

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební  
Ústav vodních staveb  
Laboratoř vodohospodářského výzkumu

**Doc. Ing. Jan Šulc, CSc.**

**MĚŘENÍ STRUKTURY PROUDĚNÍ  
NA MODELECH HYDROTECHNICKÝCH OBJEKTŮ  
A JEHO VYUŽITÍ PRO TVAROVOU OPTIMALIZACI**

**MEASUREMENTS OF THE VELOCITY FIELDS  
ON THE MODELS OF THE HYDROTECHNICAL  
STRUCTURES AND THEIR APPLICATION  
IN THE SHAPE OPTIMIZATION**

**TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ  
V OBORU  
VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ A VODNÍ STAVBY**



BRNO 2005

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

vodní stavby, hydrodynamika, proudění fyzikální model, metody měření, kalibrace, automatizace

## **KEY WORDS**

water structures, hydrodynamics, flow, physical model, measuring method, valibrating, automation

## OBSAH

<b>PŘEDSTAVENÍ AUTORA</b>	4
<b>1 HISTORIE SLEDOVÁNÍ STRUKTURY HYDRAULICKÉHO PROUDĚNÍ</b>	6
<b>2 MODELOVÁNÍ JAKO METODA POZNÁNÍ</b>	6
<b>3 ZÁKLADNÍ ROVNICE POPISUJÍCÍ PROUDĚNÍ TEKUTIN</b>	7
<b>4 PODSTATA MATEMATICKÝCH MODELŮ</b>	9
4.1 Řešení 3-D úlohy proudění nestlačitelné kapaliny	9
4.2 Testování matematických modelů proudění v hydrotechnice – současný stav	10
<b>5 FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ</b>	11
5.1 Teorie podobnosti v proudění tekutin	11
5.2 Hydraulické modelování	12
5.3 Využití aerodynamických modelů v hydrotechnice	13
<b>6 VÝVOJ TECHNIKY PRO VÝZKUM STRUKTURY PROUDĚNÍ</b>	14
6.1 Měřicí technika	14
6.1.1 Měření rychlostí a tlaků proudu – kontaktní metody	14
6.1.2 Měření rychlosti proudu – bezkontaktní metody	16
6.1.3 Měření rychlosti proudu – integrální metody	18
6.1.4 Měření tlaků, sil a momentů	21
6.2 Rozvoj a aplikace nových měřicích metod v hydromechanice	21
6.3 Zkušební tratě pro hydrotechnický výzkum	25
<b>7 UKÁZKY Z MODELOVÉHO VÝZKUMU STRUKTURY PROUDĚNÍ U SLOŽITÝCH HYDRAULICKÝCH OBJEKTŮ</b>	27
7.1 Aerodynamické modelování hydraulických jevů	27
7.2 Příklady využití hydraulických modelů pro tvarovou optimalizaci objektů	31
<b>8 MĚŘENÍ NA HYDROTECHNICKÝCH DÍLECH</b>	34
<b>9 ZÁVĚR</b>	34
<b>10 POUŽITÁ LITERATURA</b>	35
<b>11 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI</b>	39
<b>12 SUMMARY</b>	41

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc.Ing. Jan Šulc,CSc.

Narozen: 24.3.1953 v Brně

- **Vzdělání:**

Gymnázium ve Valašských Kloboukách, ukončení 1972

Vysoké učení technické v Brně, FAST, obor Vodní hospodářství a vodní stavby, ukončení 1977

CSc.: 1981 na téma „Rozbor rychlostního pole v hydraulických částech vodních energetických děl“

obor 36 – 04 –9 Hydrotechnika

Doc.: 1987 obor Hydraulika



- **Zaměstnání:**

- 1987 – 1992 Sdružený vědeckovýzkumný ústav VUT v Brně, Vědeckovýzkumný ústav vodního stavitelství a hospodářství (vědecký pracovník)

- 1992 – dosud Fakulta stavební VUT v Brně, Ústav vodních staveb – Laboratoř vodohospodářského výzkumu (učitel)

- **Odborná praxe:**

- 1977 - 1978 – základní vojenská služba u stavebního vojska – úsekový stavbyvedoucí pro výstavbu nádrží

- 1978-1992-hydrotechnický výzkum měření hydraulických veličin, výzkum tlakových hydraulických okruhů pro hydrotechnické a hydroenergetické systémy, vzdouvacích objektů na řekách a kanálech

- 1992- dosud - výzkum technologických částí vodních děl (přelivy, výpusti, tlumení kinetické energie), měření a zvyšování účinnosti vodních strojů, zvyšování bezpečnosti hydraulických okruhů, budování autorizované laboratoře pro měření hydraulických veličin, realizace úředních měření

- **Spolupráce s externí sférou:**

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav termomechaniky AV ČR, Český metrologický institut, Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, Výzkumný ústav vodohospodářský TGM Praha, Vojenská akademie Brno, Aquatis a.s. Brno, ČKD Blansko, VÚV Bratislava, DANTEC a.s. Kodaň, EDMUND BÜHLER GmbH. Bodelshausen

- **Podíl na nejdůležitějších realizačních výstupech:**

PVE Dlouhé Stráně, JE Temelín, PVE Štěchovice, TE Mělník, ČOV Hradec Králové, vodní díla Šance, Morávka, Doksany, Slezská Harta, Souš, Bystřička, Znojmo, MVE Ivančice, monitorovací systémy na řadě hrází vodních děl, VD Marun v Íránu.

- Řešené projekty (odpovědný řešitel):
  - 1996 – 1998 Rozvoj a aplikace nových experimentálních metod měření a zhodnocení rychlostních polí tekutin technologií PIV – Flow Map (GAČR),
  - 1998 – 2000 Rozvoj hydrozařízení velkých výkonů – Měření prostorového proudění tekutin laserovými anemometry (MPO ČR),
  - 2000 – 2002 Zvýšení užité hodnoty hydraulických strojů – Experimentální výzkum proudění v průtočných částech hydraulických strojů metodou PIV (MPO ČR),
  - 2002 – 2004 Měření struktury proudu k verifikaci matematických modelů ve vybraných hydraulických prvcích s možností jejich tvarové optimalizace (GAČR),
  - 2004 Rozvoj laboratoří pro praktickou výuku a experimentální činnost (FR VŠ).
- Řešené projekty (spoluřešitel):
  - 2003 – 2005 Vyšetřování turbulentního smykového proudění v kanálech s náhlým rozšířením průřezu (GAČR),
  - 2002 – 2004 Revitalizace odpadních vod intenzivní aerací s využitím ponorných aerátorů (MŽP ČR).
- Pedagogická činnost – magisterský program:
  - Vedení přednášek: Modelový výzkum (1984 – 1999) , Hydraulika a hydrologie (1999 dosud), Využití vodní energie (1999 – dosud), Malé vodní elektrárny (1999 – dosud), Využívání ekologických energetických zdrojů (1999 – dosud), Vodní stavby (1994 – 2001) na FSI VUT v Brně, Hydraulika, těžení a úprava voda (1985 – 1992) na VA v Brně
- doktorský program:
  - Vedení přednášek: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice, část I. fyzikální modelování, Hydromechanika, Měření provozních veličin ve vodním hospodářství, Přesná kalibrační a laboratorní měření hydraulických veličin (všechny předměty od roku 1999- doposud),
  - vedení diplomantů (9 obhájených prací),
  - vedení aspirantů a doktorandů (2 obhájené práce),
  - členství v komisích pro SZZ a obhajoby DDP na FAST a FSI VUT v Brně,
  - členství v podoborové radě GA ČR Stavebnictví, doprava, architektura,
  - spoluautor výukového filmu pro potřeby VA Brno.
- Publikace
  - 15 článků, časopisech vědeckého a odborného zaměření,
  - 10 článků v knižnicích vědeckých a odborných spisů,
  - 32 článků v domácích a zahraničních sbornících,
  - 14 zpráv vědecko-výzkumného charakteru,
  - 117 odborných a technických zpráv,
  - 32 recenzních a odborných posudků výzkumných projektů, zpráv, doktorských a kandidátských prací, článků, skript,
  - 305 odborných posudků v oblasti měření hydraulických parametrů proudění a funkce pracovních měřidel,
  - autor metodické příručky „Pro prověřování odborné způsobilosti právnických nebo fyzických osob k výkonu měření průtoku a posuzování funkční způsobilosti měřidel“.

## 1 HISTORIE SLEDOVÁNÍ STRUKTURY HYDRAULICKÉHO PROUDĚNÍ

Struktura proudění kapalin byla a je nutně sledována pro objasňování příčin hydraulických jevů a jejich následků. Poznání příčin a následků vedlo k následným možnostem potlačení či odstranění nežádoucích provozních stavů na hydraulických tratích a objektech. Spolehlivá analýza struktury proudění umožňuje dosáhnout tvarové optimalizace a vyšší provozní spolehlivost hydrotechnického objektu.

Pohyb kapalin byl z pohledu základních průřezových charakteristik proudění, kterými jsou hloubka a rychlost, průtok a plocha průtočného průřezu, sledován již při budování kanálů v 15. století.

Vlastní vnitřní struktura proudění byla sledována a rozebírána u přirozených vodních toků v souvislosti s hledáním vhodných profilů pro jejich přebrodění či výstavbu podpěrných mostních prvků.

Velký zlom vyvolaly Farguovy postuláty koncem 19. století v teorii úprav vodních toků, které jsou podloženy zkušenostmi z oblasti řeky Rhóny ve Francii. Jde o jeden z prvních náhledů na strukturu proudění koryt s volnou hladinou [7].

U hydraulických tlakových okruhů se rozbor struktury proudění uplatňuje při vývoji vodních strojů. První patentovaná přetlaková Francisova turbína v roce 1847 nutně ukazuje novou možnost přístupu využití mechanické energie proudu, dosud byla v rovnotlakých vodních strojích využívána pouze kinetická energie proudu (princip vodních kol). Právě oblast hydroenergetických okruhů vytvořila tlak na detailní měření a rozbor struktury proudění. Pro účely sledování parametrů proudění a realizaci následných úprav hydrotechnických objektů vznikají na přelomu 19. a 20. století hydraulické laboratoře. Pouze pro doplnění uvedu, že k první realizaci laboratoře vodních staveb na území Čech a Moravy dochází v roce 1914 na České vysoké škole technické v Brně. Laboratoř založená prof. Smrčkem v přízemí budovy B na Veverčí ulici č. 95 byla dokončena v roce 1916 [24].

