polohy (obr. 4.7c). Tornádo, které se dotýká vodní plochy, se nazývá vodní smršť. Ta na rozdíl od tornáda má výrazně užší chobot (obr. 4.7d).

Existuje malé množství spolehlivých dat informujících o rozložení tlakového, rychlostního a teplotního pole tornáda. Rozložení velikosti rychlosti (v závislosti na poloměru) přibližně odpovídá Rankinovu víru (kap. 2.1.), ve kterém je proudění silně turbulentní. Hodnoty tlaku v blízkosti jádra tornáda jsou minimální a s rostoucím poloměrem rostou (kap. 2.1.1.). O teplotním poli uvnitř tornáda je toho doposud známo jen velmi málo. Hypoteticky by jádro tornáda mělo být přibližně o 10 °C chladnější než okolní prostředí. Meridiánové proudění vzduchu uvnitř tornáda je schematicky zobrazeno na obr. 4.8. V blízkosti zemského povrchu proudí vzduch radiálně směrem ke středu (vytváří se tzv. Ekmanova vrstva) a následně se pohybuje poměrně velkými rychlostmi (až 70 m/s) vertikálním směrem. Vzdálený pozorovatel sledující pohyb jedné částice uvidí samozřejmě pohyb po spirále. Při proudění vzduchu uvnitř tornáda může dojít i ke vzniku tzv. „vajička“ (viz. kap. 2.1.3.). Výskyt tohoto jevu může naznačovat oslabení, příp. zánik víru.

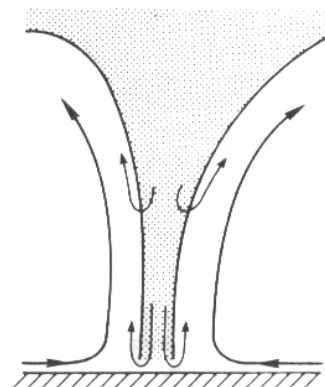
Výskyt tornáda je doprovázen silným zvukovým projevem, který může připomínat zvuk projíždějícího nákladního vlaku nebo bzučení roje včel (správnost těchto přirovnání byla potvrzena akustickou spektrální analýzou). Tyto zvuky jsou způsobeny částečně destrukcí objektů na povrchu a částečně vibracemi víru. Mimo jádro tornáda byly krátkodobě pozorovány menší sekundární víry, které jsou velmi nebezpečné z důvodu své extrémní savosti. V přírodě také není výjimkou jev, kdy se z jednoho mateřského mračka (cyklónu) současně vyvinou dvě či tři tornáda o stejné síle [1].

#### 4.2.2. Hurikány [1]

Za určitých podmínek se mohou vytvořit v blízkosti rovníku atmosférické rozruchy, ze kterých se během několika dní mohou vyvinout velké víry mající 500 – 1000 km v průměru. V těchto tropických bouřích může být dosahováno velkých rychlostí větru. Tropická bouře, při které obvodová rychlost překročí 120 km/h, se nazývá hurikán. V závislosti na místě výskytu je hurikán nazýván odlišně. Hurikány vyskytující se v Tichém oceánu dostaly název „typhoon“, v Indickém oceánu „cyclone“ a v Atlantském oceánu je název beze změny. Časté jsou také lokální pojmenování jako například „cardonazo“ na západním pobřeží Mexika nebo



Obr. 4.7 Fáze tornáda



Obr. 4.8 Meridiánové proudění

„willy - willy“ v Austrálii. Maximální rychlost větru v hurikánu může dosahovat hodnot okolo 250 km/h nad pevninou a 300 km/h nad otevřenou vodní plochou. Hurikán se obvykle pohybuje západním směrem spolu s pasátovým prouděním a následně se stáčí směrem na východ. Rychlost tohoto postupu se pohybuje okolo 20 – 30 km/h. Hurikán „Carrie“, který vznikl 2.9.1957, zaujímá výsadní postavení v délce své trajektorie. Během 22 dnů své existence urazil přes 10 000 km. Z poslední doby stojí za zmínku hurikán „Katrina“ (obr. 4.9 a 4.10), který vznikl 23.8.2005 a napáchal velké škody především v oblasti New Orleans v Severní Americe.

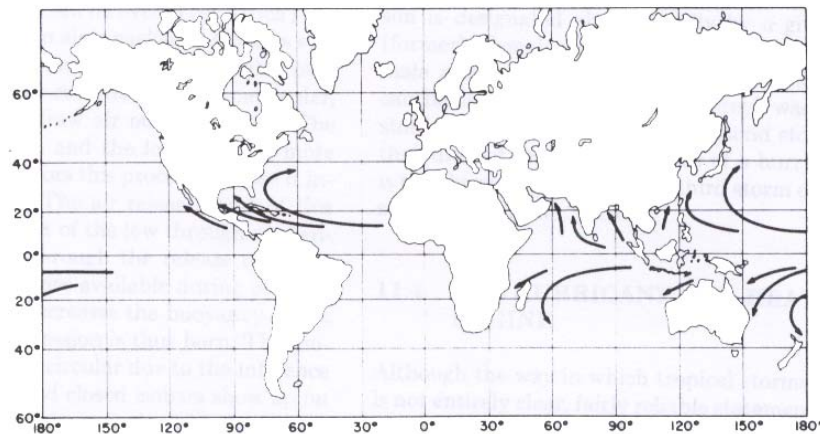
Tropické bouře se vyskytují jen v určitých částech Země (blízkost rovníku) a jen v určitém ročním období. Nejčastější oblasti výskytu tropických bouří jsou zobrazeny na obr. 4.11. Ze začátku jsou jejich trajektorie většinou rovnoběžné s rovníkem a s postupujícím vývojem se od rovníku vzdalují a stáčí se směrem na východ. Nicméně, trajektorie každého hurikánu je originální a je třeba brát v úvahu mnoho faktorů (tryskové proudění, tlakové pole atmosféry apod.). Nejpriznivější období pro vznik tropických bouří je pozdní léto (na severní polokouli) a jaro (na jižní polokouli).



Obr. 4.9 Trajektorie hurikánu Katrina



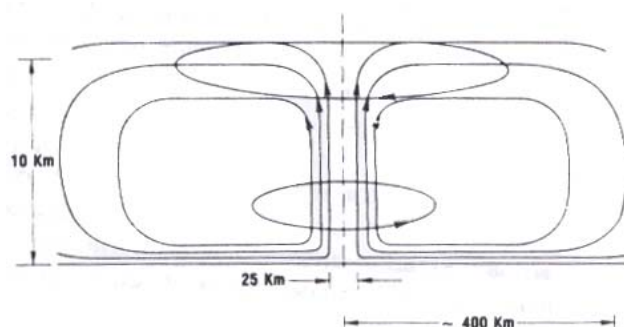
Obr. 4.10 Hurikán Katrina



Obr. 4.11 Hlavní trajektorie tropických bouří na Zemi

Pozorování a měření prováděná pomocí průzkumných letounů a satelitů dávají (spolu s teoretickými poznatky) poměrně dobrou představu o meridiánovém proudění v hurikánu (obr. 4.12). Toto proudění lze rozdělit do dvou základních oblastí. Vírový prstenec (kroužek), který se vytvoří okolo středu tropické bouře, a samotný střed tropické bouře jsou velice odlišné oblasti. Zatímco střed hurikánu, nebo-li oko hurikánu, je poměrně klidná oblast (obr. 4.10), ve vírovém prstenci dosahuje proudění svých maximálních rychlostí. V blízkosti zemského povrchu (vodní plochy) vzduch proudí téměř radiálně směrem ke středu a vzniká tzv. Ekmanova vrstva, která u hurikánu může dosahovat tloušťky okolo 1,5 km. V blízkosti oka hurikánu je proudění v Ekmanově vrstvě odkloněno směrem vzhůru. Při tomto stoupavém proudění kondenzuje vlhkost obsažená ve vzduchu (z důvodu poklesu teploty) a vznikají tak prudké deště. Ve výšce okolo 10 km se proudění vzduchu stáčí směrem od oka hurikánu a u vnější části bouře toto proudění klesá, čímž uzavírá cyklus. Coriolisova síla má významný

vliv na proudění uvnitř hurikánu. Rotace ve spodní části hurikánu má z velké většiny cyklonický charakter a ve výšce okolo 10 km se smysl rotace mění na anticyklonický (obr. 4.12).



Obr. 4.12 Meridiánové proudění v hurikánu

Pro vznik a vývoj tropické bouře jsou nezbytné dvě základní podmínky:

- Existence rozlehlé vodní plochy (moře nebo oceánu) s minimální teplotou vody pohybující se okolo 27 °C
- Existence dostatečně velké Coriolisovy síly

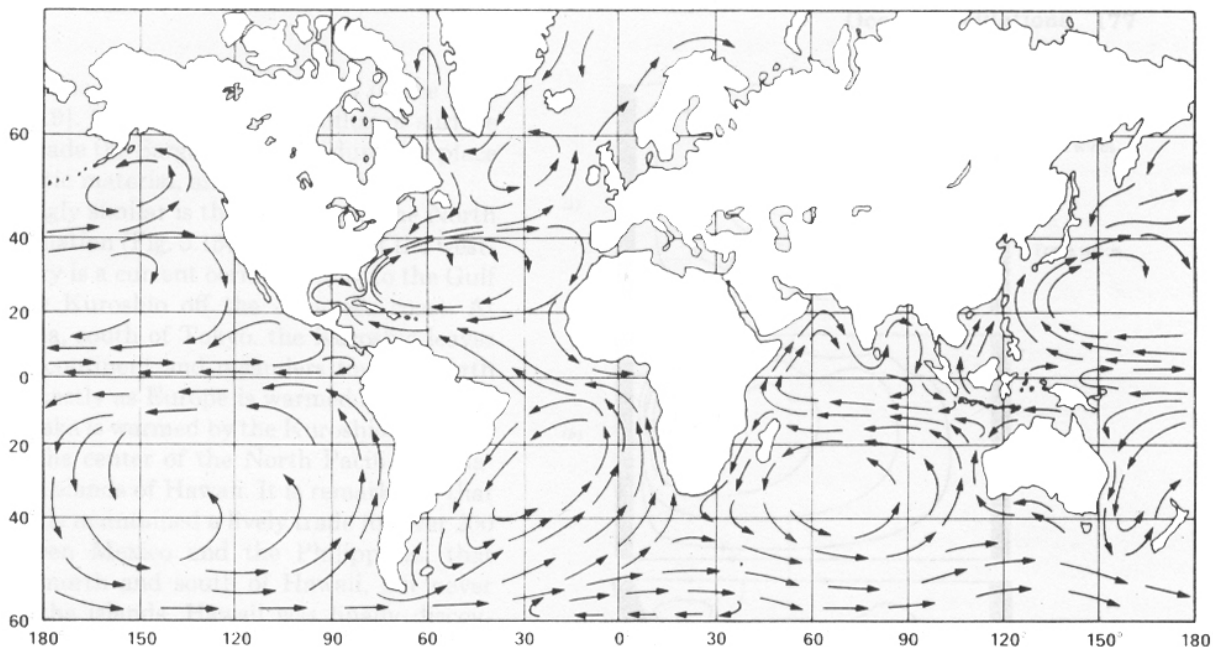
Tyto dvě podmínky jsou hlavním důvodem, proč hurikány a další tropické bouře vznikají výhradně v tropickém a subtropickém podnebném pásu.

Z termodynamického hlediska může být tropická bouře přirovnána k tepelnému motoru. Na otevřeném moři je vzduch syčen vlhkostí, která vzniká odpařováním z povrchu vodní plochy. Během tohoto procesu může být vrchní vrstva moře (oceánu), nad kterou bouře probíhá, ochlazená až o 2 °C. Tímto způsobem tedy atmosféra získá energii potřebnou pro vývoj hurikánu. Radiální proudění vlhkého vzduchu směrem ke středu tropické bouře je zajišťováno pomocí tlakového rozdílu mezi okem a prstencem hurikánu, přičemž v oku je tlakové minimum. Čím větší je tlakový rozdíl, tím silnější bouře může vzniknout. V blízkosti středu (oka) začíná teplý vlhký vzduch stoupat a ochlazuje se prostřednictvím adiabatické expanze. Vlhkost ve vzduchu kondenzuje a vznikají tak prudké deště, které jsou nedílnou součástí každého hurikánu. Tlakové rozdíly spolu se stoupaním teplého vzduchu a následným klesáním vzduchu studeného tvoří základní princip tropických bouří. Účinnost takového tepelného cyklu se pohybuje okolo 3 %. Teplá mořská voda je donorem velké většiny tepla a z tohoto důvodu hurikány při přechodu nad pevninu nebo nad studenější vodní plochu postupně ztrácejí na intenzitě až postupně zanikají. Je nutné dodat, že tropické bouře, narozdíl od tornád, ovlivňují velmi rozlehlé oblasti a způsobují tak ohromné škody.

### 4.3. Víry v oceánech [1]

Obecná cirkulace atmosféry není jediným mechanismem, kterým je udržována tepelná rovnováha na Zemi. Proudění v oceánech se tohoto procesu také účastní, nicméně existují určité rozdíly mezi těmito dvěma mechanismy. Tím nejdůležitějším rozdílem je skutečnost, že oceánské pánve jsou obklopeny přírodním ohraničením v podobě kontinentů, a narozdíl od cirkulace v atmosféře není možné zobecnit cirkulaci v oceánech v závislosti na zeměpisné šířce. Obdobu Hadleyovy buňky tedy v oceánech pozorovat nelze. Cirkulace atmosféry je způsobena rozdílem teplot vzduchu mezi rovníkem a póly. Cirkulace v oceánech je obdobně způsobena rozdílností teplot (a hustot) vody mezi rovníkem a póly, ale uplatňuje se zde ještě další mechanismus. Tímto mechanismem jsou oceánské proudy, způsobené prouděním větru.

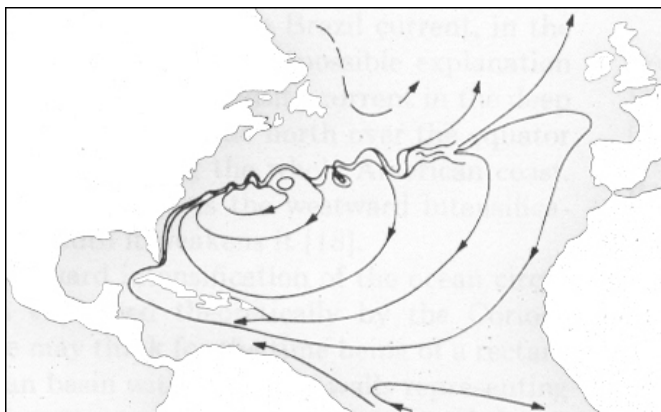
Typickým příkladem mohou být již zmiňované pasátové větry, které předávají část své kinetické energie oceánským proudům. Na obr. 4.13 je vykreslena cirkulace oceánských proudů na Zemi a lze si všimnout hned několika uzavřených „okruhů“, které mohou napovídat o existenci vírových struktur.



Obr. 4.13 Cirkulace oceánských proudů na Zemi

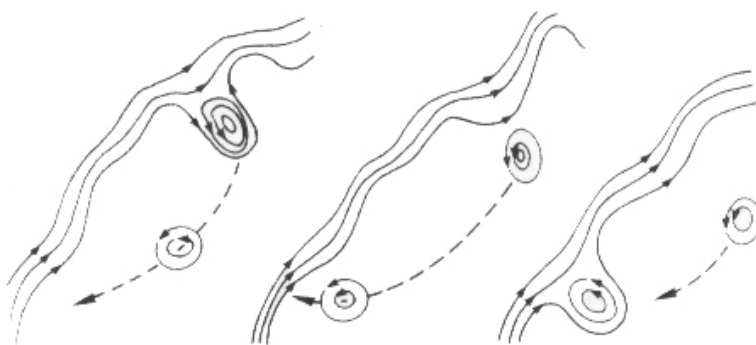
#### 4.3.1. Golfský proud [1]

Při zanedbání výměny vody a tepla se sousedními proudy, lze cirkulaci, jejíž součástí je i Golfský proud, považovat za jeden velký vír (obr. 4.14). Tento vír má dvě specifické vlastnosti. První z nich je silná asymetrie, jejíž důvodem je rychlé proudění v blízkosti Mexického zálivu, a druhou vlastností je klikatící se trajektorie Golfského proudu, při které vzniká další vířivý pohyb. Golfský proud přenáší velké množství tepla a výrazně ovlivňuje podnebí západní Evropy. Tento proud vzniká spojením dvou ramen Severního rovníkového proudu v blízkosti Floridy a dále pokračuje směrem k Evropě (obr. 4.13). Jeho maximální šířka se pohybuje okolo 100 km a rychlost proudění vody je poměrně vysoká (až 3 m/s na povrchu). Byly naměřeny velké rozdíly v teplotách (10 °C) a salinitě (1 ‰) mezi tímto proudem a blízkými okolními vodami. Proudění vody za poloostrovem Florida je charakteristické vznikem slabých, ale stálých vírů, které se podílejí na formování pobřeží (obr. 4.16). Tyto víry rotují proti směru hodinových ručiček a vznikají především z důvodu tření mezi pobřežím a Golfským proudem.

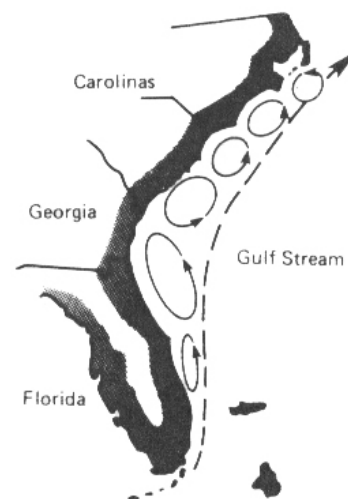


Obr. 4.14 Cirkulace, jejíž součástí je Golfský proud

Proudění v tomto místě vykazuje vlastnosti podobné proudění za tryskou. V blízkosti mysu Hatteras (Carolina, USA) se situace zásadně mění. Golský proud se odtrhává od severoamerického pobřeží a míří směrem na východ. Jeho pohyb je však velice nepravidelný v prostoru a čase.



Obr. 4.15 Odtržení víru od proudu a jeho zpětné pohlcení



Obr. 4.16 Vznik vírů mezi pobřežím Severní Ameriky a Golským proudem

Víry velkých rozměrů se často odtrhávají od hlavního proudu z důvodu náhlé změny směru. Víry odtržené směrem na jih od Golského proudu jsou cyklonické, studené a velké, narozdíl od teplejších anticyklonických vírů vznikajících na sever od Golského proudu. Odtržené víry mohou samostatně existovat i několik týdnů a značně se vzdálit od hlavního proudu. Víry tohoto typu si většinou zachovávají původní vlastnosti vody (salinitu, rozpuštěné látky apod.), čehož bývá často využíváno při pátrání po jejich původu. Pomocí satelitu byl pozorován dokonce případ víru, který měl průměr 200 km a existoval téměř jeden rok. Není také výjimkou, že odtržený vír se opět připojí k hlavnímu proudu (obr. 4.15).

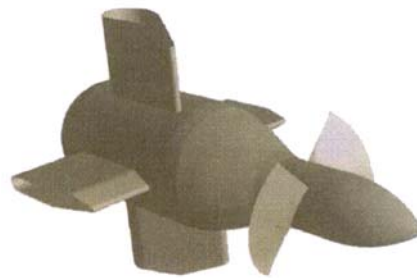
## 5. Víry v technické praxi

### 5.1. Pozitivní využití vírového pohybu

V technice se vyskytuje mnoho aplikací, kde je vírový pohyb přítomný. V některých případech se jedná o jev pozitivní a v některých případech je vírový pohyb nežádoucí. Mezi zařízení, která využívají vírový pohyb pozitivně lze zařadit například:

- Vírovou turbínu – obr. 5.1
- Oddělovače nečistot – obr. 5.2
- Vírové průtokoměry – obr. 5.3, 5.4
- Speciální vírové ventily – obr. 5.5
- Vírovou trubku („Ranque – Hilschovu“ trubku) – obr. 5.6, 5.7
- Gravitační vírovou elektrárnu („Gravitational Vortex Power Plant“) – obr. 5.8
- Centrifugy
- a další

Vírová turbína, vyvinuta na odboru Fluidního inženýrství Victora Kaplana, FSI VUT v Brně, je určena pro lokality se spádem maximálně 3 m. Využití Kaplanových turbín v obdobných případech je vzhledem k jejich složité konstrukci ekonomicky nevýhodné [7]. U vírové turbíny není nutná stavba spirály, protože její konstrukce umožňuje zpracovávat přímý proud (předrotace kapaliny tedy není nutná, tedy  $v_{u1}=0$ ). Z tohoto důvodu může být vírová turbína výhodně využita pro MVE. Výstupem z této turbíny je silně zavířené proudění, což vyplývá z Eulerovy turbínové rovnice, která má tvar:



Obr. 5.1 Vírová turbína

$$\eta_h \cdot Y_t = u_1 \cdot v_{u1} - u_2 \cdot v_{u2} \quad (10)$$

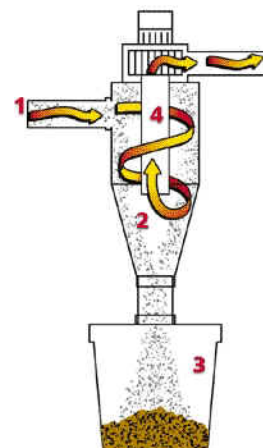
kde  $v_{u1}=0$  a pro vírovou turbínu tedy platí:

$$\eta_h \cdot Y_t = -u_2 \cdot v_{u2} \quad (11)$$

Vírová turbína tedy pracuje inverzním způsobem oproti klasickým turbínám (Francisově, Peltonově apod.) ve smyslu záměny vstupujícího a vystupujícího proudění kapaliny. Pro vírovou turbínu je tedy typický axiální (přímý) vstup proudící kapaliny a rotační (vířivý) výstup.

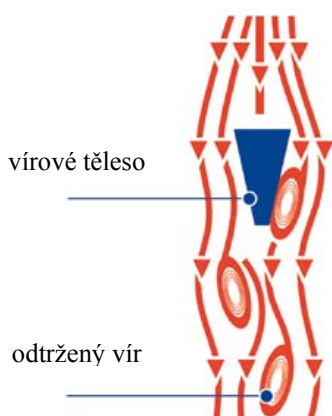
Nádoby s tangenciálním přívodem tekutiny a axiální výpustí jsou často používány jako oddělovače těžších částic (nečistot) ze vzduchu (obr. 5.2). Ventilátorem poháněný vzduch obsahující částice prachu je donucen rotovat v oddělovači nečistot a to tím způsobem, že těžší částice rotují v důsledku působení odstředivé síly v blízkosti stěny nádoby. V okamžiku, kdy rotující vzduch dosáhne trychtýřovité části nádoby (2), těžší částice pokračují ve svém

vířivém pohybu směrem do nádoby (3) a téměř čistý vzduch je nasáván trubicí (4). Tento vzduch je pak pomocí vhodného filtru zbaven drobnějších nečistot a odváděn na výstup ze zařízení. Na podobném principu (působení odstředivé síly) pracují i centrifugy, které lze nalézt v mnoha oborech lidské činnosti. Velmi důležitou úlohu mají například plynové centrifugy, které se uplatňují při obohacování uranu [1].



Obr. 5.2  
Oddělovač částic

Vírový průtokoměr využívá princip Karmánovy vírové stezky (obr. 5.3). V měřicí trubicí průtokoměru je instalováno vírové těleso lichoběžníkového průřezu (obr. 5.4), přičemž na jeho ostrých bočních hranách vznikají víry strhávané proudícím médiem. Víry jsou strhávány periodicky s frekvencí, která je v širokém rozsahu úměrná rychlosti proudění média okolo vírového tělesa. Z naměřené rychlosti (frekvence strhávání vírů) a známého průřezu měřicí trubice lze vypočítat objemový průtok měřeného média. Vírové průtokoměry lze použít k měření průtoku plynů, par i čistých kapalin. Obecně se vyznačují velkým měřicím rozpětím, nevyžadují údržbu, a jsou-li správně navrženy a instalovány, jsou přesné a provozně spolehlivé [8].

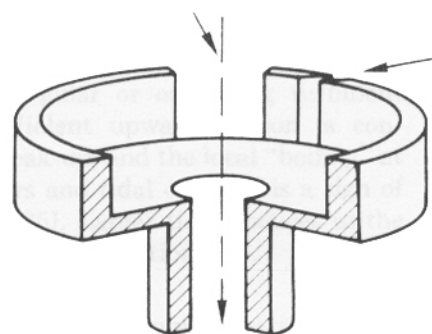


Obr. 5.3 Karmanova vírová stezka



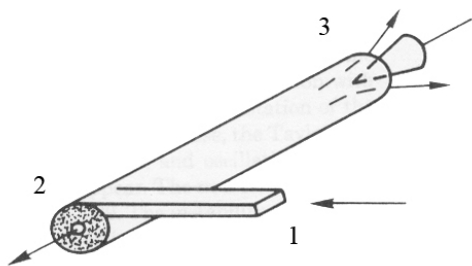
Obr. 5.4 Vnitřní prostor měřicí trubice vírového průtokoměru se snímačem vibrací (v popředí) a vírovým tělesem

Speciální vírové ventily jsou konstruovány bez pohyblivých částí, což v některých zařízeních může být velmi užitečné. Proud tekutiny, který má být regulován, vstupuje do tohoto ventilu v radiálním směru a vystupuje ve směru axiálním. Ve stejném okamžiku je do tohoto ventilu přiváděna také řídicí tekutina (stejněho druhu) ovšem v tangenciálním směru (obr. 5.5). Tyto dva proudy se mísí a vzniká vířivé proudění. Čím větší je proud řídicí, tím menší je proud hlavní (regulovaný). Za určitou dobu je dosaženo stavu, kdy hlavní proud přestane téct úplně [1].

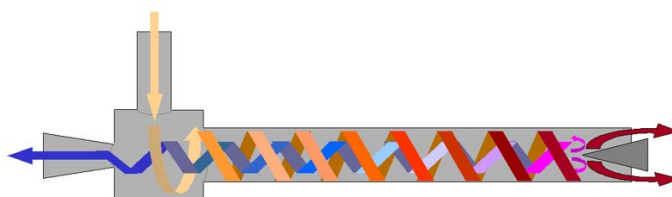


Obr. 5.5 Vírový ventil

Dalším zařízením, které využívá vírový pohyb, je tzv. vírová trubka („Vortex tube“), někdy také označována jako „Ranque–Hilschova“ trubka (obr. 5.6). Proudící tekutinou je stlačený vzduch a toto zařízení může být využito pro chladicí účely. Na jeden konec trubice je přiváděn stlačený vzduch v tangenciálním směru (1) a na stejném konci je umístěn i vypouštěcí kruhový otvor (2). Na opačném konci je umístěn druhý vypouštěcí otvor, který je regulován pomocí ventilu (jehly) (3). Stlačený vzduch je přiváděn do trubky, kde se vytváří vír. Jádru toho víru se ochlazuje (klesá tlak), zatímco vzduch v blízkosti stěn se zahřívá. Studený vzduch uniká z kruhového otvoru (2) a teplý vzduch uniká otvorem umístěným na opačném konci trubice (3). Pomocí ventilu je regulován poměr studeného a teplého vzduchu. Tímto způsobem je možné dosáhnout poměrně nízkých teplot. V literatuře existuje hned několik vysvětlení tohoto jevu. Všechny vysvětlení se shodují, že vzduch v jádru víru je ochlazován pomocí adiabatické expanze a vzduch na vnější straně víru je ohříván působením tlaku, který je způsoben odstředivými silami (obr. 5.7). Existují však odlišné názory na způsob, jakým je energie přenášena z jádra víru směrem ke stěnám trubice a také na způsob, jakým je energie přenášena v axiálním směru. Toto chování je pravděpodobně způsobeno změnou rychlostních a teplotních polí podél osy [1].



Obr. 5.6 Vírová trubice - „Ranque-Hilschova“ trubice



Obr. 5.7 Proudění ve vírové trubici

Další zařízení, které přímo využívá vírový pohyb, je tzv. gravitační vírová vodní elektrárna (obr. 5.8), jejíž doposud jediný prototyp je postaven v rakouském městě Obergrafendorf. Jedná se o experimentální projekt, u něhož doposud nebyly prezentovány výsledky na odpovídající vědecké úrovni. Do této práce je zařazena jen z informativních důvodů.

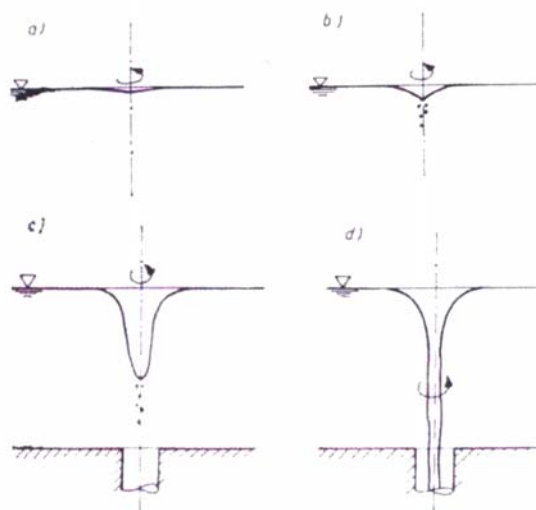


Obr. 5.8 Gravitační vírová vodní elektrárna

## 5.2. Negativní účinky vírového pohybu

### 5.2.1. Vtokové víry [7]

Vtokové (nálevkové) víry se nepříznivě projevují především u nízkotlakých vodních elektráren a v čerpacích stanicích. Dochází ke snížení průtokové kapacity, k pulsacím průtoku, k vibračním zařízením vtoku i vlastnímu hydraulickému stroje a v neposlední řadě i k vysoké intenzitě hluku. Vznik a vývoj vírů může být rozdělen do několika stádií (obr. 5.9). Vznikající vír se z počátku projevuje jako pomalé kroužení na hladině. Jestliže vírový pohyb zesiluje, objevuje se zprvu nepatrná, později však stále zřetelnější prohlubeň na hladině, tzv. hladinový vír (obr. 5.9a). Dalším zesilováním cirkulace se mění tvar víru, zvětšuje se jeho hloubka a vzniká tzv. kuželový vír, charakteristický svým ostrým hrotem (obr. 5.9b). Další stádium víru je typické tím, že délka víru se dále zvětšuje a jednotlivé vzduchové bubliny nebo tuhé částičky se oddělují od hrotu víru a vnikají do sacího potrubí. Tento typ víru se obecně označuje jako neúplný nálevkový vír (obr. 5.9c). Pokračuje-li růst víru dále, souvislé vzduchové jádro dosáhne do sacího potrubí a vznikne tak úplný nálevkový vír, který umožňuje plynulý tok vzduchu z atmosféry do potrubí (obr. 5.9d). Úplný nálevkový vír tedy snižuje průtok vody. Reálný vývoj nálevkového víru je také zřetelně viditelný na obr. 5.10. Negativní účinky na provoz vodních elektráren má ve většině případů i neúplný nálevkový vír, který je příliš slabý na to, aby strhával vzduch do vtoku. Kromě vtokových vírů, jejichž jeden konec je fixován na hladinu, mohou existovat i víry s koncem fixovaným na dno či stěnu nádrže. Tyto víry sice nemohou strhávat vzduch do potrubí, mohou však napomáhat vnikání naplavenin ze dna nádrže. Pro zabránění vzniku vtokových vírů bývají v sacím prostoru nejčastěji instalovány norné stěny, žebra nebo hladinové rošty.