V první polovině 18. století je struktura proudění předmětem zájmu teoretiků – matematiků. Teoretické rozborů jsou spjaty se jmény Bernoulli a Euler, kteří první použili pohybové rovnice hydrauliky.

Proudění kapaliny je popsáno více než 170 let známými Navier – Stokesovými rovnicemi. Ty představují nejobecnější rovnice pohybu vazké nestlačitelné kapaliny. Pokusy o numerické řešení těchto rovnic metodami konečných diferencí a konečných prvků. Byly limitovány potřebnou úrovní výpočetní techniky a skutečností, že tyto matematické modely popisují laminární, nikoliv turbulentní proudění.

## 2 MODELOVÁNÍ JAKO METODA POZNÁNÍ

Fyzikální modelování představuje jednu z důležitých cest poznání. Při jeho použití poznáváme objekt (prototyp) prostřednictvím sledování jeho modelu. Je nutné použít takový model, kdy vztahy mezi odpovídajícími veličinami objektu  $X_s$  s jeho modelem  $X_m$  jsou jednoznačně určeny ( $X_s = f(X_m)$ ). Tyto vztahy představují vztahy podobnosti.

Modely lze v zásadě rozdělit do dvou základních skupin – modely matematické a modely fyzikální.

Fyzikální modelování lze definovat jako zobrazování objektů a jevů na nich probíhajících fyzikálními prostředky, které umožňují jejich systematické, racionální a efektivní zkoumání. Vztahy podobnosti umožňují přenášet poznatky z modelu na prototyp.

Fyzikální modelování je založeno na podobnosti jevů mezi prototypem a jeho modelem. Jde o zobrazení zkoumaných jevů v prostoru a čase, v našem případě jevů hydrodynamických, obvykle s použitím modelů v laboratorních podmínkách.

V hydrotechnickém výzkumu je nejčastěji používána metoda modelování založená

na existenci dvou fyzikálně stejnorodých jevů na prototypu a jeho zpravidla zmenšeném modelu. V tomto případě hovoříme o výzkumu na hydraulických modelech, na nichž se využívá stejného média jako ve skutečnosti. Modelování je založeno na teorii podobnosti hydrodynamických jevů, která vychází buď z jejich matematického popisu (pokud je znám), nebo z teorie podobnosti rozměrové analýzy fyzikálních veličin ovlivňujících daný jev. Odvozená kritéria podobnosti umožňují aplikovat výsledky, získané výzkumem na modelu, na prototyp.

V hydrotechnickém výzkumu byla před rozvojem výpočetní techniky využívána často metoda analogie, která využívala formální shody matematického popisu daných jevů. Použití bylo charakteristické zejména pro sledování difuzních jevů, jako např. pohybu podzemní vody. V současné době není již tento přístup používán.

Matematické modelování je určeno pro sledování fyzikálních jevů, pokud jsme schopni daný jev dostatečně výstižně matematicky popsat. Složité fyzikální děje jsou nejčastěji popsány parciálními diferenciálními rovnicemi nebo jejich soustavami, které je obvykle možné řešit pouze numericky.

Důležitou vlastností matematického modelování je jeho obecnost, umožňující zkoumat širokou škálu případů, které se mohou v přírodě a v technické praxi vyskytnout, a na jejich základě hledat optimální řešení.

Poznání jevů probíhajících při protékání zájmového prostoru nebo obtékání sledovaného povrchu je v reálné praxi nejčastěji využíváno k zajištění požadovaných vlastností objektu. Zpravidla je tento cíl dosahován vyhledáním optimálního tvaru nebo provozního režimu daného objektu.

Optimální podmínky nejčastěji využívají proudění objektem při minimu ztrát mechanické energie. Naopak menší počet objektů určených pro tlumení kinetické energie proudu je navrhován na podmínky provozního optima při zvýšené ztrátě mechanické energie. U pohyblivých regulačních prvků je navíc požadována jejich polohová stabilita, manipulační jednoznačnost, kdy průtok je funkcí polohy uzávěru a úrovně hladiny.

Účelem předloženého textu není ukázat a rozebírat respektive objasňovat podstatu principů a metod využívaných v hydrotechnickém výzkumu. To je velmi dobře popsáno (vždy k danému časovému horizontu) v publikacích věnovaných této problematice [19,22].

Oba způsoby se vyznačují těsnou vzájemnou vazbou, nezastupitelností a doplňováním s důrazem na soudobou úroveň měřicí a vyhodnocovací techniky v hydrotechnickém výzkumu.

V dalším textu bude předložen výčet ukázek výsledků prací, které byly vybrány z oblasti fyzikálního modelování. Z ukázek vyplývá účelnost a spolehlivost voleného přístupu pro určitý druh sledovaného problému. Předložené ukázky výsledků experimentálních prací jsou čerpány především z oblasti výzkumů realizovaných v Laboratoři vodohospodářského výzkumu při Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně, případně ve spolupráci týmu spolupracovníků při konkrétních měřeních na jiných pracovištích.

Předložená práce je orientována pouze na oblast výzkumu hydrotechnických objektů a sledování hydrodynamických jevů v nich a na ně navazujícím okolí.

### 3 ZÁKLADNÍ ROVNICE POPISUJÍCÍ PROUDĚNÍ TEKUTIN

Proudění tekutin (kapalin a plynů) se řídí zákony mechaniky a termodynamiky. Proudění tekutiny je plně určeno v libovolném časovém okamžiku ( $t$ ) v bodě ( $x, y, z$ ) vektorem rychlosti  $\mathbf{u}$  (tři složky  $u_x, u_y, u_z$ ) a okamžitým termodynamickým stavem tekutiny (tlak  $p$ , hustota  $\rho$  a teplota  $T$ ).

Každá z těchto šesti neznámých veličin ( $u_x, u_y, u_z, p, \rho, T$ ) je funkcí polohy ( $x, y, z$ ) a času ( $t$ ). Pro jejich stanovení je nutno definovat vzájemné vazby.

Tyto vzájemné vazby jsou definovány základními zákony mechaniky kontinua a stavovými rovnicemi.

Základními jsou zákony zachování:

- hmotnosti
- hybnosti
- energie

Stavové rovnice definují vztahy mezi stavovými veličinami.

U následujících základních rovnic budou uváděny pouze obecné nejužívanější matematické formulace bez odvození a podrobnějších vysvětlivek. Odvození možno nalézt v příslušné uváděné odborné literatuře [2,15,17,21].

V hydrotechnice lze ve většině reálných situací přijmout zjednodušující podmínky, které přesnost výsledků ovlivní zanedbatelně. Jedná se zejména o přijetí konstantních hodnot tíhového zrychlení  $g$ , hustoty  $\rho$  a ve většině případů i teploty kapaliny  $T$ .

Princip kontinuity proudění vyjadřuje zákon zachování hmotnosti, který bývá nazýván rovnicí kontinuity [2,17,21]:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad , \quad (3.1)$$

kde  $\rho(x,y,z,t)$  je hustota tekutiny,  
 $u_x(x,y,z,t)$ ,  $u_y(x,y,z,t)$ ,  $u_z(x,y,z,t)$  složky vektoru rychlosti  $\mathbf{u}$ ,  
 $x, y, z$  prostorové souřadnice.

Pro nestlačitelnou kapalinu ( $\rho = \text{konst}$ ) má rovnice tvar:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad . \quad (3.2)$$

Zákon zachování hybnosti bývá často označován jako „věta o změně hybnosti“. Vychází z druhého Newtonova pohybového zákona.

Zákon bývá v inženýrské praxi často uváděn ve formě pohybových rovnic, vyjadřujících změnu hybnosti způsobenou silami objemovými, tlakovými, odporovými a setrvačnými. Tyto vztahy, popisující obecný pohyb kapaliny, byly formulovány v předminulém století nezávisle dvojicí autorů, jsou v literatuře označovány jako rovnice Navier-Stokesovy [2,17,21]:

$$a_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3\rho} \frac{\partial(\mu \dot{\epsilon}_v)}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.3)$$

.....
.....
.....
.....
.....

/1/
/2/
/3/
/4/
/5/

- /1/ ..... zrychlení vyvolané objemovými silami
- /2/ ..... zrychlení vyvolané tlakovou silou
- /3/ ..... zrychlení vyvolané objemovým přetvořením tekutiny
- /4/ ..... zrychlení vyvolané tvarovým přetvořením tekutiny
- /5/ ..... zrychlení vyvolané setrvačnými silami



V rovnici (3.3) značí  $a_i(x, y, z, t)$  složku vektoru objemové zátěžení vztaženého na jednotku hmotnosti,  $p(x, y, z, t)$  tlak,  $\rho$  hustotu tekutiny,  $u(x, y, z, t)$  složku vektoru rychlosti,  $\mu$  součinitel dynamické viskozity a  $\varepsilon_v$  rychlost objemového přetvoření.

Jestliže se předpokládá, že hustota tekutin  $\rho$  je konstantní, považuje se tekutina za nestlačitelnou. Pro nestlačitelnou tekutinu je rychlost objemového přetvoření rovna nule, tímto zaniká třetí člen rovnice (3.3).

V hydrotechnice lze ve většině reálných situací přijmout zjednodušující podmínky, které přesnost výsledků ovlivní zanedbatelně. Jedná se zejména o přijetí konstantních hodnot tíhového zrychlení  $g$ , hustoty  $\rho$  a ve většině případů i teploty kapaliny  $T$ .

Navier – Stokesovy rovnice (3.3) vystihují stav při laminárním proudění, kdy je pohyb realizován ve vzájemně nemísitelných vrstvách. Většina proudění na hydrotechnických objektech je realizována v oblasti turbulentního pohybu, který je nejsložitějším pohybem hmoty v přírodě. Turbulentní pohyb, charakteristický promícháváním jednotlivých vrstev kapaliny (tekutiny), patří mezi nejsložitější problémy nelineární fyziky, které se dosud nepodařilo úspěšně vyřešit. Parametry charakterizující turbulentní proudění mají nedeterministický charakter.