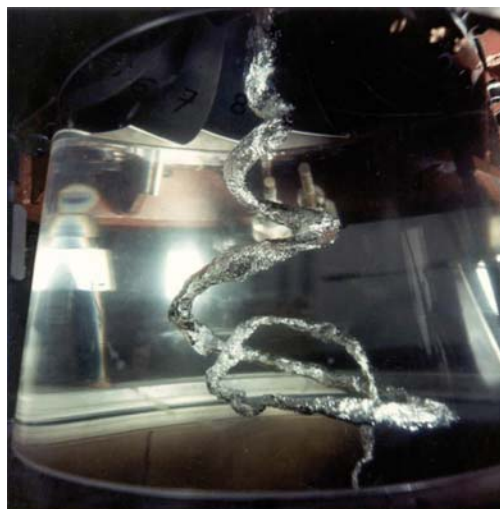
Obr. 5.9 Stádia nálevkového víru



Obr. 5.10 Vývoj nálevkového víru ve skutečnosti

### 5.2.2. Vírový cop [9]

Oběžné kolo přetlakové vodní turbíny je možno v obecném případě identifikovat jako generátor vířivého pohybu kapaliny. Vířivé proudění generované oběžným kolem postupuje dále do oblasti sací roury (savky), kterou jsou z důvodu konstrukčního i energetického vybaveny všechny přetlakové (reakční) vodní turbíny. Instalace savky umožňuje umístění oběžného kola nad hladinu spodní vody, a tím i snadnější přístup při demontáži a opravě turbíny. Z energetického hlediska umožňuje savka částečně zpracovat nevyužitou kinetickou energii za oběžným kolem její přeměnou na energii tlakovou. Kvalita energetické přeměny v savce závisí na geometrii savky a na charakteru rychlostního pole vstupujícího do oblasti savky. U turbíny pracující poblíž optimálních parametrů je většina energie zpracována v oběžném kole a vstup do savky je přibližně axiální. Proudění v savce je ustálené a nejsou zde měřitelné výrazné tlakové pulsace. Problémy nastávají obvykle s nutností regulace výkonu turbíny. V případě provozu turbíny mimo optimální režim dochází ke generaci vírů vlivem nezpracované tangenciální složky rychlosti. V savce dochází ke vzniku nestability vířivého proudění (viz. kap. 2.1.3). V případě dostatečně nízkého místního tlaku bývá pozorováno kavituující duté šroubovitě vírové jádro konající precesní pohyb. Tento jev se nazývá vírový cop. (obr. 5.11) Vířivé proudění v savce je doprovázené tlakovými pulsacemi, které se šíří do celého hydraulického systému a bývá často příčinou provozních problémů vodních elektráren. Za zmínku stojí bezesporu měřitelné zvýšení vibrací vodícího ložiska turbíny, což způsobuje jeho nadměrné opotřebení a tím i snížení doby životnosti. Nepříjemné praskání a bouchání v oblasti savky, šířící se celou budovou elektrárny, je typickým průvodním jevem provozu při částečném výkonu. K nejzávažnějším problémům ovšem dochází v případě rezonance frekvence tlakových pulsací s vlastní frekvencí celého hydraulického systému. Taková situace by si následně vynutila omezení provozního rozsahu turbíny, jelikož hrozí poškození technologického zařízení vodní elektrárny. Je třeba ovšem zdůraznit, že se jedná o problémy spojené zejména s turbínami bez možnosti natáčení oběžných lopatek, tedy turbíny klasické a reverzní typu Francis. U Kaplanových turbín, vybavených natáčivými oběžnými lopatkami, byly pozorovány nestability v oblasti savky pouze při nestandardních režimech provozu.



Obr. 5.11 Vírový cop

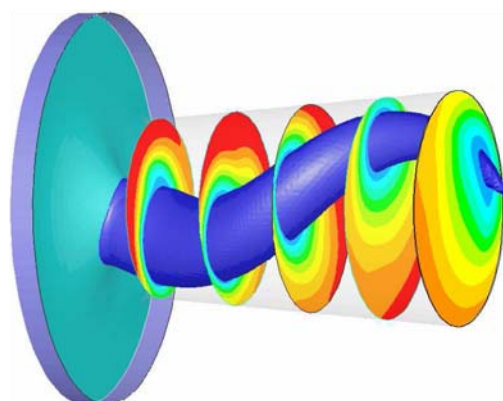
První zmínky o existenci tlakových pulsací u reakční turbíny spadají přibližně do roku 1912. Okolo roku 1940 byl jev zkoumán podrobněji a bylo zjištěno, že tlakové pulsace vznikají v savce. Později byl jako příčina vzniku pulsací stanoven šroubovitý vír v savce vznikající vlivem vířivého proudění při částečných výkonech Francisovy turbíny. Od té doby se mnoho odborníků zabývalo experimentálním a teoretickým výzkumem tohoto jevu. Nejedná se o jev svým charakterem v přírodě či v technické praxi ojedinělý. Již v počátcích výzkumu vířivého proudění v savce byl tento jev přirovnáván k vírům vznikajícím na delta křídle letounu. Stejný charakter vířivého proudění jako v savce vodní turbíny byl pozorován také u plynových hořáků, kde je uměle vytvářena předrotace kvůli dokonalejšímu spalování a stabilizaci plamene. Další příbuzné charakteristiky je možno nalézt v přírodě u vířivého proudění vznikajícího u vyvinutého proudění v tornádu [9] (viz. kap. 4.2.1). V tomto případě

je podobnost těchto jevů patrná již při vizuálním porovnání (obr. 5.11, obr. 5.12). Tornádo a vírový cop tedy mají společné základní vlastnosti vírového pohybu, především rozložení tlakového pole (příp. precesní pohyb). Nicméně, jasný rozdíl je v tekutině, ve které tyto dva jevy vznikají. V přírodě i za oběžným kolem vodní turbíny jsou poměrně časté i případy, kdy existují dvě tornáda, resp. dva vírové copy zároveň.

V současné době již existují sofistikované softwary, pomocí kterých lze chování vírového copu za oběžným kolem vodní turbíny poměrně úspěšně modelovat. Výstupem může být například obr. 5.13, který zároveň ukazuje i okamžité rozložení tlaků ve vybraných řezech. Nicméně, výpočtové modelování proudění je poměrně složitý vědní obor, který přesahuje rozsah této práce.



Obr. 5.12 Příklad tornáda připomínajícího vírový cop



Obr. 5.13 Výpočtové modelování vírového copu a okamžité rozložení tlaku v daných řezech

Z důvodu nutnosti provozovat Francisovy turbíny i při menších výkonech (až do 30%  $P_{\max}$ ) bylo třeba vyvinout a vyzkoušet metody umožňující potlačit tlakové pulsace v hydraulickém systému reálné vodní turbíny. Výzkumy byly prováděny experimentálními metodami na modelu turbíny v laboratoři, některé následně aplikovány na skutečné turbíny. Výjimkou ovšem nejsou elektrárny, kde bylo třeba provozní rozsah turbíny omezit. Metody omezující tvorbu vírového copu jsou následující:

- Zavzdušnění do prostoru savky:  
Metoda zavzdušnění do savky patří k nejpoužívanějším a neúčinnějším metodám. Přivedením vzduchu do oblasti savky, popř. do mezilopatkového prostoru turbíny, dojde ke skokové změně charakteru proudění. Změní se frekvence a zmenší amplituda tlakových pulsací. V závislosti na umístění turbíny pod hladinou spodní vody je možno přivádět vzduch atmosférický nebo je třeba vzduch přivádět pod tlakem.
- Instalace žeber na stěnách savky:  
Umístěním axiálních žeber na stěnu kužele savky dochází k redukci tangenciální hybnosti opouštějící oběžné kolo především při částečném výkonu turbíny. Podtlak, vytvořený na hraně žeber, může být využit na přísávání atmosférického vzduchu tam, kde to umístění turbíny pod hladinou spodní vody neumožňuje.

- Usměrňující vestavby v savce:  
V dřívějších dobách byla tato metoda často používaná, ale příliš se neosvědčila. Jednalo se většinou o poměrně rozměrná žebra instalovaná v celém průřezu savky. Metoda byla málo účinná a konstrukce často nevydržela dynamické zatížení způsobené tlakovými pulsacemi, nebo byla žebra časem kavitací téměř zničena.
- Aktivní řízení generováním protipulsů:  
Tato metoda je poměrně mladá a byla zatím odzkoušena pouze na modelu v laboratoři. Princip spočívá v generování tlakových pulsů, které působí proti pulsům vytvářeným vírovým jádrem v savce. Bohužel, metoda vyžaduje instalaci nákladného zařízení na generování pulsů.
- Gyroskopicky vyvážená savka:  
Tato metoda zatím nebyla nikdy prakticky vyzkoušena a existuje zatím jen ve formě návrhu, podloženého numerickým výpočtem. Jedná se o návrh dvoukolenové savky. Druhé koleno (dle výpočtů) přispívá k lepšímu tlumení víru, přičemž rozhodující pro správnou funkci této metody je vzdálenost mezi oběma koleny.
- Rotující kroužek pod oběžným kolem:  
Pod oběžné kolo je umístěn kroužek, který transformuje energii obvodové složky na rotaci tohoto kroužku. Přenos energie je proveden pomocí axiálních žebor. Realizace této metody v praxi není známa [9].

## 6. Experiment

Hlavním cílem tohoto experimentu bylo ověřit teoretické poznatky o vírovém pohybu. Celý experiment lze rozdělit do tří fází, ve kterých bylo postupně dosahováno cílů dílčích. Fáze a současně dílčí cíle projektu jsou následující:

- Stanovení závislosti rozměru hladinového víru v axiálním směru na Reynoldsově čísla pro různé kapaliny (kap. 6.2.)
- Určení radiálního rozměru hladinového víru (kap. 6.3.)
- Vizualizace vírového pohybu (kap. 6.4)

### 6.1. Popis použitého zařízení

Při všech prezentovaných měřeních bylo použito přístrojů, které jsou součástí výbavy laboratoře Odboru fluidního inženýrství FSI, VUT v Brně. Měřicí sestava obsahovala následující hlavní části (obr. 6.1):

- 1 - magnetická míchačka
- 2 - stroboskopická lampa
- 3 - skleněná válcová nádoba o objemu 1 litr
- 4 - míchací tyčinky o průměrech 4, 6 a 8 mm
- 5 - laserové ukazovátka + posuvný stojan se stupnicí pro měření vzdálenosti
- 6 - stínítko

Během experimentu byly dále použity:

- kapaliny: voda, denaturovaný líh (98 %), roztok prášku do myčky a vody o koncentraci 10g/800ml, slunečnicový olej a olivový olej
- barvivo na textil
- injekční stříkačka s jehlou
- čajové lístky
- rotační digitální viskozimetr DV-2P, (výrobce: Anton Paar)
- SEE System pro měření povrchového napětí
- roztok vody a fluoresceinu
- UV lampa



Obr. 6.1 Měřicí sestava

## 6.2. Stanovení závislosti rozměru hladinového víru v axiálním směru na Reynoldsově čísle pro různé kapaliny

Cílem této části experimentu bylo srovnání závislosti rozměru víru v axiálním směru (dále označováno jako  $L$ ) na Reynoldsově čísle pro různé kapaliny. Experiment byl prováděn s těmito druhy kapalin:

- voda
- líh (denaturovaný, 98 %)
- roztok vody a prášku do myčky (sloužícího jako surfaktant)

### Postup měření byl následující:

- 1) Do válcové nádoby bylo nalito 800 ml sledované kapaliny. Tato nádoba byla následně umístěna na magnetickou míchačku a byla do ní vložena kovová tyčinka určitého průměru. Po zapnutí míchačky se začne vytvářet točivé magnetické pole, které roztáhne kovovou tyčinku v nádobě s kapalinou. Tímto způsobem vznikne vířivý pohyb kapaliny, který je možné regulovat pomocí otáček vytvářeného magnetického pole.
- 2) Pomocí stroboskopické lampy byla míchací tyčinka zdánlivě zastavována a z displeje tohoto přístroje odečítána hodnota otáček. Tímto způsobem byly postupně určovány otáčky kapaliny, ve které se vytvářel hladinový vír.
- 3) Měření axiálního rozměru víru  $L$  bylo prováděno pomocí laserového ukazovátka, které bylo umístěno na posuvném stojanu se stupnicí pro měření vzdálenosti. Při každém novém nastavení otáček byla pomocí laserového paprsku a stínítka změřena výška hladiny za rotace a následně hodnota výšky hrotu hladinového víru. Výsledný axiální rozměr víru je určen rozdílem těchto dvou hodnot. Tato měřicí metoda je založena na principech optické fyziky. Na rozhraní dvou různých optických prostředí dochází k lomu paprsku. Pro hladinu kapaliny i hrot víru je charakteristické rozhraní dvou různých optických prostředí voda – vzduch, což způsobuje lom (rozptýlení, rozkmitání) laserového paprsku. Tato změna průchodu paprsku je pozorovatelná na stínítku umístěném za nádobou.
- 4) Otáčky byly postupně zvyšovány od základních k maximálním, přičemž základní otáčky byly určeny měřitelnou vzdáleností hrotu víru a hladiny a maximální otáčky byly dány maximálním výkonem magnetické míchačky.
- 5) Závislost axiálního rozměru víru  $L$  na otáčkách byla zapisována do tabulky. Hodnota otáček byla dále přepočítána na Reynoldsovo číslo pomocí následujícího vzorce:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D_t}{\nu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R_n \cdot D_t}{\nu \cdot 60} \quad (12)$$

kde  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] jsou otáčky,  $R_n$  [m] je poloměr nádoby a  $D_t$  [m] je průměr míchací tyčinky. Kinematická viskozita  $\nu$ , resp. dynamická viskozita  $\mu$ , byla pro vodu a roztok vody s práškem změřena experimentálně pomocí rotačního digitálního viskozimetru (viz. kap. 6.2.1.).

- 6) Měření s každou kapalinou dle bodů 1) – 4) bylo postupně prováděno se třemi míchacími tyčinkami o průměrech 4 mm, 6 mm a 8 mm. Výsledná závislost rozměru víru  $L$  na Reynoldsově čísle pro různé kapaliny a míchací tyčinky byla následně vynesena do grafů.

### 6.2.1. Stanovení kinematické viskozity

Stanovení kinematické viskozity  $\nu$  u vody a roztoku vody s práškem probíhalo v několika krocích. Nejdříve byla změřena hodnota dynamické viskozity  $\mu$  pomocí rotačního digitálního viskozimetru DV-2P. Bylo změřeno šedesát hodnot pro každou kapalinu a z nich spočítán průměr. Dynamická viskozita byla dále přepočítána na hodnotu kinematické viskozity pomocí následujícího vzorce:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (13)$$

Hustota  $\rho$  byla u vody i u roztoku vody s práškem brána jako konstanta rovná hodnotě 1000 kg/m<sup>3</sup>. Kinematická viskozita lihu byla spočítána pomocí (13) a tabelovaných hodnot. Je třeba zdůraznit, že naměřené hodnoty dynamické viskozity pomocí daného přístroje, a tudíž i viskozity kinematické, neodpovídají dle očekávání hodnotám tabelovaným pro dané kapaliny. Z tohoto důvodu byla změřena viskozita vody a porovnána s příslušnou tabelovanou hodnotou a jejich rozdíl lze již považovat za statisticky významný (větší než 5%). Hodnoty naměřených, resp. vypočítaných kinematických viskozit jsou tedy brány pouze jako relativní. Pro porovnávací účely v této práci je však tato aproximace dostačující. Výsledné hodnoty kinematických viskozit jsou uvedeny v tabulce 6.1.