Zrychlení vyvolané tvarovým přetvořením kapaliny závisí na její viskozitě. Čtvrtý člen rovnice (3.3) vyjadřuje derivaci tangenciálního napětí  $\frac{\partial \tau_{ij}}{\rho \partial x_j}$ . První část tangenciálního napětí je funkcí dynamické (laminární) viskozity  $\mu$  a gradientu rychlosti ve směru kolmém na směr proudění, druhá část závisí na vlivu pulzací při turbulenci:

$$\tau = \tau' + \tau'' = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho u'_i \cdot u'_j. \quad (3.4)$$

Složky pulzací  $u'_i \cdot u'_j$  jsou úměrné dle Prandtla [3] gradientu  $\partial u_i / \partial x_j$ , viz kap. 4.1.

## 4 PODSTATA MATEMATICKÝCH MODELŮ

Matematický model určitého fyzikálního jevu, v našem případě hydrodynamického, probíhajícího v prostoru a čase, využívá matematické vyjádření zákonů zachování a stavových rovnic. Numerické řešení konkrétního jevu v určitém prostředí je realizováno v náhradní modelové oblasti.

Na rozdíl od fyzikálního modelu, který zobrazuje skutečnost spojitě, je numerický model obvykle tvořen souborem diskrétních hodnot proměnných veličin a parametrů. To vyžaduje schematizaci matematického modelu. Přesnost a spolehlivost matematického modelování je dána výstižností matematického popisu, vhodnou volbou metody jeho řešení a stupněm použité schematizace, které jsou závislé na použité výpočetní technice a přesnosti vstupních dat.

V této kapitole bude pouze stručně pojednáno o podstatě matematické formulace pohybových rovnic jako hlavního nástroje pro určení stavu proudící kapaliny.

### 4.1 ŘEŠENÍ 3-D ÚLOHY PROUDĚNÍ NESTLAČITELNÉ KAPALINY

Detailní mikropohled na proudové poměry využívá k řešení izotermického proudění 4 rovnice (3 Navier-Stokesovy a kontinuity) pro 4 neznámé (3 složky vektoru rychlosti  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  a tlak  $p$ ). Řešení soustavy vytváří však značný nárok na jemnost dělení sítě (až milimetry) a

časového kroku (desetiny až tisíce sekund v závislosti na celkové velikosti oblasti), což je dosud pro výpočetní techniku zpravidla neschůdné. Rovněž vyvstává nárok na určení okrajových podmínek.

Schůdné pro současný stav techniky je řešení s časově zprůměrovanými veličinami. Složky rychlosti i tlak jsou však vyjádřeny v tomto pojetí časově středními hodnotami  $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z, \bar{p}$  a jejich fluktuacními složkami  $u'_x, u'_y, u'_z, p'$ . Střední hodnoty jsou vyjádřeny pro dostatečně dlouhý časový interval v porovnání s dobou pulzací turbulentního pohybu. Pak platí  $\bar{u}'_i = 0, \bar{p}' = 0$ .

Dosažením vztahu (3.4) do Navier - Stokesových rovnic pro nestlačitelnou tekutinu a časovým zprůměrováním se obdrží Reynoldsovy rovnice:

$$\rho \bar{a}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij}^l + \bar{\tau}_{ij}^t)}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (4.1)$$

Reynoldsova napětí  $\bar{\tau}_{ij}^t = \rho \overline{u'_i u'_j}$  jsou funkcemi pouze rychlostního pole, Newtonova laminární napětí  $\bar{\tau}_{ij}^l$  vyvolané vazkostí kapaliny jsou funkcemi střední hodnoty gradientu rychlosti a molekulární viskozity.

Přibližné řešení získáme zavedením dalších předpokladů založených na empiricky zjišťovaných hodnotách. Empirické charakteristiky bývají do systému rovnic zadány zpravidla při řešení hydrotechnických problémů různými modely turbulence [6,11,16,17,20]. Jedná se o doplňující rovnice, které určují turbulentní členy v Reynoldsových rovnicích, což umožňuje uzavřít celý systém rovnic. Modely turbulence se liší jak přístupem k modelování neznámých korelací mezi fluktuacními složkami, tak také počtem rovnic, které soustavu uzavírají.

Určování hodnot Reynoldsova napětí v různých proudových poměrech patří k hlavním úlohám experimentálního výzkumu turbulentního proudění.

## 4.2 TESTOVÁNÍ MATEMATICKÝCH MODELŮ PROUDĚNÍ V HYDROTECHNICE – SOUČASNÝ STAV

První pokusy o řešení proudění v laminární oblasti metodou konečných prvků realizovali u nás Kratochvíl, Růžičková a Ženíšek v roce 1974 [13,14].

Nalezení vhodného modelu proudění k určité charakteristické třídě úloh je záležitostí výzkumných týmů složených z matematiků i experimentátorů a techniků. K tomuto účelu jsou vynakládány nemalé prostředky zejména státními institucemi případně velkými firmami, které mají na získaných výsledcích základního výzkumu přímý zájem. Lze říci, že přibližně před deseti lety tento zájem o nalezení a ověření vhodných matematických modelů ve světě začal silně gradovat [6,11,16,17,20]. V současné době je u nás orientována řada grantových projektů do této „testovací, kalibrační a verifikační“ oblasti hydrodynamiky.

Pro testování vhodnosti a spolehlivosti modelů jsou vytypovány charakteristické obtékané prvky relativně jednoduchých tvarů, které umožní vzájemnou porovnatelnost různých matematických modelů. V současné době jsou těmito prvky zejména kolenový oblouk, plynulé rozšíření, „skokové“ rozšíření, jejichž společným znakem je odtržení a znovupřilnutí mezní vrstvy se vznikem vírových struktur. Poloha zóny odtržení mezní vrstvy „smykového“ proudění je závislá na viskozitě kapaliny a charakteru proudění u obtékaného povrchu. U prvních dvou uvedených prvků je tato zóna výrazně funkcí hodnoty Reynoldsova kritéria. Pokud sledujeme u těchto případů konečnou šířku kanálu (3D přístup), vyvolávají

interakce s mezními vrstvami na stěnách poměrně stabilní vírové struktury v oblasti odtržení mezní vrstvy [6,16].

Právě tyto zmíněné případy obtékání charakteristických prvků s odtržením se vyznačují jednoduchou geometrií, ale velmi složitou strukturou proudění, které nabývá výrazně nestabilní charakter. Proto slouží tyto obtékané prvky k ověřování matematických modelů.

Pro rozbor komplikované struktury proudu v oblastech odtržení jsou ve světě používány metody žárové a laserové anemometrie a nově metoda integrální laserové anemometrie (viz dále) [1,5,8,10,12,18,25,27,28,29,30].

Při řešení problémů kalibrace, verifikace a vyhledávání vhodných modelů je zapojena Laboratoř vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně měřeními a vyhodnocováním struktur proudu již několik let zejména díky využívání přesných experimentálních postupů včetně bezkontaktních metod [9, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42].

## 5 FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ

### 5.1 TEORIE PODOBNOSTI V PROUDĚNÍ TEKUTIN

Základní věty teorie podobnosti jsou:

1. Fyzikálně podobné jsou děje téže fyzikální povahy, probíhající v soustavách navzájem geometricky podobných, jestliže odpovídající veličiny jsou si na odpovídajících místech obou soustav podobny.

2. Bezrozměrné argumenty (kriteria podobnosti), odvozené z diferenciálních rovnic, jsou stejné jako argumenty z jejich integrálů.

3. Nutná a postačující podmínka podobnosti dvou dějů je rovnost bezrozměrných argumentů včetně argumentů odvozených z okrajových a počátečních podmínek.

Z třetí věty o podobnosti vyplývají pro stavbu modelů a práci s nimi tyto závěry:

- model musí být geometricky podobný prototypu;
- děje probíhající na modelu a prototypu, které patří do stejné třídy dějů, musí popisovat též fyzikální rovnice;
- počáteční a okrajové podmínky na modelu, vyjádřené v bezrozměrném tvaru, musí nabývat týchž hodnot jako počáteční a okrajové podmínky na prototypu, vyjádřené rovněž v bezrozměrném tvaru;
- stejnojmenné simplexity – bezrozměrné argumenty si musí být na modelu a prototypu rovny.

Pohyb tekutin je možné zkoumat na fyzikálních modelech. Výsledky z měření na těchto (zpravidla zmenšených) modelech je možné přepočítat na prototyp. Přepočty umožňují realizovat teorie modelové podobnosti. Tato teorie stanoví podmínky, při kterých je zkoumaný jev na modelu a prototypu fyzikálně podobný.

Pro odvození kritérií podobnosti proudění lze využít Navier-Stokesovy rovnice [2,21].

Tyto rovnice popisují proudění na prototypu i jeho (zmenšeném případně i zvětšeném) modelu.

$M_x$  vyjadřuje poměr mezi veličinou  $X_s$  na prototypu a  $X_m$  na modelu:

$$M_x = \frac{X_s}{X_m} . \quad (5.1)$$

Jednotlivá kritéria podobnosti jsou při aplikaci druhé věty teorie podobnosti jevů na prototypu a modelu spjata vztahy:

$$\frac{M_a \cdot M_l}{M_u^2} = \frac{M_p}{M_\rho \cdot M_u^2} = \frac{M_l}{M_u \cdot M_t} = \frac{M_v}{M_u \cdot M_l} = 1. \quad (5.2)$$

Bezrozměrný argument

$M_a$  představuje poměr zrychlení na prototypu a modelu,  
 $M_l$  poměr délek na prototypu a modelu,  
 $M_p$  poměr tlaků na prototypu a modelu,  
 $M_u$  poměr rychlostí na prototypu a modelu,  
 $M_t$  poměr času na prototypu a modelu,  
 $M_\rho$  poměr měrných hustot na prototypu a modelu,  
 $M_v$  poměr kinematických viskozit na prototypu a modelu.

Při působení tíže u účinku objemových sil  $a = g$  obdržíme podmínku:

$$\frac{M_g \cdot M_l}{M_u^2} = \frac{1}{M_{Fr}} = 1, \quad (5.3)$$

která definuje Froudovo kritérium mechanické podobnosti.

Poměr

$$\frac{M_v}{M_u \cdot M_l} = \frac{1}{M_{Re}} = 1, \quad (5.4)$$

představuje Reynoldsovo kritérium mechanické podobnosti při dominujícím účinku třecích sil.

Tato dvě kritéria (5.3) a (5.4) jsou nejpoužívanější při modelování proudění jevů v hydrotechnice.

Další užívaná kritéria, odvoditelná výše uvedeným způsobem jsou popsána v odborné literatuře [3,19,22], kde jsou též uvedeny omezující limity pro splnění podmínek modelové podobnosti.

## 5.2 HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ

V hydrotechnice je nejčastěji používanou metodou analyzování a řešení hydrodynamických jevů modelový výzkum na hydraulických modelech. Výzkum se provádí zpravidla na zmenšených hydraulických modelech v hydraulických laboratořích.

Na hydraulických modelech, kde je zpravidla použito shodné médium s vlastním objektem (voda), je prováděno vyšetřování zákonitostí proudění. Modely umožní účinně přispět k optimálnímu návrhu úpravy řešení vlastního objektu.

Hydraulické modelování pomáhá objasňovat i složité jevy prostorového proudění např. situování vodních děl, stavební postupy a jejich vliv na splaveninový režim toku.

Hydraulické modelování rovněž umožní kalibrovat i verifikovat výsledky matematických modelů hydrodynamických jevů.

V hydraulických laboratořích jsou zpravidla využívány dva druhy provozních okruhů:

- „s volnou hladinou“ (při působení atmosférického tlaku na volný povrch hladiny),
- s podmínkami rozdílných tlaků vzhledem k tlaku atmosférickému (tlakové, podtlakové tratě).

Zvláštní hydraulické modely jsou využívány pro sledování dvoufázových jevů (provzdušněný proud, splaveninový a plaveninový režim).

V některých zvláštních případech je možné ke sledování hydrodynamických jevů použít i další analogii aerodynamického modelování. Tento trend, v mnoha případech při porovnání s náklady na provoz hydraulických modelů ekonomičtější se objevuje v Evropě počátkem roku 1950, v naší laboratoři byl s výhodou využíván od počátku 60. let [23].

### 5.3 VYUŽITÍ AERODYNAMICKÝCH MODELŮ V HYDROTECHNICE

Z hlediska názornosti je aerodynamická analogie poněkud méně známá, proto se o ní v této kapitole zmíním poněkud podrobněji.

Proudění vzduchu v ohraničeném prostoru se řídí shodnými zákony mechaniky a termomechaniky jako další tekutiny. Pro řešení stavových veličin jsou používány uvedené rovnice (3.1) a (3.3) odvozené pro stlačitelné médium. Pokud zajistíme při proudění vzduchu určité rychlostní a tlakové podmínky, lze vliv stlačitelnosti na výsledné stavové veličiny uvažovat prakticky v rozmezí hodnot chyb jejich měření. Tato teorie potvrzená řadou experimentů je uvedena v [4,23].

Podobnost proudění na aerodynamickém a hydraulickém modelu při dominanci třecích sil je určena v oblasti zanedbání vlivu stlačitelnosti vzduchu vztahy:

$$Re_{aer} = Re_{hydr} = \frac{u_{aer} \cdot l_{aer}}{v_{aer}} = \frac{u_{hydr} \cdot l_{hydr}}{v_{hydr}}, \quad (5.5)$$

zde indexy *aer* jsou vztaženy pro provoz na aerodynamickém, *hydr* na hydraulickém modelu.

Zaručíme-li nárůst maximálního tlakového rozdílu v protékané oblasti vzhledem k absolutnímu okolnímu tlaku do 3 %, jsou změny hustoty media zanedbatelné či výstižněji řečeno je tato odchylka shodná s hodnotou chyby měření.

V oblasti tlakového či podtlakového proudění je pohyb vody i vzduchu určen za výše uvedeného předpokladu shodnými vztahy. Pohyb tekutiny (vzduchu) v poproudním směru se vyznačuje adekvátní změnou tlaku (zpravidla poklesem, výjimku představuje difuzorové proudění), která může být doprovázena expanzí nebo stlačením. Výsledky však prokazují [3,4,23], že při rychlostech proudu do ( 35÷50) m.s<sup>-1</sup> je chyba u vyjádřených tlakových součinitelů ze změřených hodnot na modelu v porovnání se skutečností na vodě do 1 %.

Aerodynamické modelování umožňuje relativně schůdně a velmi přesně analyzovat strukturu stacionárního proudu v tlakových systémech hydrotechnických okruhů při dominanci sil vazkosti (Reynoldsovo kritérium modelové podobnosti). Tento určitý způsob modelování byl v naší laboratoři zejména v letech 1970 ÷ 1990 využit pro sledování hydraulických charakteristik a optimalizaci tvarů pro změnu směru, průtočného průřezu ( konfuzorové, difuzorové tvary ), rozváděcích profilových mříží, uzávěrů, odbočnic [59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69].

Aerodynamické modelování může však být využito i pro sledování hydraulických veličin v systémech s volnou hladinou. Pokud známe polohu hladiny nebo její deformace můžeme považovat za zanedbatelné, lze na aerodynamických modelech měření vybraných charakteristik provádět. Hladina bývá zpravidla nahrazena průhledným plexisklem umístovaným do různých úrovní tak, aby rychlosti v proudu v zájmové oblasti (ohraničené shora fiktivní nebo skutečnou modelovou hladinou) byly podobné. Na aerodynamických modelech říčních tratí je možné využívat relativně vysokých rychlostí, což umožní dosáhnout oblasti modelovosti i při menších geometrických rozměrech nežli na modelech vodních. Toto přináší výhody zejména ve sledování poměrů v inundačních územích, jejichž modelování na vodních tratích je vzhledem k nízkým rychlostem nespolehlivé [3].

Dokonce při výzkumu problematiky stability dna vodního toku při použití ochranných prvků pro stavební práce byla využita tato metoda [68,69]. Při dodržení proudových relativních okrajových podmínek byly na modelu s pohyblivým písčitém dnem využívány vysoké rychlosti proudu  $u \sim (5 \div 12) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , které splňovaly podmínku podobnosti vymílacích procesů na dně pro model a dílo (realitu). Tato skutečnost umožnila dosáhnout zkrácení doby charakteristické deformace oproti vodnímu modelu téhož délkového měřítka v daném případě 33 x. Právě pro sledování účinnosti potřebných alternativ úprav tvarů a případných sanačních prací je toto zkrácení nesmírně výhodné.

Využití vzduchu při sledování dnových výmolů umožňuje další výhodu oproti vodnímu modelu, jehož zmenšení je určeno mezí použitelnosti zrna modelové frakce. Při použití frakce se zrn  $d < 0,15 \text{ mm}$  se ve vodě začíná projevat soudržnost zrn. Tento jev se u našich aerodynamických pokusů (při vysušování frakce na modelu infrazáříči před zkouškami) neprojevil ani na zrnech  $d = 0,05 \text{ mm}$ .

## 6 VÝVOJ TECHNIKY PRO VÝZKUM STRUKTURY PROUDĚNÍ NA HYDROTECHNICKÝCH OBJEKTECH

Experimentální technika pro analyzování proudových poměrů a chování hydrotechnických objektů prochází stále intenzivním vývojem. Vývoj je určen jednak potřebami aplikační sféry, základního výzkumu a možnostmi úrovně měřicí a vyhodnocovací techniky. Právě oblast výpočetní techniky na jednu stranu limituje charakter měřicího procesu například rychlostí záznamu, vyhodnocení a kapacitou pro archivaci dat. Na druhou stranu jsou to právě výpočetní postupy, které při aplikaci matematických modelů vyžadují značné množství přesných stavových veličin v zájmové sledované oblasti proudu nebo povrchu konstrukce. Některé experimenty vyžadují například velmi rychlý sled měření ve stovkách měrných bodů zvoleného prostoru.

Ze základního pohledu lze experimentální techniku pro výzkum proudových a zátěžových poměrů rozdělit do následujících skupin:

- a) vlastní měřicí elementy (čidla) a vyhodnocovací jednotky,
- b) pohybovací mechanismy, zajišťující zpravidla automatizovaný nebo počítačem řízený pohyb měřicích elementů, regulačních prvků nebo sledovaných objektů případně jejich částí,
- c) experimentální hydraulické případně aerodynamické okruhy pro zajištění proudění s tlakovým (podtlakovým) časově závislým či nezávislým režimem nebo prouděním s volnou hladinou.

### 6.1 MĚŘICÍ A VYHODNOCOVACÍ TECHNIKA

#### 6.1.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTÍ PROUDU KAPALINY – KONTAKTNÍ METODY

Rychlost proudění je detailně sledována přibližně po dobu 150 let (při různých stupních přesnosti).

V klasickém pojetí jde o měření bodových hodnot rychlosti proudu kontaktní metodou. K tomuto účelu jsou využívány zejména **vodoměrné vrtule** (hydrometrická křídla), kde rychlost proudu v měrném bodě určuje počet snímaných časových impulsů. Rozměry rotorů vrtulí včetně stoupání šroubovice nebo nastavení úhlu lopatek mohou být voleny dle místních poměrů. Těmito parametry lze též ovlivnit nejistotu (přesnost) výsledku vyhodnocené veličiny. Vrtule o průměrech rotoru 8 mm (mikrovrtule) až 250 mm lze použít pro rozmezí rychlosti  $u = (0,1 \div 10,0) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vyhodnocená velikost rychlosti je garantována zpravidla s odchylkou  $\pm (1,5 \div 3,0) \%$  při dodržení odklonu osy rotoru od nabíhajícího proudu v rozsahu  $\pm (5 \div 15)^\circ$ .

Vodoměrné vrtule (mikrovrtule) bývají též využívány k měření rychlosti proudu vzduchu. Horní hranice bývá v tomto případě extrémně až  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Při časové registraci snímaných impulsů z rotoru lze využít vrtulí k vyhodnocování pulsací do frekvence  $f = 5 \text{ Hz}$ . Některé speciální laboratorní mikrovrtulky umožnily snímání s vyhodnocením až  $f = 20 \text{ Hz}$ . K tomuto účelu byla vyvinuta v laboratořích v Delftu mikrovrtule o průměru  $15 \text{ mm}$ , která vysílá  $60$  impulsů na otáčku. K zvláštnostem této mikrovrtule patří také to, že umožňuje impulsově rozlišit i směr proudění, což je ocenitelné v oblastech částečně zpětného proudění.