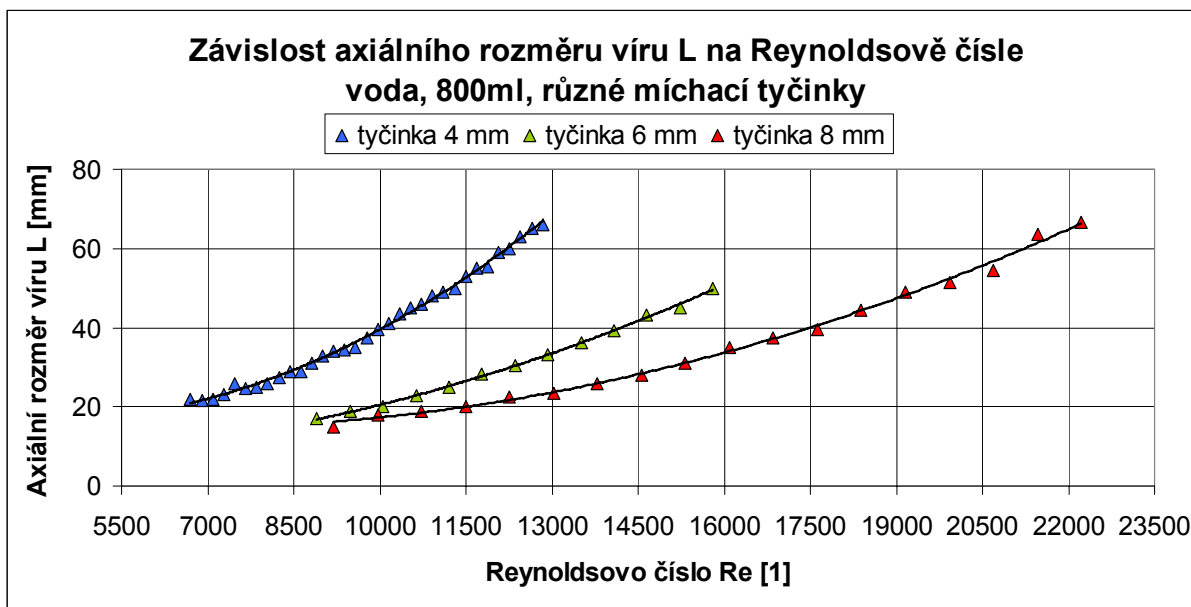
<b>Srovnání kinematických viskozit jednotlivých kapalin</b>			
	<b>Voda</b>	<b>Roztok vody a prášku</b>	<b>Lih</b>
<b>Kinematická viskozita <math>\nu</math> [m<sup>2</sup>*s<sup>-1</sup>]</b>	0,9834*10 <sup>-6</sup>	1,049*10 <sup>-6</sup>	1,521*10 <sup>-6</sup>

Tab. 6.1 Srovnání kinematických viskozit jednotlivých kapalin

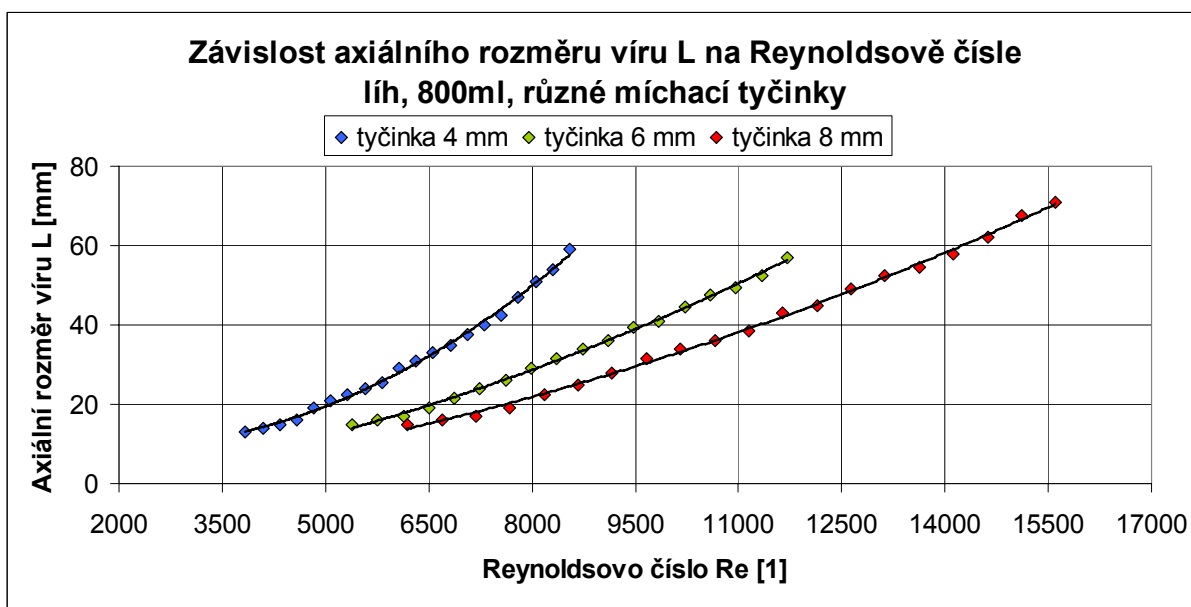
V tabulce 6.1 je významný především rozdíl v hodnotě kinematické viskozity lihu a dvou ostatních kapalin. Reynoldsovo číslo je dle (12) nepřímo úměrné kinematické viskozitě dané kapaliny. Se vrůstající hodnotou kinematické viskozity tedy Reynoldsovo číslo klesá, což se projevilo například v grafech 6.5 - 6.7, kde líh dosahuje nejmenších  $Re$  (nejmenší míry turbulentního proudění) z daných kapalin.

## 6.2.2. Grafické vyjádření naměřených hodnot

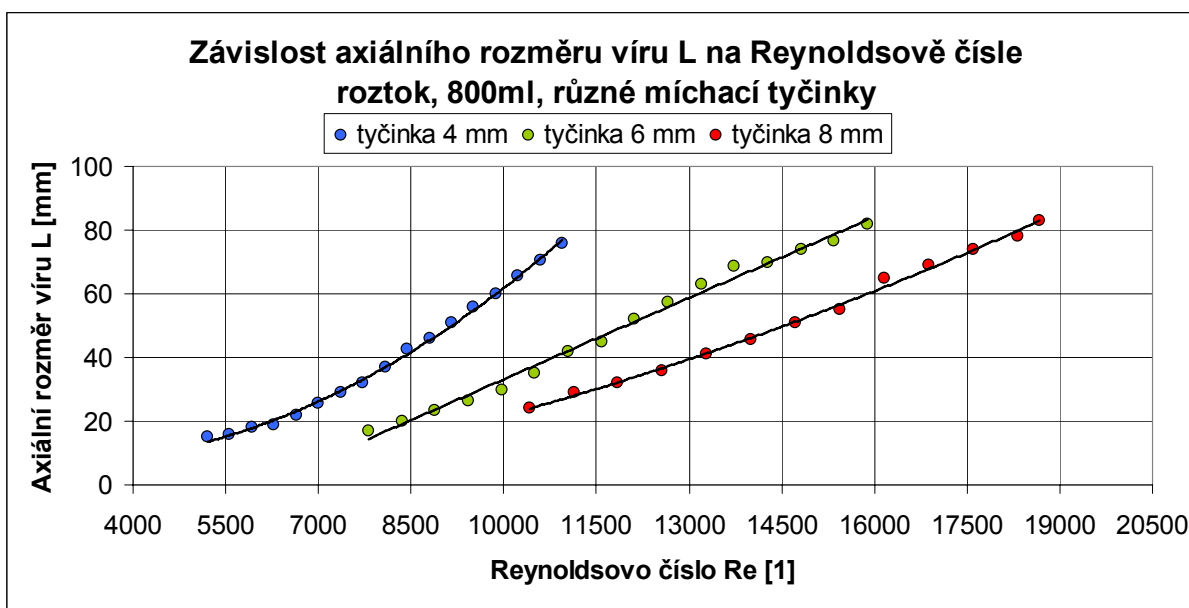
Následující výsledky měření porovnávají každou kapalinu samostatně a ukazují vliv průměru míchací tyčinky na axiální rozměr víru. Vynesené hodnoty jsou vždy proloženy křivkou, která je sestrojena pomocí polynomického členu druhého stupně v programu Excel.



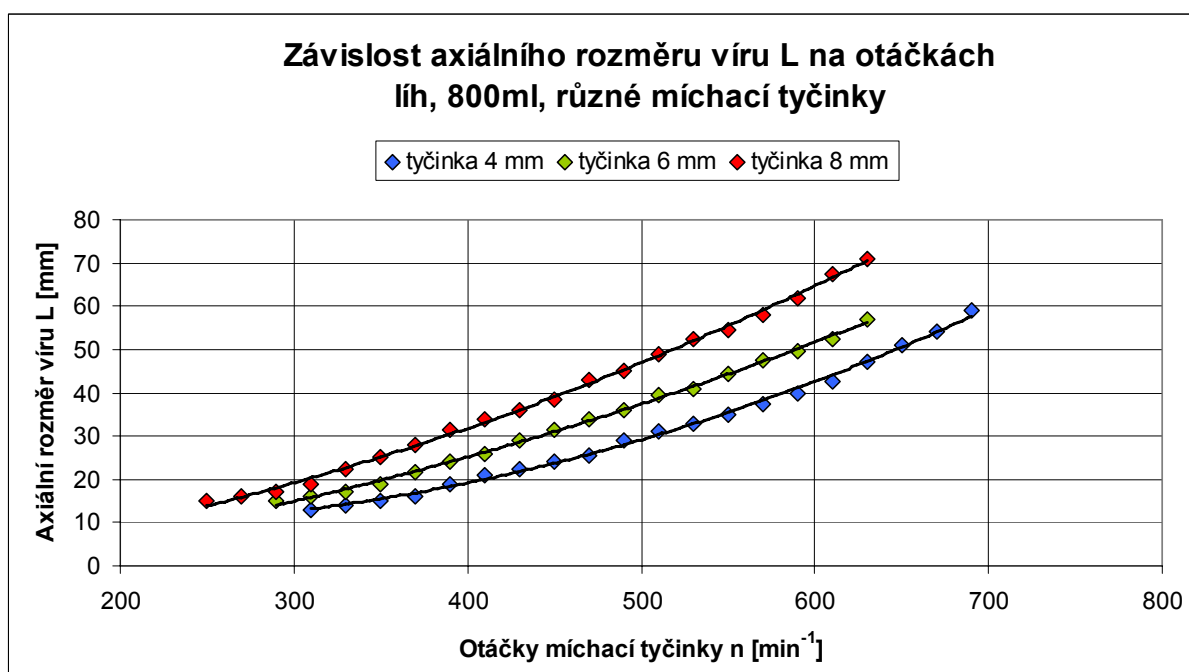
Graf 6.1 Srovnání naměřených hodnot pro různé míchací tyčinky a vodu,  $L=f(Re)$



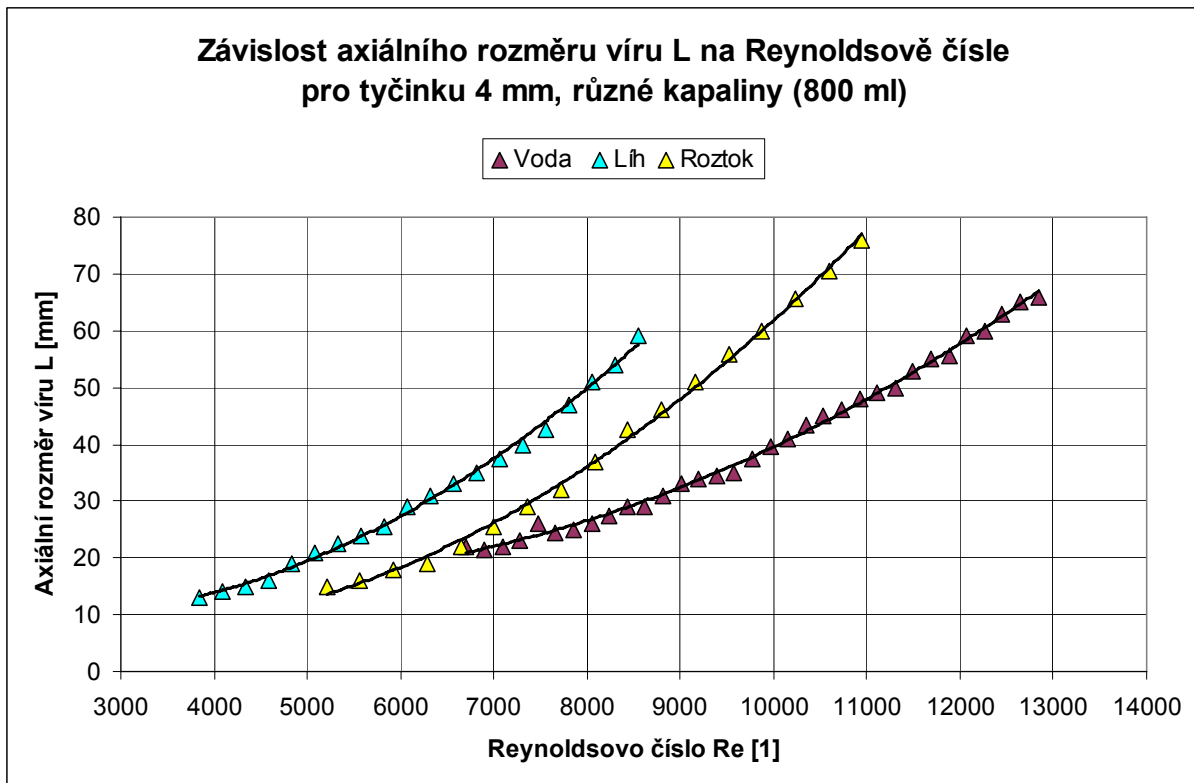
Graf 6.2 Srovnání naměřených hodnot pro různé míchací tyčinky a líh,  $L=f(Re)$

Graf 6.3 Srovnání naměřených hodnot pro různé míchací tyčinky a roztok,  $L=f(\text{Re})$ 

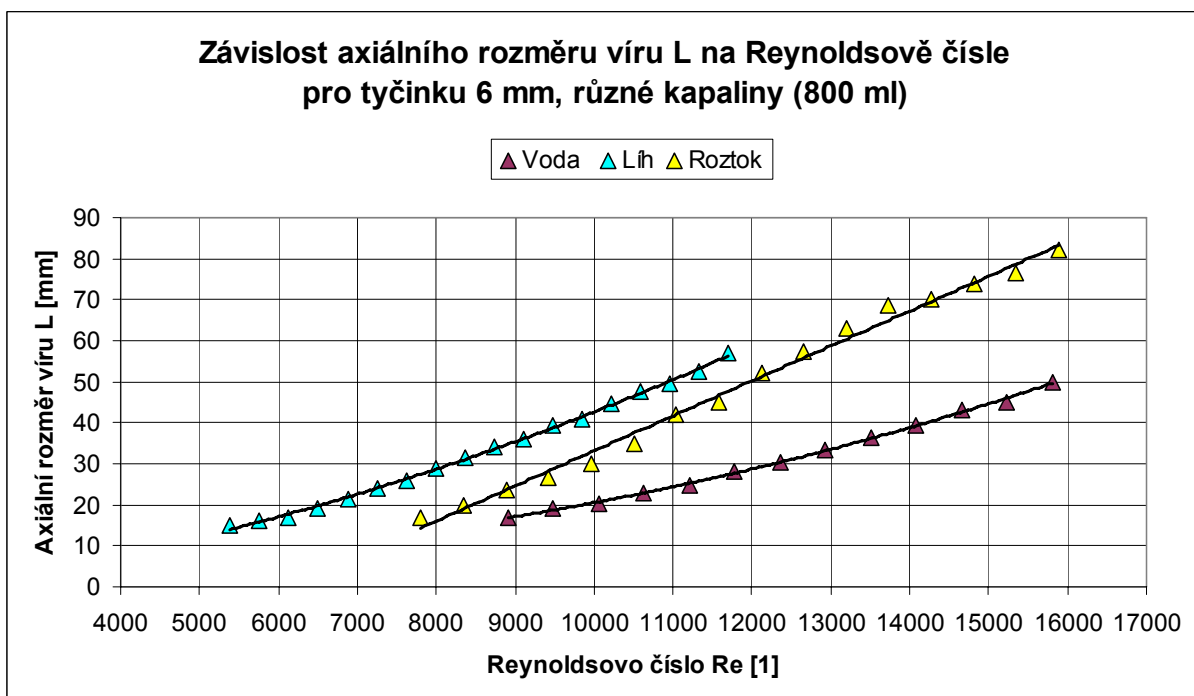
Z porovnání grafů je patrné, že u každé z měřených kapalin se Reynoldsovo číslo zvyšuje s rostoucím průměrem tyčinky při daném konstantním rozměru víru L. Tyčinka s největším průměrem (8 mm) tedy způsobuje, dle očekávání, nejvířivější pohyb (nejvíce turbulentní proudění). Tato skutečnost je také zřetelná z grafu 6.4, který ukazuje závislost rozměru víru L na otáčkách pro různé průměry míchacích tyčinek a líh. U zbývajících dvou kapalin vychází tato závislost velmi podobně (nejrychlejší nárůst axiálního rozměru víru L v závislosti na otáčkách je charakteristický pro tyčinku s největším průměrem).