U vyšších rychlostí proudu ( $u > 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) se historicky nejčastěji využívaly pro měření této veličiny **tlakové sondy**. Rychlost je určována z měřené rychlostní výšky nebo tlakové difference (Pitotovy nebo Prandtlovy trubice). Dané sondy jsou využitelné pro měření rychlostí proudu kapalin i plynů [19,22].

Při vývoji elektronických měřicích prvků dochází v posledních pěti letech k oživení historického osvědčeného tlakového principu měření parametrů proudění. Zejména v oblasti aerodynamických měření byly vyvinuty **sondy** s  $5$  až  $18$  **piezometrickými odběry** na povrchu čidla zpravidla sférického tvaru. Při vnějším průměru čidla kulovitěho tvaru, stabilizovaného nosičem průměru  $6,34 \text{ mm}$  s vnitřními kanálky je daný typ sondy chloubou současné miniaturizace. Při správné kalibraci je možné definovat úplný vektor rychlosti nabíhající proudnice. Na aerodynamických modelech zaručuje výrobce možnost určení frekvenčních změn do  $500 \text{ Hz}$  (v závislosti na typu snímače). Pro vodní modely je tato hranice asi o tři řády nižší [30].

„Víceotvorovost“ této piezo sondy má nesmírnou výhodu při měření proudění nestacionárního charakteru se značně proměnným směrem natékání proudnice vzhledem k čidlu.

Současně princip víceotvorové sondy umožňuje přímo z výsledků jednotlivých piezometrických tlaků stanovit statický tlak kapaliny v daném měrném bodě. Měření statického tlaku patří dosud k nejobtížněji získatelným veličinám parametrů proudění. Je pochopitelné, že tato možnost získatelnosti úplných parametrů nestacionárního proudění využívá kontaktního způsobu.

Pro měření rychlosti proudění plynů se používají **žárové sondy** s drátky o průměru v jednotkách mikrometru a pro měření kapalin sondy se žhaveným povrchem.

Pro dosažení dobré rozlišovací schopnosti žárových sond je snahou „vyžhavit“ drátek na značně vyšší teplotu nežli má měřené medium. U vzduchových tratí byly první typy sond „vyžhávány“ na  $270^\circ\text{C}$ . Tato teplota přinášela značné problémy z hlediska kalibrace sond pro časovou nestálost (drift), což bylo způsobeno „natavením“ mikronečistot unášených obtékajícím mediem. V současné době umožňují nízkošumové zesilovače používat drátkové sondy se žhavicí teplotou cca  $100^\circ\text{C}$  [18,31,32,33].

U vodních modelů jsou využívány žárové sondy se „žhaveným filmem“. Aktivní část sondy je tvořena tenkým odporovým filmem naneseným na nevodivě tepelně izolující podložce. Pro ochranu aktivní vrstvy je její vnější povrch pokryt křemičitou vrstvou velmi malé tloušťky.

Pro miniaturní rozměry těchto typů sond lze využít modelů menších rozměrů při úplné automatizaci měřicího procesu (včetně automatizovaného pohybu sond).

Rychlostní rozsahy těchto typů sond se pohybují od  $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Sondy lze na vzduchových mediích využít pro rozbor rychlostních fluktuací řádu kHz.

Pro měření extrémně nízkých rychlostí proudu byly v minulosti často využívány **termistorové sondy**. Tyto typy sond umožnily relativně přesné měření rychlosti řádu několika  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nevýhodou metody byla značná setrvačnost sond a velmi častá potřeba recalibrace i při procesu měření (značný drift sond). Dnes již tento způsob není využíván.

K měření bodových rychlostí kontaktní metodou byly vyvinuty i další typy sond, tyto však nedoznaly masovějšího využití. Rovněž z hlediska případného budoucího použití, které je pro automatizaci nevhodné, nebudou zvláštní způsoby uváděny.

### 6.1.2 MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDU – BEZKONTAKTNÍ METODY

Při měřicím procesu dochází zpravidla k instalaci měřicího čidla (sondy) do proudu kapaliny. Vlivem kontaktu kapalina – měrný element dochází ke změnám určitých sledovaných vlastností čidla, rovněž čidlo ovlivňuje více nebo méně proudové poměry v jeho okolí. Pro přesnější a detailní sledování hydrodynamických reálných jevů byly vyvinuty bezkontaktní metody měření bodových rychlostí. U obou níže uvedených se usuzuje na rychlost proudu v měrném prostoru z rychlosti pohybu proudem unášených odrazných mikročástic. Pro oba popsání způsoby je možno doplnit, že běžná vodovodní voda obsahuje těchto částic dostatek pro získání dostatečné intenzity odrazného signálu k vyhodnocení rychlosti média.

V roce 1970 přichází do praxe **laserový dopplerovský anemometr (LDA)**. Zdroj záření LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) vysílá nepřerušovaně monochromatické polarizované světlo (světelný svazek).

Princip LDA je možno zjednodušeně popsat pomocí interferenčního modelu. V proniku dvou interferujících koherentních svazků paprsků laseru dochází ke vzniku interferenčních rovin. Vzdálenost vzniklých rovin, běžně je v jednotkách mikrometru, je závislá pouze na úhlu  $\vartheta$  mezi paprsky a vlnové délce  $\lambda$ . Stabilita tohoto rastru, daná stabilitou vlnové délky laserového záření, je základem tvrzení, že LDA je absolutní měřidlo a tedy není třeba jej „cejchovat“. Vzhledem k tomu, že svazky laserových paprsků mají kruhový průřez a gaussovský průběh intenzity v příčném řezu, má skutečný prostor, v němž dojde k interferenci, tvar podobný rotačnímu elipsoidu s délkou hlavní osy  $\sim 1$  mm. Projde-li vhodná částice tímto prostorem, vyšle signál úměrný složce její rychlosti, obr. 1, 2.

V následném kroku je z tohoto signálu zjišťována Dopplerova frekvence  $f_D$  a ta je přímo úměrná složce rychlosti unášené částice  $v_x$ . Tento princip je charakteristický pro nejčtenější využití v hydrotechnické praxi, jedná se o tzv. diferenční uspořádání využívající dvou laserových svazků o stejné intenzitě.

Popsaným způsobem je změřena a vyhodnocena velikost složky rychlosti (průmět vektoru rychlosti do roviny svazků laseru).

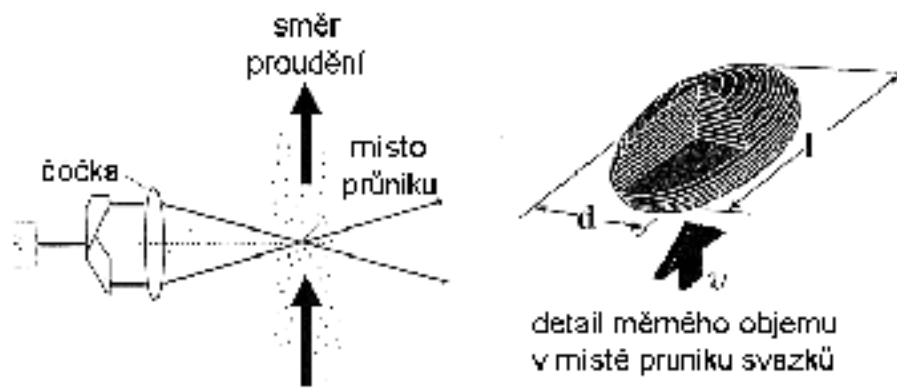
Změření úplného vektoru rychlosti v měrném bodě vyžaduje buď změnu polohy roviny svazků nebo využití vícesložkových souprav.

Při dvousložkovém uspořádání do měřené oblasti vstupuje ještě další dvojice paprsků podél stejné osy symetrie jako první dvojice. Rovina těchto paprsků je však oproti první dvojici pootočená, zpravidla o  $90^\circ$ , obr.3. Všechny čtyři paprsky se protínají v jediném bodě. Dvojice se navzájem liší vlnovou délkou světla (barvou). Je možno ještě poznamenat, že téhož lze docílit, protínají-li se dva paprsky různých barev s třetím, jenž obsahuje obě tyto vlnové délky. Vektorovým skládáním naměřených dvou složek vektoru rychlosti lze získat informaci o průmětu vektoru rychlosti do roviny kolmé na osu optického systému. Složku vektoru rychlosti, definující jeho odklon od této roviny, lze měřit využitím třetí dvojice svazků paprsků s další jinou barvou. Tyto svazky však již musí být umístěny mimo osu symetrie prvních dvou párů paprsků.

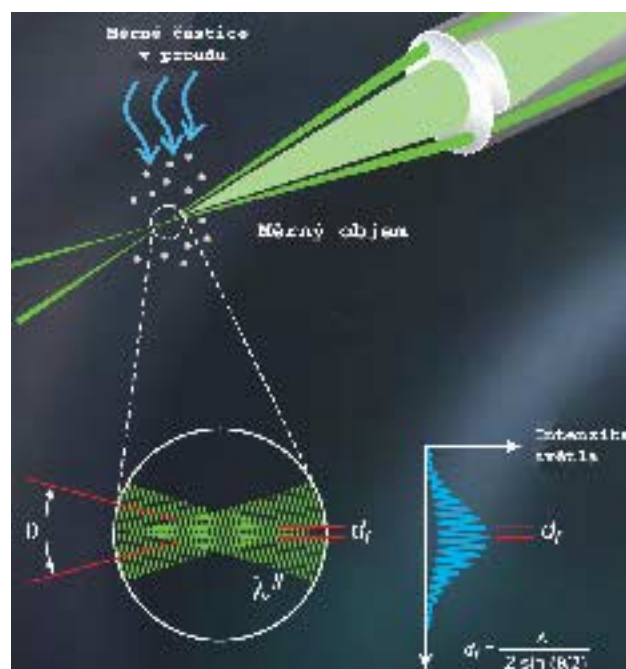
K podstatným vlastnostem LDA patří možnost využití pomocného elektronického zařízení umožňujícího měřit záporné i nulové velikosti rychlosti (Braggovy celly).