Graf 6.4 Srovnání naměřených hodnot pro různé míchací tyčinky a líh,  $L=f(n)$

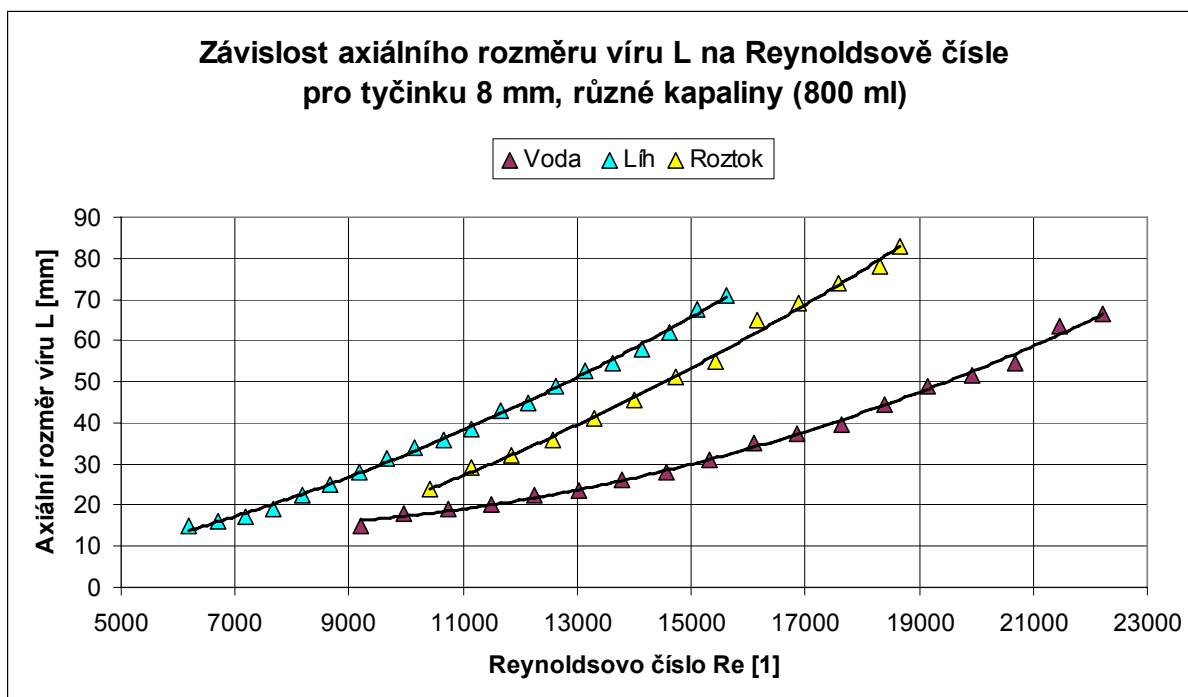
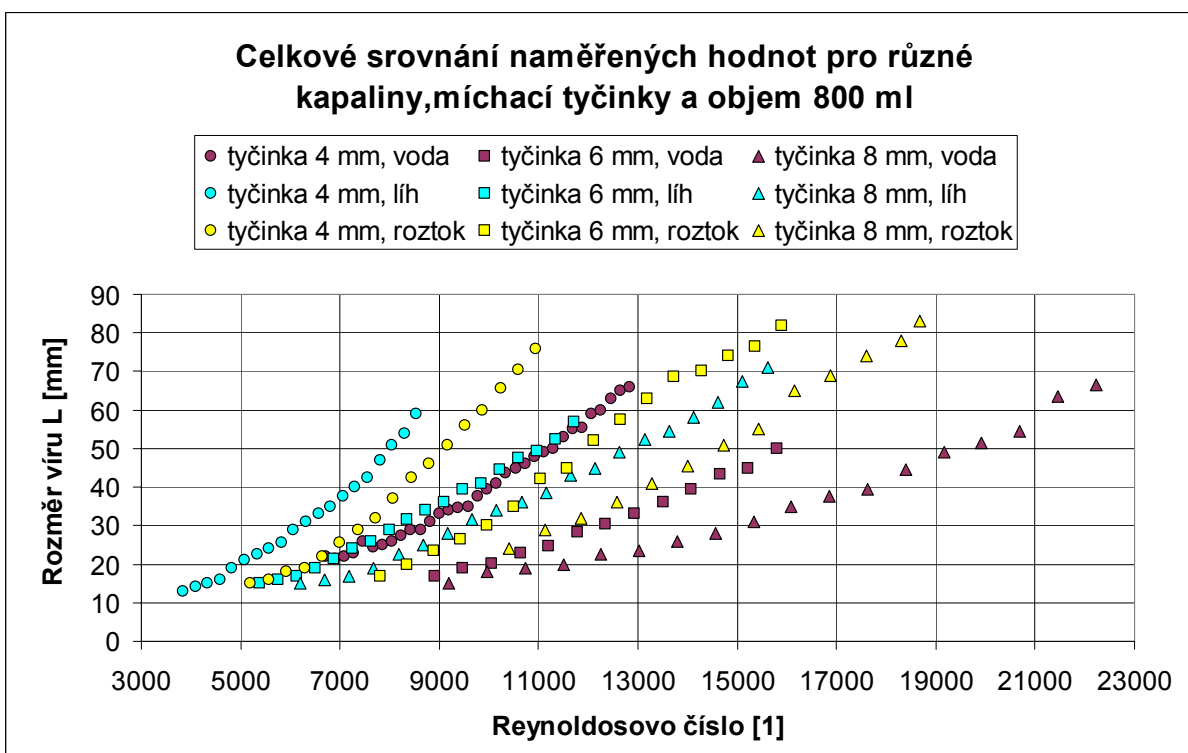
Následující grafické vyjádření naměřených hodnot je inverzní ke grafům 6.1, 6.2, 6.3 a porovnává tedy dané tři druhy kapalin vždy pro konkrétní průměr míchací tyčinky.



Graf 6.5 Srovnání naměřených hodnot pro různé kapaliny a tyčinku 4 mm,  $L=f(Re)$

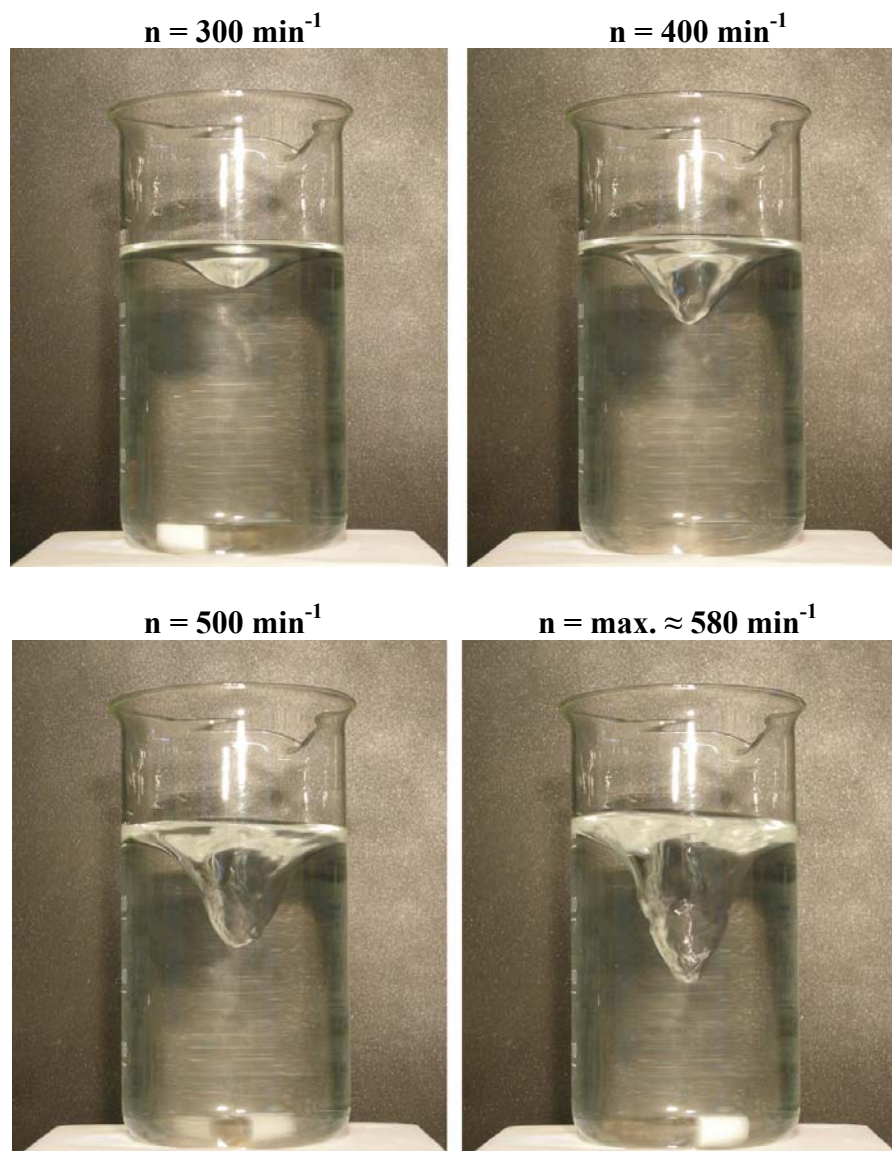


Graf 6.6 Srovnání naměřených hodnot pro různé kapaliny a tyčinku 6 mm,  $L=f(Re)$

Graf 6.7 Srovnání naměřených hodnot pro různé kapaliny a tyčinku 8 mm,  $L=f(Re)$ Graf 6.8 Celkové srovnání naměřených hodnot pro různé kapaliny a tyčinky,  $L=f(Re)$

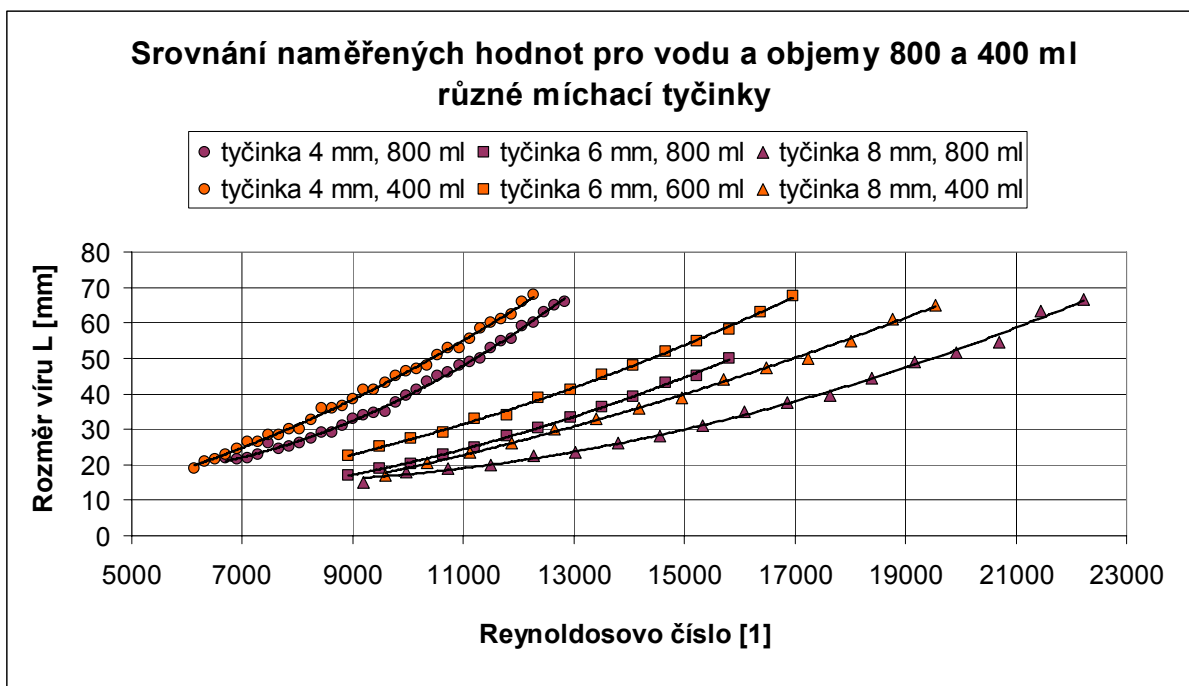
Z grafické interpretace výsledků je zřejmé, že v lihu se tvoří vír, který má při konstantních podmínkách ( $Re$ , míchací tyčinka) vždy větší axiální rozměr  $L$ , než je tomu u roztoku a vody. Podobně pro roztok je při konstantních podmínkách charakteristický větší axiální rozměr víru  $L$  než u vody. Graf 6.8 srovnává souhrnně všechny naměřené hodnoty a ukazuje, že největšího turbulentního proudění (nejvířivějšího pohybu, nejvyšší hodnoty  $Re$ ) bylo dosaženo při měření s vodou a tyčinkou o průměru 8 mm. Z uvedených závěrů vyplývá skutečnost, že rozměr víru  $L$  velmi závisí na druhu kapaliny, ve které vír vzniká. Každá kapalina je charakteristická svým povrchovým napětím a viskozitou a právě vliv povrchového napětí kapaliny na vývoj hladinového víru je popsán v kapitole 6.2.3.

Na obrázku 6.2 je zobrazen postupný nárůst axiálního rozměru víru  $L$  v závislosti na otáčkách. Všechny fotografie jsou pořízeny při stejných podmínkách (vzdálenost, přiblížení) a pro tyčinku 8 mm, u které je z daných tyčinek obecně dosahováno nejvíce turbulentního proudění. Fotografie jsou zde umístěny z ilustračních důvodů a slouží tedy jako doplněk k uvedenému experimentu.



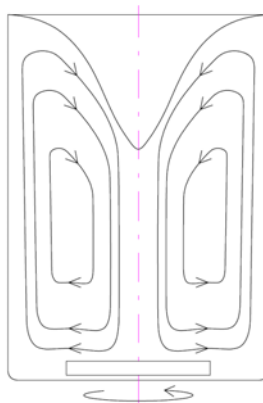
Obr. 6.2 Postupný nárůst rozměru víru  $L$  v závislosti na otáčkách (voda, tyčinka 8 mm)

Během experimentu byl také zkoumán vliv objemu kapaliny na tvorbu víru. Byla provedena série měření s polovičním objemem kapaliny (400 ml) a se třemi druhy tyčinek o průměrech 4, 6 a 8 mm podobně jako v předchozích případech. Zkoumanou kapalinou v tomto případě byla už jen voda, při použití zbývajících dvou kapalin se předpokládá zjištění podobné závislosti. Srovnání naměřených hodnot pro vodu a objem 800 ml a 400 ml je znázorněno v grafu 6.9.