Vlastní měření metodou LDA probíhá tak, že do zvolené sítě bodů je postupně umísťován průsečík paprsků a podle typu měřicího zařízení schopného pracovat s jednou,

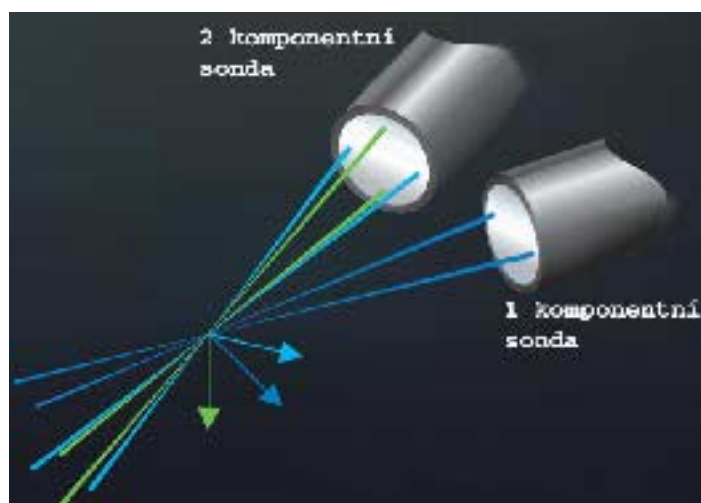




Obr. 1 Schéma průniku svazku laseru; detail interferenčních rovin v měřném bodě



Obr. 2 Schéma pro výpočet složky rychlosti u LDA systému



Obr. 3 Schéma 3 D měření LDA systémem v měřném bodě

dvěma nebo třemi barvami je synchronně měřen příslušný počet složek rychlosti. V případě měření s jednokanálovým zařízením lze změřit druhou složku rychlosti pootočením roviny, v níž leží paprsky, okolo podélné osy symetrie. Z takto získaných okamžitých měření lze dávat do souvislosti pouze jejich časově střední hodnoty [5,27,29,34].

K velkým přínosům LDA patří:

- bezkontaktnost procesu a malý prostor měřicího objemu (prakticky měrný bod),
- možnost měřit rychlosti i záporné a dokonce nulové,
- měřicí horní hranice činí desítky  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- možnost měření fluktuací rychlosti v řádu kHz,
- do výpočtu složky rychlosti vstupují pouze konstanty určené frekvencí užitého laserového světla a úhlem proniku dvojice polarizovaných svazků.

Vedle zde uvedených předností má metoda i uživatelská úskalí a omezení, které jsou včetně podrobnějších zkušeností popsány v [25].

Díky tomuto bezkontaktnímu principu mohla být provedena řada měření, jež by byla jinými způsoby nerealizovatelná .

Druhou významně používanou bezkontaktní metodou měření rychlosti proudu je ultrazvukový princip. **Ultrazvukové anemometry** bývají využívány pro stanovení složky rychlosti v měrném bodě případně i pro rozložení složky rychlosti na měrné ose (traverze).

Principálně je měření založeno na vyslání krátkého ultrazvukového (UZV) impulzu od vysílacího čidla. Pokud se v proudu pohybují odrazné částice s nenulovým průmětem rychlosti do osy UZV čidla, dojde k dopplerovskému posuvu odražené původní frekvence vysílaného signálu. Velikost průmětu složky rychlosti proudu je je přímo úměrná frekvenci dopplerovského posunu a rychlosti zvuku v mediu a nepřímou úměrnou vysílací frekvenci [28].

Výhodou měřicích systémů je možnost měření i záporných složek rychlosti.

Omezení reálné měřitelnosti hodnot složek rychlosti činí ve vodě v závislosti na vysílací frekvenci UZV  $u_{\text{max}} \sim 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , fluktuace mohou být registrovány do řádu kHz.

Logickým předpokladem úspěchu metody je dostatek vhodných odrazných částic a korektní znalost rychlosti  $c$  šíření UZV signálu měřeným mediem. Při výskytu pohltivých částic ve vodě měření selhává (buničina, celulóza).

O bezkontaktní metodě v případě UZV anemometru lze hovořit, pokud vysílací a přijímací sonda je umístěna mimo zájmový protékající prostor. Poloha měrného bodu (objemu), z něž je snímán od odrazných částic signál s informací o frekvenčním posuvu, je určena z doby časového posunu mezi vysláním a příjmem. Rovněž tento údaj je závislý na korektním stanovení rychlosti šíření UZV signálu v mediu.

U jednodušších principů využívaných zejména v „polní“ technické praxi, je informace o fázovém posuvu snímána od odrazných částic z relativně většího měrného objemu (prostoru) , který se nachází protiproudě od sondy [28,35].

### 6.1.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDU – INTEGRÁLNÍ METODY

Dosud uváděnou měřicí technikou byla získatelná informace o rychlosti nebo její složce v jednom měrném bodě. Při požadavku získat obraz o rozložení rychlosti proudu v charakteristických svislicích, horizontálách nebo celém měrném profilu (zpravidla rovinném) touto technikou by bylo nutné měrný bod přemísťovat. Tento přístup je proveditelný a spolehlivě využitelný za předpokladů, že proudění má stacionární charakter ( $Q = \text{konst}$ ) a měřicí soustava není citlivá na vliv časového driftu (změny vlastností). Z tohoto pohledu bude muset být plněna v mnoha případech podmínka pro medium v hydraulickém okruhu konstantní teploty ( $T = \text{konst}$ ) a v aerodynamickém okruhu navíc konstantní vlhkosti ( $w = \text{konst}$ ).

Proměření rychlostních parametrů metodou přemístování měrného bodu je možné realizovat i při nestacionárním proudění, které však má dominantní periodický charakter. Takto jsou realizována například přesná měření na výstupech z oběžných kol vodních strojů nebo dokonce přímo v prostoru mezi statorovými nebo rotorovými lopatkami. Jednotlivá měření musejí být vždy přesně jednoznačně časově „zfázována“.

Přesně zřazované měření bývá s úspěchem realizováno v prostoru oběžného kola čerpadel nebo vodních turbín („trigerační“ postup). Okamžiky měření musejí být jednoznačně definovány k poloze oběžného kola. Takto bylo provedeno měření pod oběžným kolem Francisovy trubiny v mimooptimálním režimu provozu s dominantním polohově rotujícím vírem [13].

Úplně novým moderním přístupem je **metoda ultrazvukového profilování** (Ultrasonic Velocity Profiling), která je využita v UVP Monitoru.

Jedná se o metodu integrální, která podává přehled o okamžitém rozložení složek rychlosti na ose vysílaného UZV signálu. Polohu osy signálu a tedy i vysílací sondy lze volit dle potřeby.

Principiálně je využita výše popsaná UZV metoda, která je rozšířena o kontinuální snímání časové prodlevy mezi vysláním a obdržáním odraženého signálu. Tento způsob přiřazuje ke každé dopplerovsky posunuté frekvenci  $f_d$  odpovídající časový posun  $\Delta t$ , který je úměrný vzdálenosti rozptylující odrazné částice od vysílací a přijímací sondy.

Softwarovým vyhodnocením v počítači (vyhodnocovacím procesoru) je získáno jako výstup rozložení složek rychlosti na měřicí ose.

Při využití více vysílacích kanálů procesoru a více sond lze získat prakticky okamžitý obraz o rozložení složek rychlosti v úplném měrném profilu.

Omezení metody a příslušné rychlostní a frekvenční rozsahy byly uvedeny v předchozí kapitole.

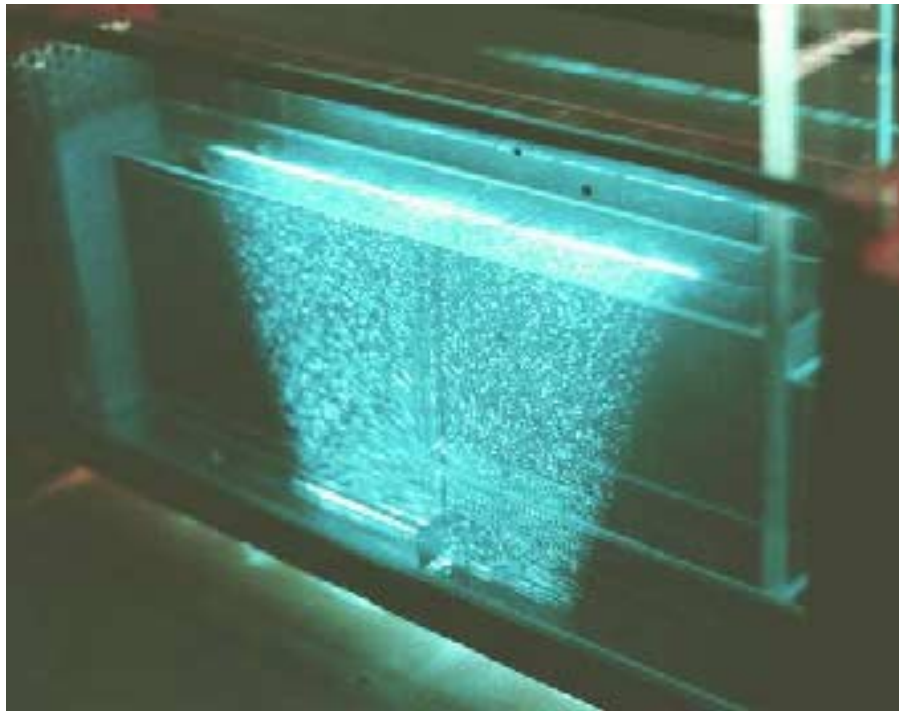
Metoda byla poprvé prezentována v roce 1985. Rozšíření v laboratorních podmínkách nastalo výrobou UVP monitorů od roku 1996 [28].

Prakticky ve stejném období se dočkala většího uplatnění metoda měření rychlosti pomocí obrazu částic – „Particle Image Velocimetry“ – PIV. Pro větší výstižnost je však vhodnější název **integrální laserová anemometrie** [1,8,10,12,25,27,29].