Graf 6.9 Srovnání naměřených hodnot pro vodu, různé objemy a různé míchací tyčinky,  $L=f(\text{Re})$

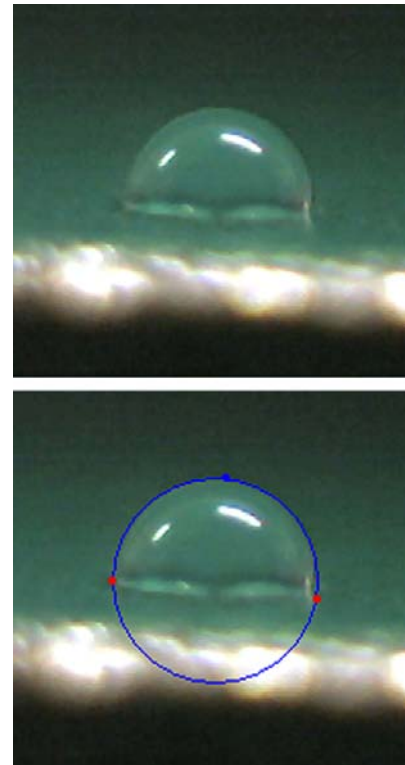
Na základě grafu 6.9 lze konstatovat, že změna objemu kapaliny, ve které vzniká vír, ovlivňuje axiální rozměr víru  $L$ . S klesajícím objemem kapaliny vrůstá při konstantních podmínkách ( $\text{Re}$ , průměr tyčinky) axiální rozměr víru  $L$ . Tento jev souvisí s předáváním kinetické energie (vířivosti) uvnitř nádoby, resp. s její disipací. Disipace energie je u většího objemu větší a opačně. Z tohoto důvodu dochází u menšího objemu k nárůstu vířivosti oproti původnímu (většímu) objemu a tento jev se projeví ve zvětšení axiálního rozměru víru  $L$ . Podstatný vliv na přemístování energie uvnitř nádoby má i meridiánové proudění (obr. 6.3)



Obr. 6.3 Meridiánové proudění uvnitř nádoby

### 6.2.3. Vliv povrchového napětí na tvorbu hladinového víru

Kinematická viskozita a povrchové napětí jsou dvě vlastnosti, které mají obecně velký vliv na chování kapalin. Na tvorbu hladinového víru má velký vliv převážně povrchové napětí dané kapalinou. Z tohoto důvodu bylo měřeno povrchové napětí i u třech zkoumaných kapalin. Měření probíhalo pomocí přístroje SEE System, který měří kontaktní úhel kapaliny s povrchem. Tvar kapky je zaznamenán CCD kamerou a snímky se zobrazí ve speciálním podpůrném programu SEE Software, který umožňuje převést profil kapky na kružnici. Software dále automaticky stanoví a zobrazí kontaktní úhel (obr. 6.4). Program také umožňuje výpočet povrchové energie na základě nejčastěji používaných modelů [10]. Jednotlivé kapky dané kapalinou byly nanášeny pomocí mikropipety. Měření bylo provedeno se všemi danými kapalinami a to i přesto, že v případě vody a lihu jsou hodnoty povrchového napětí tabelovány. Ze srovnání tabelovaných hodnot povrchového napětí s hodnotami naměřenými je patrné, že přesnost této měřicí metody je pro porovnávací účely v této práci dostatečná (chyba měření je menší než 6 %, což je při daných zjednodušeních přijatelný výsledek). Povrchové napětí dané kapalinou bylo spočítáno z naměřené hodnoty kontaktního úhlu následujícím způsobem:



Obr. 6.4 Měření kontaktního úhlu

$$\gamma_s = \frac{\gamma_L \cdot (1 + \cos \theta)^2}{4} \quad [11] \quad (14)$$

tedy

$$\gamma_L = \frac{4 \cdot \gamma_s}{(1 + \cos \theta)^2} \quad (15)$$

kde povrchová energie  $\gamma_s = konst = 15,97 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  a  $\theta$  je kontaktní úhel. Vypočtené hodnoty povrchového napětí jednotlivých kapalin a jejich porovnání s hodnotami tabelovanými je uvedeno v tab. 6.2.

<b>Srovnání povrchových napětí jednotlivých kapalin</b>			
	<b>Voda</b>	<b>Roztok vody a prášku</b>	<b>Lih</b>
<b>Změřený kontaktní úhel [°]</b>	93,62	63,54	42,45
<b>Změřené povrchové napětí [N*m<sup>-1</sup>]</b>	0,07278	0,03058	0,02115
<b>Tabulková hodnota povrchového napětí pro 20 °C [N*m<sup>-1</sup>]</b>	0,073	-	0,0224

Tab. 6.2 Srovnání povrchových napětí jednotlivých kapalin

Na základě porovnání hodnot uvedených v tabulce 6.2 s grafy 6.5, 6.6 a 6.7 lze stanovit hypotézu, že při konstantních podmínkách ( $Re$ , míchací tyčinka) s klesající hodnotou povrchového napětí kapaliny roste axiální rozměr víru  $L$ . Při nižší hodnotě povrchového napětí lihu je tedy axiální rozměr víru  $L$  při konstantním  $Re$  větší než axiální rozměr víru u kapaliny s vyšší hodnotou povrchového napětí, v tomto případě vody. Pro potvrzení této hypotézy by bylo vhodné provést daná měření s větším počtem kapalin o různém povrchovém napětí.

### 6.3. Určení radiálního rozměru hladinového víru

V této části experimentu je popsán postup pro stanovení radiálního rozměru hladinového víru. Tvar hladiny víru (trychtýřovitý tvar) lze popsat matematickou závislostí radiálního rozměru víru  $r$  na axiálním rozměru víru  $z$ . Tuto závislost lze získat níže popsaným postupem, který využívá výsledky experimentálního měření (viz kap. 6.3.2.).

#### 6.3.1. Stanovení závislosti radiálního rozměru hladinového víru na rozměru axiálním

Následující postup vychází ze základních rovnic a zákonů hydrodynamiky, které jsou zde uváděny bez dalšího odvozování. Na tomto místě je také vhodné zdůraznit, že tato kapitola vznikla za významné pomoci vedoucího této práce.

Za předpokladu neviskózní (ideální) kapaliny lze proudění v dané nádobě popsat Eulerovými rovnicemi hydrodynamiky. V případě rotační symetrie a zavedení válcových souřadnic mají rovnice tvar:

$$r: \quad \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\phi^2}{r} + v_z \cdot \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad (16)$$

$$z: \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (17)$$

Tvar hladiny je dán výsledným silovým působením v radiálním směru a směru osy  $z$ . Za předpokladu stacionárního proudění a uvažování bodu na hladině lze psát:

$$r: \quad \frac{v_\varphi^2}{r} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad (18)$$

$$z: \quad g = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (19)$$

Hladina je místem konstantního (atmosférického) tlaku. Z tohoto důvodu pro body, kterými tato hladina prochází, platí:

$$dp = \rho \cdot \vec{a} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (20)$$

kde  $dp$  vyjadřuje totální diferenciál tlaku:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial r} dr + \frac{\partial p}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial p}{\partial z} dz \quad (21)$$

Pro další krok je vhodné vyjádřit rovnici hladinové plochy nejdříve v obecném tvaru:

$$dp = \rho \cdot a_r \cdot dr + \rho \cdot a_z \cdot dz = 0 \quad (22)$$

Pro daný případ lze dosadit příslušná zrychlení z Eulerovy rovnice hydrodynamiky:

$$\frac{v_\varphi^2}{r} - g \cdot dz = 0 \quad (23)$$

Po úpravě má diferenciální rovnice hladinové plochy tvar:

$$dz = \frac{v_\varphi^2}{r} dr \quad (24)$$

Tvar hladiny je tedy funkcí rozložení obvodové (tangenciální) rychlosti. Předpokládejme průběh rychlosti dle Lambova víru, který popisuje rotaci kapaliny v jádru víru jako rotaci tuhého tělesa a mimo jádro víru je u tohoto modelu rozložení rychlostí potenciální (viz kap. 2.2.). Přejít mezi oběma oblastmi je spojitý a hladký (jedná se o dobrou aproximaci víru i pro viskózní kapalinu). Rovnice popisující rozložení rychlostí Lambova víru má tvar:

$$v_\varphi = \frac{K}{r} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r^{*2}}\right) \right) \quad (25)$$

Rovnici (25) je třeba dále dosadit do rovnice hladinové plochy (24) a provést integraci:

$$dz = \frac{1}{g} \cdot \int \frac{K^2}{r^3} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r^{*2}}\right) \right) dr \quad (26)$$

Výsledná rovnice hladinové plochy má po integraci tvar:

$$z = -\frac{K^2}{2 \cdot r^{*2} \cdot r^2} \cdot \left[ r^{*2} \cdot e^{-\frac{2 \cdot r^2}{r^{*2}}} \cdot \left( -1 + e^{\frac{r^2}{r^{*2}}} \right)^2 + 2 \cdot r^2 \cdot Ei_1 \cdot \left( -2 \cdot \frac{r^2}{r^{*2}} \right) - 2 \cdot r^2 \cdot Ei_1 \cdot \left( -\frac{r^2}{r^{*2}} \right) \right] \quad (27)$$

kde  $z$  je axiální rozměr víru,  $r$  je radiální rozměr víru,  $Ei_1$  je exponenciální integrál prvního řádu a  $K, r^*$  jsou konstanty.

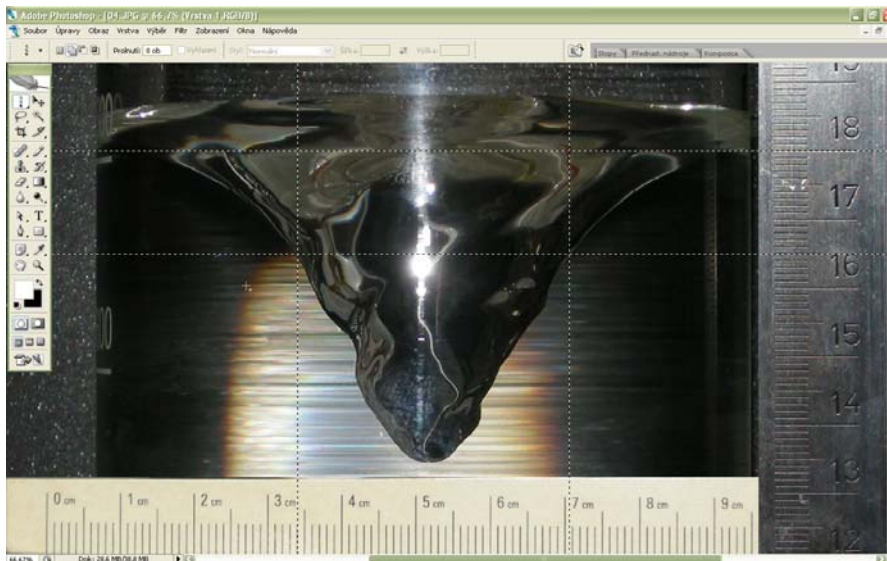
Rovnice (27) vyjadřuje tvar hladiny (hladinové plochy) za předpokladu, že průběh obvodové rychlosti v nádobě odpovídá Lambovu víru. Neznámé konstanty  $K$  a  $r^*$  lze získat identifikací z experimentu (viz kap.6.3.2.) za pomoci nelineární regresní analýzy. Získané konstanty jsou shodné s konstantami v rovnici (25) a lze tedy stanovit i profil tangenciálních rychlostí. Tato výsledná rovnice je numericky řešitelná. (např. náhradním rozvojem do řady), ale samotné řešení je mimo rozsah této práce.

### 6.3.2. Experimentální stanovení konstant $K$ a $r^*$

V této kapitole je popsán postup pro stanovení daných konstant vyskytujících se v rovnici (27), přičemž konkrétní číselné hodnoty stanoveny nebyly. Tuto část experimentu (kap. 6.3) tedy lze použít jako podklad pro další studium a experimentální výzkum.

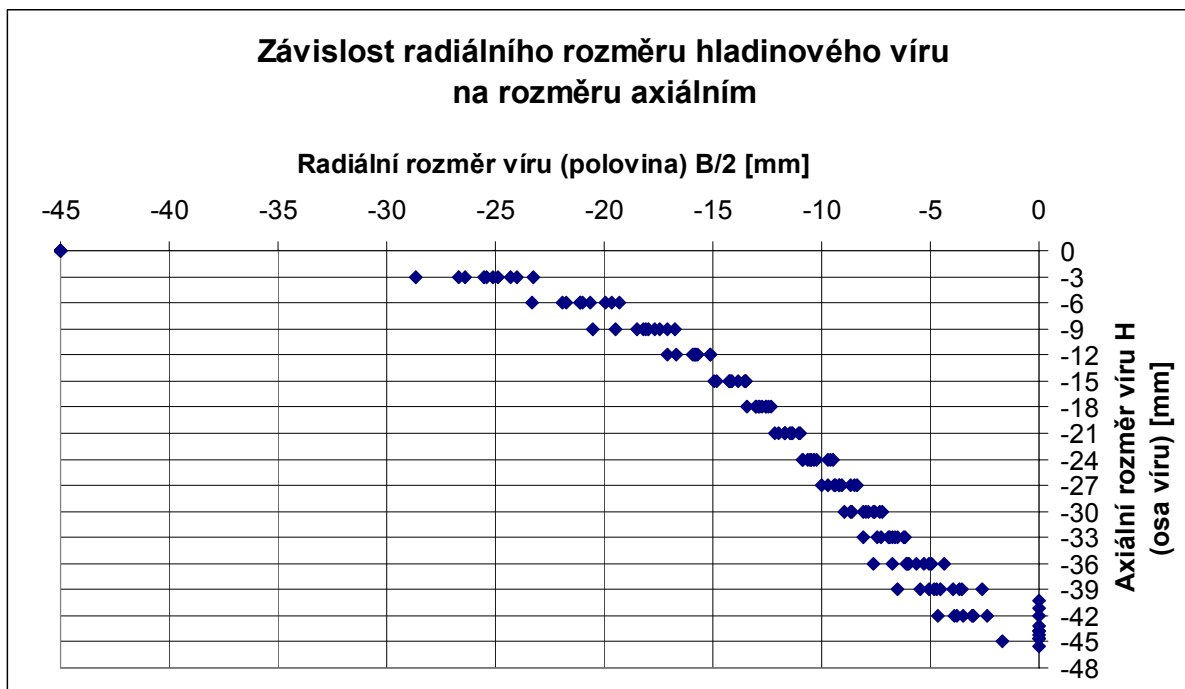
#### Postup při experimentálním stanovení konstant $K$ a $r^*$ :

- 1) V krátkém časovém rozmezí (do 1 min.) bylo pořízeno 10 fotografií víru (s příslušným měřítkem) při následujících podmínkách:
  - kapalina: voda, 800 ml
  - průměr míchací tyčinky: 4 mm
  - konstantní otáčky:  $n = 550 \text{ min}^{-1}$
  - konstantní vzdálenost fotoaparátu od nádoby s kapalinou
- 2) Z fotografií opatřených měřítkem bylo pomocí programu Adobe Photoshop CS2 postupně odměřována závislost axiálního rozměru hladinového víru  $H$  na horizontálním rozměru víru  $b$ , přičemž jako nulová hodnota axiálního rozměru  $H$  byla stanovena hladina a postupné zvětšování axiálního rozměru  $H$  bylo prováděno krokovým způsobem, kde krok = 3 mm (obr. 6.5).
- 3) Horizontální rozměr hladinového víru  $b$  je nutné přepočítat na skutečnou hodnotu  $B$  z důvodu lomu paprsku na rozhraní voda-vzduch a z důvodu deformace paprsku vlivem tvaru nádoby (půlcylindrická čočka). Odvození vzorce pro přepočet těchto rozměrů je uvedeno v kap. 6.3.3. Přepočet axiálního rozměru víru  $H$  není nutný, jelikož nádoba v tomto směru není zakřivená. Skutečný axiální rozměr víru  $H$  lze tedy odečítat přímo z fotografií.



Obr. 6.5 Odměrování hodnot z fotografie

- 4) Z naměřených hodnot (z 10 různých fotografií) byl dále sestaven graf 6.10, který ukazuje experimentálně zjištěnou závislost skutečného radiálního rozměru víru B na axiálním rozměru víru H (zobrazena je jedna polovina dané závislosti, tedy osa víru je shodná s osou H). Při proložení naměřených hodnot vhodnou křivkou a využití prostředků numerické matematiky (nelineární regresní analýza) je možné určit hledané konstanty  $K$  a  $r^*$ . Tyto konstanty již lze na základě kap. 6.3.1. použít při stanovení tvaru hladinové plochy víru, příp. profilu tangenciálních rychlostí víru.