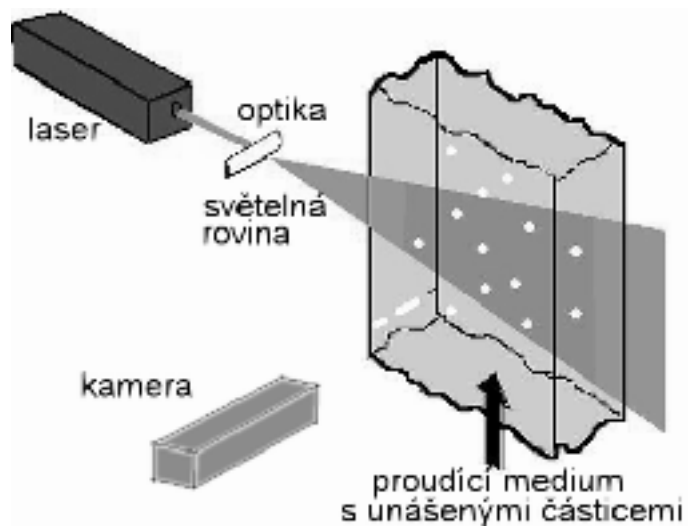
PIV je metoda měření rychlosti v celém dvourozměrném proudovém poli současně. Tato metoda vychází ze zaznamenávání poloh unášených částic (obr.4,6). Sledovaná část proudícího média je určena průnikem oblasti osvětlované laserem a prostoru, jenž je v zorném poli záznamového fotoaparátu nebo jiného detektoru. Téměř výhradně se k osvětlování používá laserová stěna – tenký světelný list (obr.5) čímž je měřeno v tenkém „dvourozměrném“ prostoru proudu. Obecně je možno osvětlit určitý omezený objem (prakticky ovšem pouze velmi štíhlý hranol nebo válec) a provést v něm úplné prostorové měření.

Výrobek dánské firmy Dantec, zařízení FlowMap je stavebnicový systém k měření metodou PIV. Jádro systému tvoří procesor, který řídí a synchronizuje činnost ostatních komponentů. V závislosti na počtu a typu použitých záznamníků je maximální tempo měření a zpracování včetně uložení výsledků 2 až 30 za sekundu. To umožňuje studovat prostorové souvislosti při vývoji nestacionárního proudového pole, což je bodovými měřicími metodami někdy nezjistitelné, anebo v nesrovnatelně kratším čase (než bodovými metodami) provést v kvazistacionárním proudovém poli statisticky významný počet měření k získání časově středních údajů v celém průřezu proudění, obr. 9,12a), 12b).

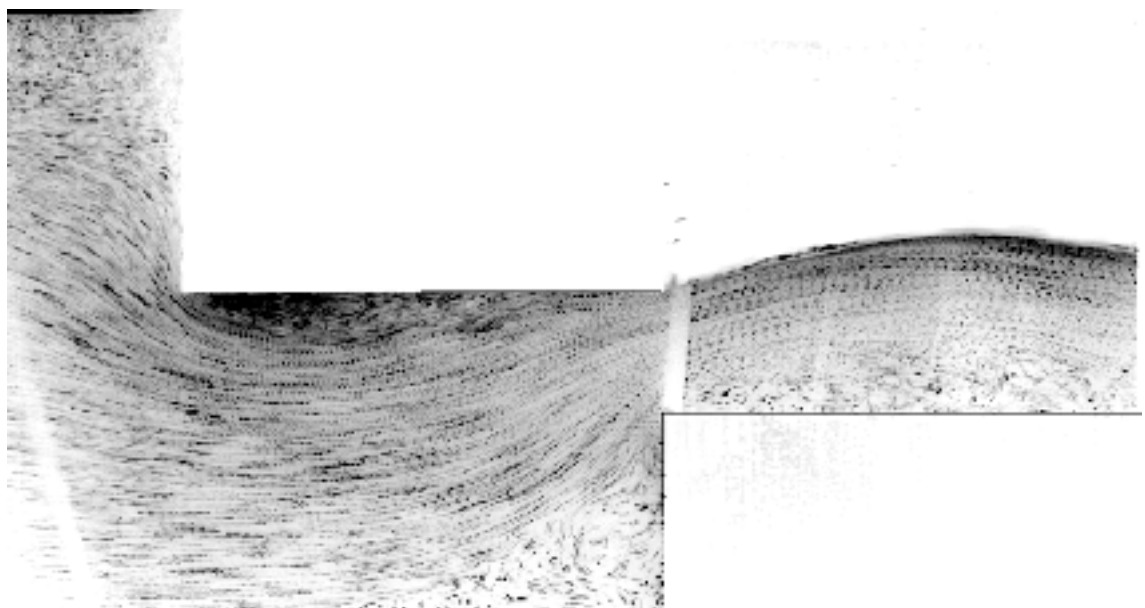
Tato unikátní integrální metoda má jako všechny způsoby měření výhody i omezení. K podstatným rysům patří nárok na intenzitu „světelného nože“, na koncentraci a typ odrazných částic (obdobně jako u LDA) a provedení optického vstupu. Rozbor technických omezení metody je uveden v práci [25].



Obr. 4 Laserový „světelný list“ v protékaném prostoru



Obr. 5 Základní uspořádání PIV – 2 D



Obr. 6 Několikanásobný záznam pozic odrazných částic při obtékání spodní hrany tabule uzávěru

Při snímání posuvu částic ve světelném „noži“ dvojicí kamer lze s použitím pulzního laseru zajistit 3D analýzu rychlostí proudu.

#### **6.1.4 MĚŘENÍ TLAKŮ, SIL A MOMENTŮ**

V případech polohové stability prvků obtékaných proudem jsou sledovány zejména při inženýrských projektových potřebách zatěžovací charakteristiky.

Při současném pojetí experimentu jsou k tomuto účelu využívány snímače tlaků, sil a kroutících momentů s různými měřicími rozsahy a citlivostmi při odpovídajících možnostech frekvenční odezvy. Snímače včetně vyhodnocovacích jednotek se vyznačují velkou časovou stabilitou a snadnou kalibrovatelností.

Frekvenční odezva snímačů používaných v běžných rozsazích hydrotechnického výzkumu je řádu desítek Hz u aerodynamických tratí až stovek Hz.

Při sledování zvláště vysokých zátěžových pulsací, například sledování samobuzených kmitů při obtékání stavebních konstrukcí, bývají využity k danému účelu přizpůsobené vícesložkové váhy. Tyto váhy mohou být vybaveny citlivými snímači sil nebo přímo na konstrukci vah mohou být umístěny tenzometry. Tenzometrické snímače mohou být též uchyceny přímo na posuzované konstrukci, tato je využívána zejména u aerodynamických tratí a tunelů. Frekvenční odezva těchto snímačů je vlivem zanedbatelné hystereze řádu kHz.

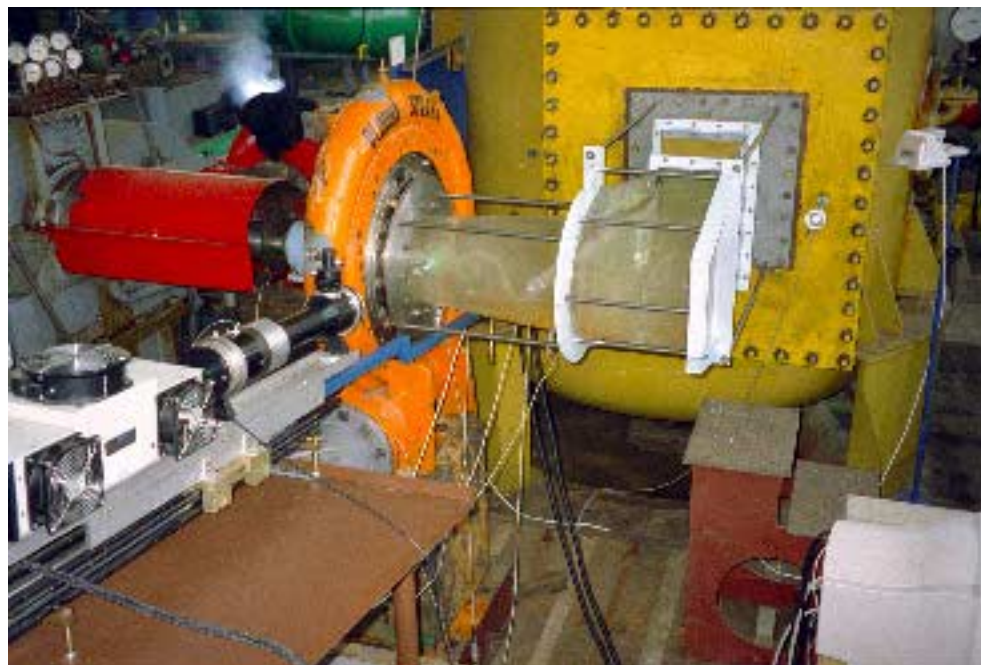
### **6.2 ROZVOJ A APLIKACE NOVÝCH MĚŘICÍCH METOD V HYDROMECHANICE**

Laboratorní měření parametrů proudění vyžaduje neustálé vyvíjení nových měřicích metod. Zejména oblast sledování mikrostruktury byla charakteristická miniaturizací měřicích čidel (žárová anemometrie – od roku 1960) až po vývoj bezkontaktní optoelektronické metody (laserová dopplerovská anemometrie (LDA) – 1970). Naše laboratoř vždy využívala zmíněných moderních metod. Velkou investicí (první v době pořízení v ČR a zemích bývalého „východního bloku“) byl integrální laserový anemometr (PIV) umožňující sledovat strukturu a časový vývoj proudění v měrné (světelné) rovině. Jak systémy laserové (LDA), tak integrální laserové (PIV) anemometrie, jsou neustále doplňovány a modernizovány. Díky zmíněným měřicím metodám byla úspěšně vyřešena řada úkolů od oblasti biomechaniky, stavebních konstrukcí až po oblast vodních strojů, viz. obr. 7,8,9,10. Měřicí systémy jsou využívány i v rámci společných úkolů aplikační sféry (ČBE, a.s. Blansko – vývoj turbín, Sigma – vývoj čerpadel) [9] až po úkoly základního výzkumného charakteru (granty MPO, GAČR – jejichž byl autor řešitelem) [36,37,38,39,40,41,42]. V tomto případě je vhodné uvést podíl našeho pracoviště při měření parametrů proudění ve vodních turbínách. Naše výsledky též přispěly k vynálezu vírové turbíny na FSI VUT v Brně. Laboratorní okruhy a naše moderní měřicí technika dala základ spolupráce s Českým metrologickým institutem (ČMI) při posuzování nových měřicích prvků rychlostí, hloubek a průtoků kapaliny. O posuzování nových výrobků je zájem i ze strany zahraničních výrobců a dovozců [47,48,50,51,52,53]. Pro pracoviště byla získána autorizace pro úřední měření rychlostí a průtoků tekutin. Na našem pracovišti je realizována praktická a teoretická odborná část zkoušek pro udělení osobních certifikátů úředního měřiče průtoků kapalin v otevřených korytech.