Graf 6.10 Závislost radiálního rozměru hladinového víru na rozměru axiálním

### 6.3.3. Odvození vzorce pro výpočet skutečného radiálního rozměru hladinového víru po deformaci půl-cylindrickou čočkou

Následující odvození je platné za předpokladu uvažování pouze dvou optických prostředí voda-vzduch, namísto skutečných tří optických prostředí voda – sklo – vzduch. Při daném zjednodušení tedy nedochází k lomu paprsku při přechodu mezi optickými prostředími voda – sklo a sklo – vzduch (ovšem uvažování zakřivení nádoby je nezbytné). Lom paprsku v každém bodě na rozhraní mezi dvěma optickými prostředími (voda – vzduch) je popsán Snellovým zákonem:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (28)$$

Z obr. 6.6 a ze vztahu (28) dále vyplývají následující vztahy:

$$\sin \alpha_1 = \frac{b}{D} \quad (29)$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \alpha_1\right) = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{b}{D}\right) \quad (30)$$

$$\beta = \alpha_1 - \alpha_2 = \arcsin\left(\frac{b}{D}\right) - \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{b}{D}\right) \quad (31)$$

Dále pak z geometrických závislostí vyplývá:

$$e = c \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (32)$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \quad (33)$$

tedy po dosazení rovnic (31) a (33) do (32) platí:

$$e = c \cdot \operatorname{tg} \beta = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \cdot \operatorname{tg} \left[ \arcsin\left(\frac{b}{D}\right) - \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{b}{D}\right) \right] \quad (34)$$

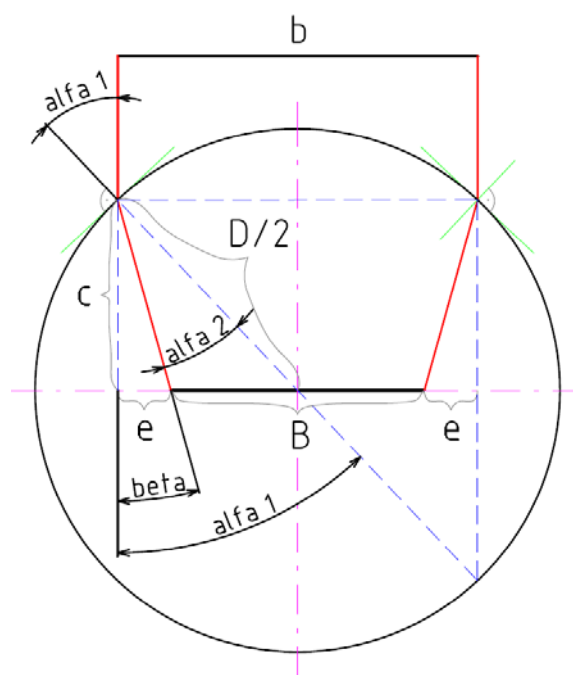
Hledaný skutečný horizontální rozměr hladinového víru B lze tedy vypočítat následně:

$$B = b - 2 \cdot e \quad (35)$$

a po dosazení rovnice (34) do rovnice (35) má výsledný vztah tvar:

$$B = b - 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} \cdot \operatorname{tg} \left[ \arcsin\left(\frac{b}{D}\right) - \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{b}{D}\right) \right] \quad (36)$$

kde  $b$  je naměřený horizontální rozměr z fotografie,  $D$  je průměr nádoby ( $D = 90 \text{ mm}$ ),  $n_1$  je index lomu vzduchu ( $n_1 \approx 1$ ) a  $n_2$  je index lomu vody ( $n_2 = 1,33$ )



Obr. 6.6 Grafické závislosti při výpočtu skutečného rozměru B

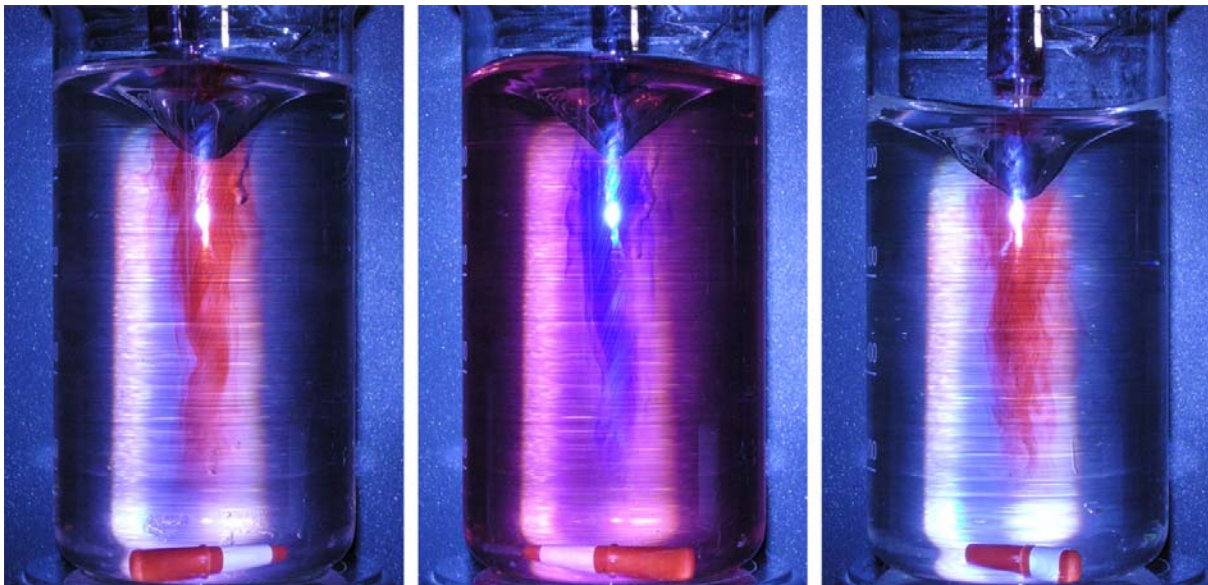
## 6.4. Vizualizace vírového pohybu

Vizualizace vírového pohybu byla prováděna hned několika metodami. Všechny tyto metody jsou založeny na využívání rozložení tlakového pole uvnitř nádoby a principů rotačního pohybu (viz. kap. 2). U každé metody byly pořízeny fotografie a natočen videozáznam (viz. příloha 1), který zachycuje dané metody nejlépe. Jednotlivé metody vizualizace vírového pohybu byly následující:

- Vstřikování barviva do rotující kapaliny (obr. 6.7)
- Vizualizace pomocí UV lampy a fosforeskujícího roztoku (obr. 6.8)
- Sledování pohybu čajových lístků v rotující kapalině (obr. 6.9)
- Sledování pohybu malého množství oleje v rotující kapalině (obr. 6.10)

### Vstřikování barviva do rotující kapaliny

Vizualizace proudění pomocí různých druhů barviv je poměrně jednoduchá metoda, pomocí které bylo v minulosti dosaženo nejednoho objevu popisujícího proudění kapalin. V případě experimentu prováděného v rámci této práce byl pomocí injekční stříkačky vstřikován roztok vody a barviva do rotující vody. Obarvený roztok se v důsledku rozložení rychlostního pole uvnitř nádoby nachází v centrální oblasti, čímž dochází k jejímu zviditelnění. Je nutné zdůraznit, že vstřikované barvivo po uplynutí přibližně 20 sekund obarví celý objem kapaliny a experiment je nutné opakovat (další možností je použití jiného kontrastního barviva viz. obr. 6.7 -prostřední fotografie).

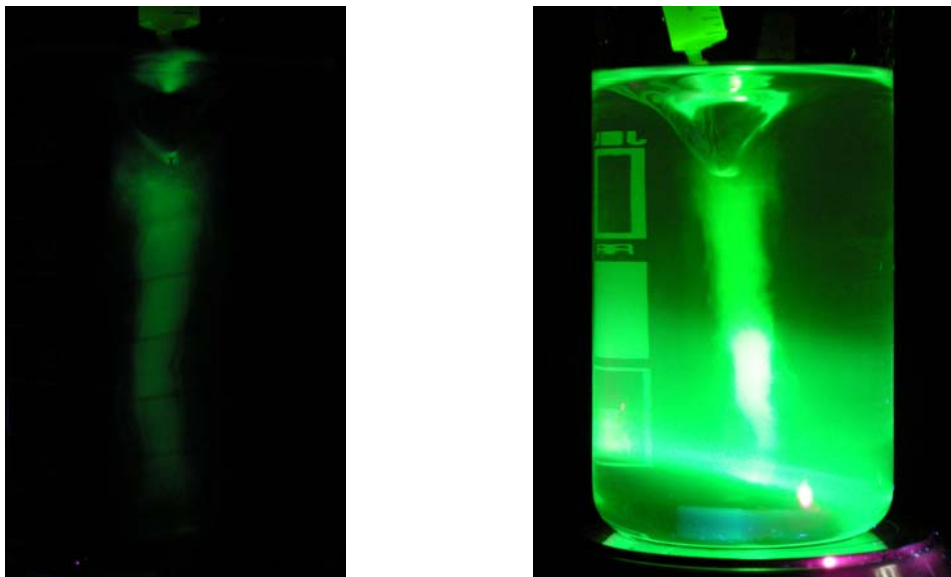


Obr 6.7 Vizualizace vírového pohybu vstřikováním barviva

### Vizualizace pomocí UV lampy a fosforeskujícího roztoku

Tato metoda je založena na velmi podobném principu jako metoda vizualizace pomocí vstřikování barviva. Roztok vody s fluoresceinem (s fosforeskujícím práškem) po osvětlení UV lampou emituje světlo. Tento roztok je dále vstřikován do rotující kapaliny stejným

způsobem jako v předešlém případě. U této metody bylo obtížné pořídit názorné fotografie z důvodu nedostatku osvětlení. Proto následující fotografie (obr. 6.8) slouží především jako ilustrační. V příloženém videozáznamu je tato metoda zachycena názorněji.



Obr 6.8 Vizualizace vírového pohybu pomocí UV lampy a fosforeskujícího roztoku

### **Sledování pohybu čajových lístků v rotující kapalině**

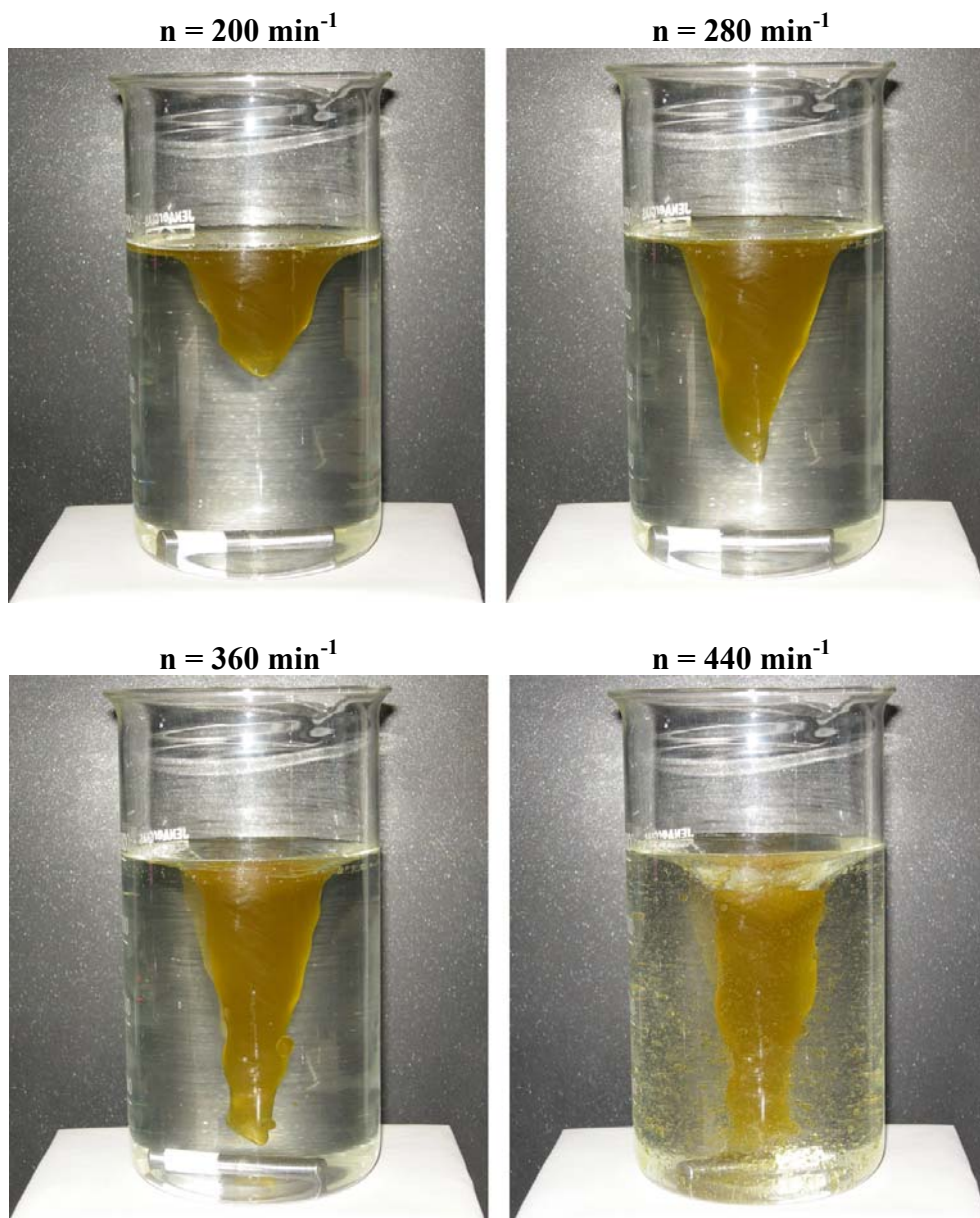
Pohyb částic (čajových lístků) v rotující kapalině je založen především na rovnováze sil působících na částici (viz. kap.2.1.1.). Převážná část čajových lístků se opět shromáždí v centrální oblasti, čímž tuto oblast zviditelní (obr. 6.9). Tato metoda je opět názorněji zachycena na příloženém videozáznamu.



Obr 6.9 Vizualizace vírového pohybu pomocí čajových lístků

**Sledování pohybu malého množství oleje v rotující kapalině**

V této části experimentu byl sledován pohyb olivového oleje (50 ml) v rotující vodě (750 ml). V důsledku různých hustot daných kapalin nedojde k jejich promísení. Rozdílná hustota oleje a vody se za rotace projeví také tím způsobem, že olej (s nižší hustotou) se nashromáždí v místech nejnižších tlaků a vytvoří zřetelnější rozhraní hladinového víru než je tomu v případě samotné rotující vody. Na obrázku 6.10 je zřetelný velmi rychlý nárůst axiálního rozměru víru v závislosti na otáčkách. Při otáčkách  $440 \text{ min}^{-1}$  je patrné, že všechny olej se nachází ve víru, přičemž horní část je již tvořena vodou. Současně také dochází k dotyku hrotu víru s míchací tyčinkou, což má za následek vznik olejových kapiček.



Obr 6.10 Vizualizace vírového pohybu pomocí oleje a vody

## 7. Závěr

V první části této práce byly sumarizovány základní principy a modely vírového pohybu v přírodě a v technické praxi. Z jednotlivých kapitol je patrné, že vírové pohyby v obou těchto oblastech vykazují značnou podobnost a řídí se ve většině případů totožnými (podobnými) zákony obecně popisující vírový pohyb. Příkladem takového podobnosti je tornádo a vírový cop vznikající za oběžným kolem vodní turbíny, případně proudění v tornádu a v oddělovači částic. Vlastnosti vírového pohybu jsou účelně využity v některých technických zařízeních, které mají mnohdy jednodušší konstrukci než zařízení založená na odlišném principu.

V druhé části této práce byly experimentálně ověřeny vybrané vlastnosti vírového pohybu a v některých případech vysloveny i vlastní hypotézy o tomto pohybu. Dle očekávání byl potvrzen vliv různých průměrů míchací tyčinky na axiální rozměr víru  $L$ . Tyčinka s větším průměrem způsobuje více vířivé (turbulentní) proudění, což se projeví na zvětšení Reynoldsova čísla. Tyčinka s větším průměrem tedy předává kapalině více energie.

V další části experimentu byl určován vliv druhu kapaliny na tvorbu hladinového víru, přičemž byly sledovány dvě základní charakteristiky dané kapalinou (voda, líh, roztok). Těmito charakteristikami byly povrchové napětí a kinematická viskozita. Hodnota viskozity kapaliny ovlivňuje především velikost Reynoldsova čísla. Z definice tohoto podobnostního čísla je zřejmé, že se vrůstající hodnotou kinematické viskozity Reynoldsovo číslo klesá, což se projevilo například v grafech 6.5 - 6.7, kde líh, který má nejvyšší hodnotu kinematické viskozity z daných kapalin, dosahuje nejmenších Reynoldsových čísel (nejmenší míry turbulentního proudění). Při vyhodnocování vlivu povrchového napětí dané kapalinou na tvorbu hladinového víru byla na základě naměřených hodnot stanovena následující hypotéza: Při konstantních podmínkách ( $Re$ , míchací tyčinka) a při snižování hodnoty povrchového napětí kapaliny, roste axiální rozměr víru  $L$ . Při nižší hodnotě povrchového napětí u lihu je tedy axiální rozměr víru  $L$  (při konstantním  $Re$ ) větší než axiální rozměr víru u kapaliny s vyšší hodnotou povrchového napětí, v tomto případě vody. Pro potvrzení této hypotézy by bylo vhodné provést daná měření s větším počtem kapalin o různém povrchovém napětí.

V další části experimentu byl popsán postup pro stanovení závislosti radiálního rozměru víru  $r$  na axiálním rozměru víru  $z$ . Jinými slovy se jedná o stanovení závislosti tvaru hladiny víru na jeho rozměru v axiálním směru. Odvozená rovnice, popisující tuto závislost je numericky řešitelná, nicméně pro konkrétní řešení je nezbytné empirické stanovení konstant  $K$  a  $r^*$ , čímž se zabývá kapitola 6.3.2. Empiricky určené konstanty  $K$  a  $r^*$  lze použít i pro stanovení profilu tangenciálních rychlostí víru. Na tomto místě je vhodné zdůraznit, že daná odvození jsou platná pro ideální kapalinu, stacionární proudění a při předpokladu profilu rychlosti dle Lambova modelu víru. Samotné řešení dané rovnice pro konkrétní případ a s tím související stanovení konstant  $K$  a  $r^*$  převyšuje rozsah této práce a není zde tedy uvedeno. Naznačený postup lze použít jako podklad pro další studium a experimentální výzkum.

Závěrečná část experimentu se zabývá vizualizací vírového pohybu a je představeno hned několik metod vizualizace. Tyto metody jsou založeny na základních principech vírového pohybu, především na tlakovém a rychlostním profilu uvnitř sledované nádoby.

V přírodě i v technické praxi lze nalézt široké spektrum vírů, které mnohdy velmi ovlivňují okolní prostředí. Zdokonalování znalostí o vírovém pohybu vede k dokonalejšímu pochopení dějů probíhajících všude kolem nás. Od obecné cirkulace atmosféry Země až po zvyšování účinnosti čerpadel je vírový pohyb nedílnou součástí procesů ovlivňujících lidské jednání a funkci různých technických zařízení. Z tohoto důvodu jsou poznatky o tomto pohybu důležité a má smysl se jimi zabývat.

## 8. Seznam použitých zdrojů

- [1] LUGHT, Hans J. *Vortex Flow in Nature and Technology*. United States of America : Wiley & Sons, 1983. 297 s. ISBN 0-471-86925-2.
- [2] ŠOB, František. *Hydromechanika*. 2. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2008. 238 s. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [3] BRENNEN, Christopher Earls. *Cavitation and Bubble Dynamics* [online]. New York : Oxford University Press, 2005 , Last modified: 04 Jul 2008 13:42 [cit. 2009-04-05]. Text v angličtině. Dostupný z WWW: <<http://caltechbook.library.caltech.edu/1/1/cavbubdynam.pdf>>. ISBN 0195094093.
- [4] RESIGA, Romeo Susan, et al. Analysis of the Swirling Flow Downstream a Francis Turbine Runner. *Journal of Fluids Engineering* [online]. 2006, vol. 128 [cit. 2009-05-10], s. 177-189.
- [5] PŘIKRYL, Karel. *Kinematika*. 3. přeprac. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2003. 142 s. ISBN 80-214-2412-5.
- [6] *Tornáda.cz : Vše o tornádech* [online]. c2008 [cit. 2009-04-20]. Text v češtině. Dostupný z WWW: <<http://www.tornada.cz/o-tornadech/>>.
- [7] HUDEC, Martin. *Optimalizace vtokových vírů u vírové turbíny*. FSI VUT Brno : [s.n.], 2008. 7 s. Vydáno k příležitosti FSI Junior konference 2008, Prezentace vědeckovýzkumných prací doktorandů.
- [8] KOMP, Petr. Optimální vírový průtokoměr: Krohne Optiswirl 4070. *Automa* [online]. 2007, č. 8-9 [cit. 2009-05-23], s. 38-39. Dostupný z WWW: <<http://www.citace.com/apl-elclanek.php>>.
- [9] SKOTÁK, Aleš. *VÍROVÉ STRUKTURY V SAVCE VODNÍ TURBÍNY*. [s.l.], 2004. 68 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- [10] SVOBODA, Jakub. *Studie vlivu povrchové energie různých druhů kapalin a povrchů - experiment*. [s.l.], 2008. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Simona Fialová, Ph.D.
- [11] BURSÍKOVÁ, Vilma, et al. *Surface Energy Evaluation of Plasma Treated Materials by Contact Angle Measurement*. 1st edition. Brno : Vydavatelství MU, 2004. ISBN 80-210-3563-3.

### Zdroje obrázků:

- [12] *Australia's Original Prop Shop* [online]. [2003] [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.originalpropshop.com.au/Resources.html>>.
- [13] LIENHARD , John H.. *Engines of Our Ingenuity : No. 1653: AEOLIAN VIBRATION* [online]. c1988-2001 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.uh.edu/engines/musicforawhile/epi1653.htm>>.
- [14] KUROSAKA, M., et al. Interchangeability of vortex-breakdown types. *Experiments in fluids* [online]. 2003, vol. 34, no. 1 [cit. 2009-04-10], s. 77-86. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/f1ct4ujpx720cf60/?p=2750336a632d4fcabb2c3119293f7365&pi=0>>. ISSN 1432-1114.
- [15] *Spacezone.org* [online]. 2005 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <[http://www.spacezone.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=13&Itemid=14](http://www.spacezone.org/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=14)>.
- [16] *HowStuffWorks* [online]. 1998 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://science.howstuffworks.com/voyager3.htm>>.

- [17] *Wikipedia The Free Encyclopedia* [online]. [1998] , last modified on 15 May 2009, at 07:44 (UTC) [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Jet\\_stream](http://en.wikipedia.org/wiki/Jet_stream)>.
- [18] *Wikipedia The Free Encyclopedia* [online]. [1998] , This page was last modified on 20 May 2009, at 08:52 (UTC). [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Tornado>>.
- [19] *Wikipedia The Free Encyclopedia* [online]. [1998] , last modified on 22 May 2009, at 14:56 (UTC) [cit. 2009-04-15]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane\\_Katrina](http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Katrina)>.
- [20] *Home made Cyclone Dust Collectin System* [online]. [1999] [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.studio1304.com/silca/cyclone/index.htm>>.
- [21] *Wikipedia The Free Encyclopedia* [online]. [1998] , last modified on 10 May 2009, at 22:44 (UTC) [cit. 2009-05-15]. Dostupný z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_tube)>.
- [22] HASSLBERGER, Sepp. *Water Vortex Drives Power Plant* [online]. [2006] [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <[http://blog.hasslberger.com/2007/06/water\\_vortex\\_drives\\_power\\_plan.html](http://blog.hasslberger.com/2007/06/water_vortex_drives_power_plan.html)>.
- [23] *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : CEN - Energy center* [online]. c2009 , 04.05.09 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://cgse.epfl.ch/page67383-fr.html>>.
- [24] *2004 Storm Chasing* [online]. [2003] [cit. 2009-05-08]. Dostupný z WWW: <[http://www.pbase.com/nc911/2004\\_storm\\_chasing](http://www.pbase.com/nc911/2004_storm_chasing)>.

## 9. Seznam obrázků a jejich zdroje

Obr. 2.1 Průběh rychlosti a vířivosti Rankinova víru.....	[1], str. 31
Obr. 2.2 Rozložení tlaku při vířivém proudění.....	[1], str. 33
Obr. 2.3 Rovnováha odstředivých a dostředivých sil při rotačním pohybu.....	[1], str. 33
Obr. 2.4 Kavitace v blízkosti materiálu a důsledek působení kavitace .....	[12]
Obr. 2.5 Separace víru v blízkosti hrany.....	[1], str. 72
Obr. 2.6 Vývoj tvorby vírových kroužků za koulí a diskem v čase.....	[1], str. 72
Obr. 2.7 Separace proudění (tvorba víru) v důsledku náhlého rozšíření potrubí.....	[1], str. 73
Obr. 2.8 Separace proudění za otvorem.....	[1], str. 73
Obr. 2.9 Karmanova vírová stezka.....	[13]
Obr. 2.10 Zobrazení proudnic při rozpadu.....	[1], str. 88
Obr. 2.11 Skutečné zobrazení rozpadu víru.....	[14], str. 7
Obr. 2.12 Vírový cop.....	[9], str. 15
Obr.3.1 Spirální galaxie.....	[15]
Obr.3.2 Důsledek působení černé díry.....	[1], str. 221
Obr.3.3 Vírový pohyb na Jupiteru.....	[16]
Obr.3.4 Schéma tlakových pásů Jupiteru.....	[1], str. 217
Obr. 4.1 Vliv Coriolisovy síly na pohyb částice.....	[1], str. 132
Obr. 4.2 Proces přenosu tepla mezi Zemí a vesmírem.....	[1], str. 170
Obr. 4.3 Vliv Coriolisovy síly na pasátové proudění.....	[1], str. 172
Obr. 4.4 Cirkulace atmosféry.....	[1], str. 172
Obr. 4.5 Tryskové proudění.....	[17]
Obr. 4.6 Skutečné tornádo.....	[18]
Obr. 4.7 Fáze tornáda.....	[1], str. 192
Obr. 4.8 Meridiánové proudění.....	[1], str. 193
Obr. 4.9 Trajektorie hurikánu Katrina.....	[19]
Obr. 4.10 Hurikán Katrina.....	[19]
Obr. 4.11 Hlavní trajektorie tropických bouří na Zemi.....	[1], str. 206
Obr. 4.12 Meridiánové proudění v hurikánu.....	[1], str. 208
Obr. 4.13 Cirkulace oceánských proudů na Zemi.....	[1], str. 176
Obr. 4.14 Cirkulace, jejíž součástí je Golský proud.....	[1], str. 176
Obr. 4.15 Odtržení víru od proudu a jeho zpětné pohlcení.....	[1], str. 181
Obr. 4.16 Vznik vírů mezi pobřežím Severní Ameriky a Golským proudem.....	[1], str. 179
Obr. 5.1 Vírová turbína.....	[7], str. 1
Obr. 5.2 Oddělovač částic.....	[20]
Obr. 5.3 Karmanova vírová stezka.....	[8], str. 38
Obr. 5.4 Vnitřní prostor měřící trubice vírového průtokoměru se snímačem vibrací.....	[8], str. 38
Obr. 5.5 Vírový ventil.....	[1], str. 144
Obr. 5.6 Vírová trubice - "Ranque-Hilschova" trubice.....	[1], str. 144
Obr. 5.7 Proudění ve vírové trubici.....	[21]
Obr. 5.8 Gravitační vírová vodní elektrárna.....	[22]
Obr. 5.9 Stádia nálevkového víru.....	[7], str. 3
Obr. 5.10 Vývoj nálevkového víru ve skutečnosti.....	[7], str. 6
Obr. 5.11 Vírový cop.....	[23]
Obr. 5.12 Příklad tornáda připomínajícího vírový cop.....	[24]
Obr. 5.13 Výpočtové modelování vírového copu a okamžité rozložení tlaku v daných řezech.....	[9], str. 44
Obr. 6.1 Měřící sestava.....	vlastní
Obr. 6.2 Postupný nárůst rozměru víru L v závislosti na otáčkách (voda, tyčinka 8 mm).....	vlastní
Obr. 6.3 Meridiánové proudění uvnitř nádoby.....	vlastní
Obr. 6.4 Měření kontaktního úhlu.....	vlastní
Obr. 6.5 Odměrování hodnot z fotografie.....	vlastní
Obr. 6.6 Grafické závislosti při výpočtu skutečného rozměru B.....	vlastní
Obr. 6.7 Vizualizace vírového pohybu vstříkáváním barviva.....	vlastní
Obr. 6.8 Vizualizace vírového pohybu pomocí UV lampy a fosforeskujícího roztoku.....	vlastní
Obr. 6.9 Vizualizace vírového pohybu pomocí čajových lístků.....	vlastní
Obr. 6.10 Vizualizace vírového pohybu pomocí oleje a vody.....	vlastní

## 10. Seznam použitých zkratk a symbolů

### Seznam zkratk:

CCD	Charge Coupled Device (zařízení s vázanými náboji)
MVE	Malá vodní elektrárna
SEE	Surface Energy Evaluation (vyhodnocení povrchové energie)
UV	Ultrafialové (záření)

### Seznam symbolů:

$\Phi$	[°]	zeměpisná šířka
$\Omega$	[rad/s]	úhlová rychlost částice kapaliny
$\alpha_1$	[°]	úhel lomu ve vzduchu
$\alpha_2$	[°]	úhel lomu ve vodě
$\beta$	[°]	pomocný úhel
$\varphi$	[°]	úhlová složka válcového souřadného systému
$\gamma_L$	[N/m; J/m <sup>2</sup> ]	povrchové napětí (povrchová energie) kapaliny
$\gamma_S$	[J/m <sup>2</sup> ]	povrchová energie pevné látky
$\eta_h$	[%]	hydraulická účinnost
$\mu$	[Pa.s]	dynamická viskozita
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita
$\theta$	[°]	kontaktní úhel
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$\omega$	[rad/s]	charakteristická vířivost
$\vec{\omega}$	[rad/s]	vektor vířivosti
$\vec{\omega}_{un}$	[rad/s]	vektor unášivé rychlosti
B	[m]	skutečný horizontální rozměr hladinového víru
$D_t$	[m]	průměr míchací tyčinky
D	[m]	průměr nádoby
K	[m]	empirická konstanta
L	[m]	charakteristický rozměr, axiální rozměr hladinové víru (kap. 6)
$P_{max}$	[W]	maximální výkon
R	[m]	mezní poloměr víru
$R_n$	[m]	poloměr nádoby
Re	[1]	Reynoldsovo podobnostní číslo
Ro	[1]	Rosbyho podobnostní číslo
V	[m/s]	obecná rychlost
$V_{ax}$	[m/s]	konkrétní hodnota axiální rychlosti
$V_{ax0}$	[m/s]	konstanta
$V_{ax1}$	[m/s]	konstanta
$Y_t$	[J/kg]	měrná energie turbíny
$\vec{a}$	[m/s <sup>2</sup> ]	vektor zrychlení
$\vec{a}_{cor}$	[m/s <sup>2</sup> ]	vektor Coriolisova zrychlení

$a_r$	[m/s <sup>2</sup> ]	složka zrychlení v radiálním směru
$a_z$	[m/s <sup>2</sup> ]	složka zrychlení ve směru osy z (axiální směr)
b	[m]	horizontální rozměr hladinového víru odměřený z fotografie
c	[m]	pomocný rozměr
$d\vec{l}$	[m]	elementární vektor
e	[m]	pomocný rozměr
f	[rad/s]	Coriolisův parametr
g	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
n	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
$n_1$	[1]	index lomu vzduchu
$n_2$	[1]	index lomu vody
p	[Pa]	tlak
r	[m]	obecný poloměr
$r^*$	[m]	empirická konstanta, přechodový poloměr rychlostního profilu víru
t	[s]	čas
$u_1$	[m/s]	obvodová rychlost kapaliny na vstupu do turbíny
$u_2$	[m/s]	obvodová rychlost kapaliny na výstupu z turbíny
$v_{ax}$	[m/s]	obecná axiální rychlost
$v_{u1}$	[m/s]	obvodová složka absolutní rychlosti na vstupu do turbíny
$v_{u2}$	[m/s]	obvodová složka absolutní rychlosti na výstupu z turbíny
$\vec{v}$	[m/s]	vektor rychlosti
$v_r$	[m/s]	radiální složka rychlosti
$\vec{v}_{rel}$	[m/s]	vektor relativní rychlosti
$v_\varphi$	[m/s]	tangenciální složka rychlosti
$v_z$	[m/s]	složka rychlosti ve směru osy z (axiální směr víru)
z	[m]	obecný axiální rozměr víru, složka válcového souřadného systému

## 11. Seznam příloh

1. CD-ROM s videozáznamem části experimentu: Vizualizace proudění