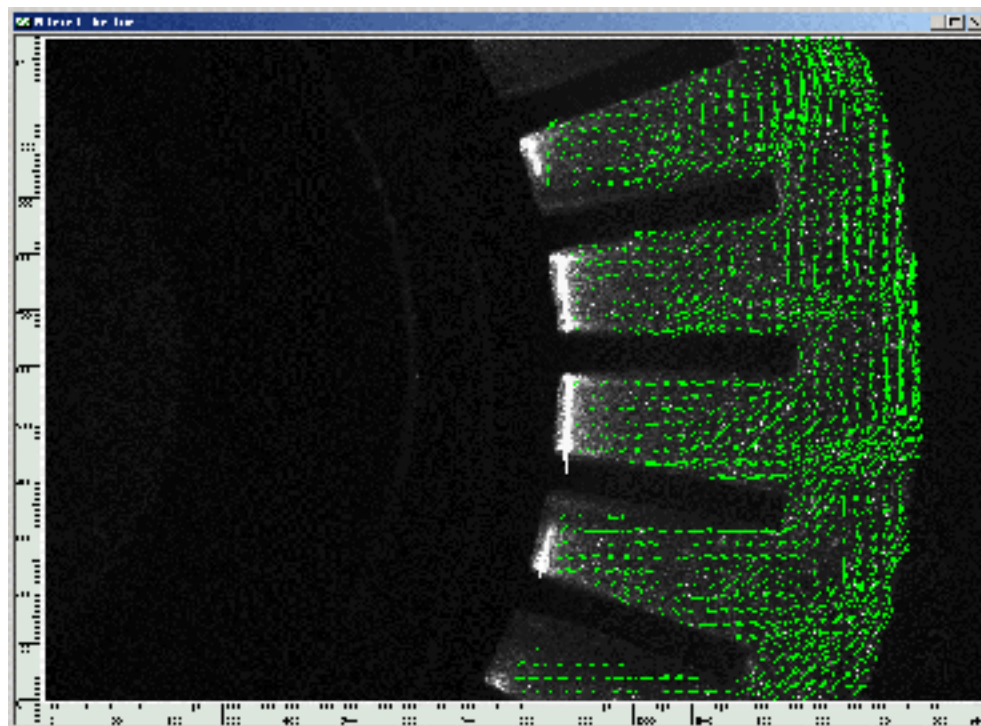
Díky špičkové laserové technice je naše pracoviště využíváno k realizaci mezilaboratorních porovnávacích zkoušek k akreditaci laboratoří pro kalibrace vodoměrných vrtulí.



**Obr. 7 Měření časového vývoje rychlostního pole za výstupem z čerpadla pro umělý krevní oběh (dialýzu) laserovým dopplerovským anemometrem**



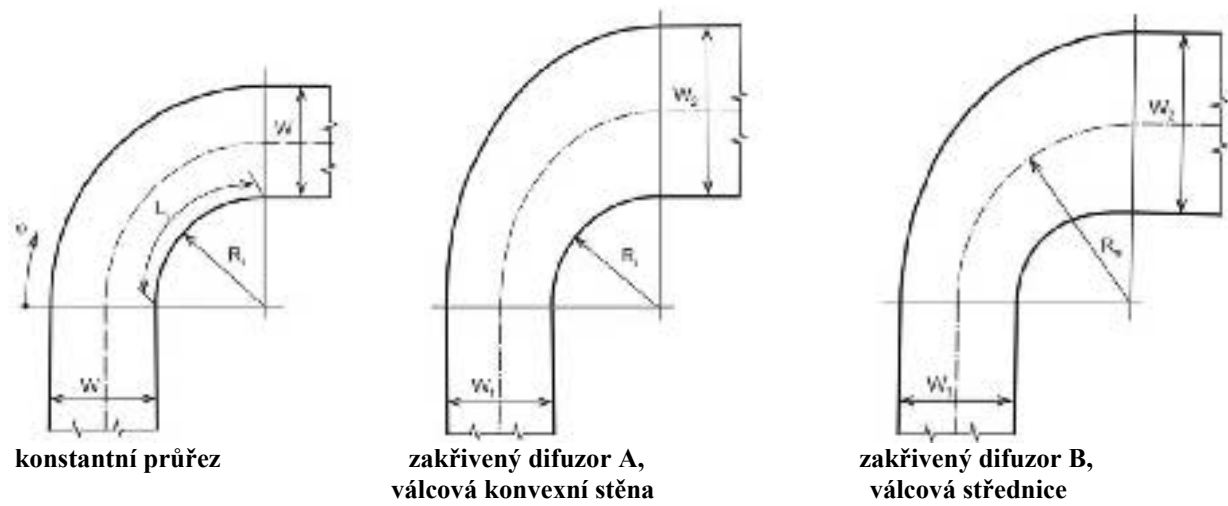
**Obr. 8 Měření časového vývoje rychlostního pole s vírovým „copem“ na výstupu z oběžného kola Francisovy turbíny laserovým dopplerovským anemometrem**



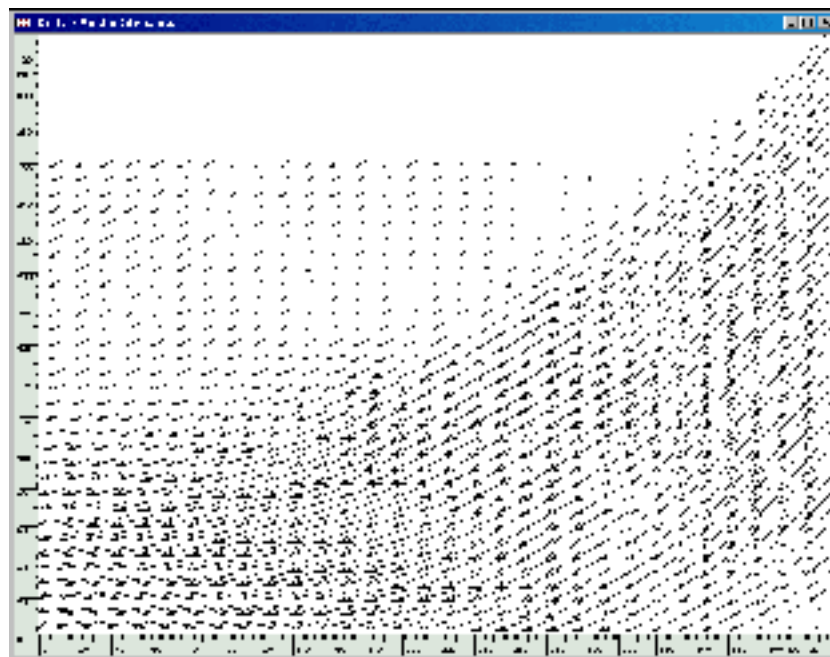
Obr. 9 Jeden okamžitý stav rychlostního pole mezi lopatkami oběžného kola čerpadla



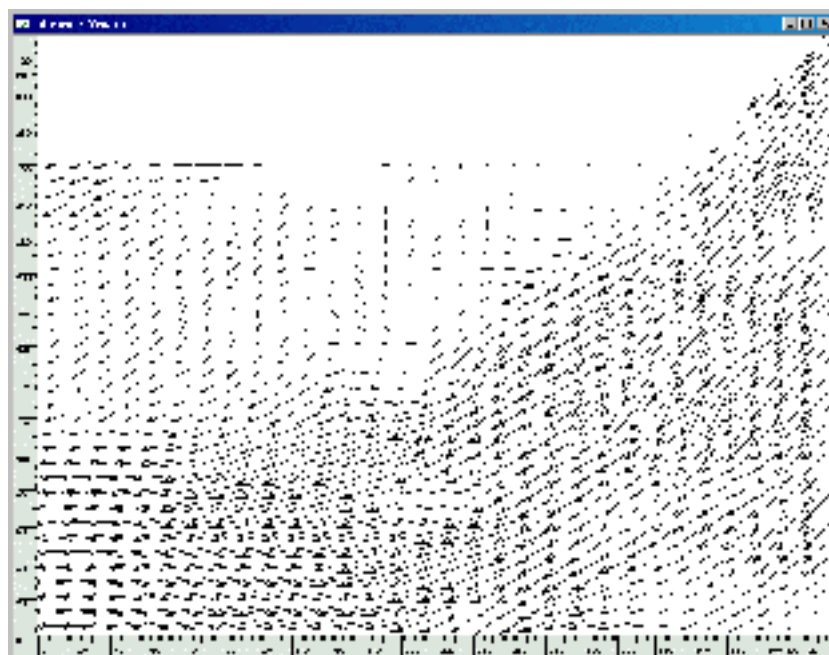
Obr. 10 Osvětlování měrné roviny kolmé na disk oběžného kola čerpadla, detail rychlostního pole na obr. 9



Obr. 11 Schémata zakřivených kanálů



Obr. 12 a) Rychlostní pole časově středních hodnot v rovině symetrie oblasti odtržení – difuzor A



Obr. 12 b) Rychlostní pole – okamžitý stav v rovině symetrie oblasti odtržení – difuzor A



### 6.3 ZKUŠEBNÍ TRATĚ PRO HYDROTECHNICKÝ VÝZKUM

Výzkum složitějších hydrodynamických poměrů v hydrotechnických objektech je v současnosti stále výhodné a mnohdy i jediné možné realizovat na modelech fyzikálních. V mnoha případech, kdy nelze dostatečně výstižně pro dokonalé poznání hydraulického jevu využít ani fyzikálního modelu, je nutné realizovat výzkum přímo na díle (prototypu).

Pro hydrotechnický výzkum bývají k tomuto účelu využity hydraulické zkušební žlaby nebo hydraulické případně aerodynamické okruhy tlakové (podtlakové).

Automatizaci pohybu sond umožnila miniaturizace jejich rozměrů a vývoj krokových motorů. O masovém rozvoji automatizace pohybu sond lze hovořit zejména u žárových systémů.

Při potřebě detailního stanovení proudových poměrů v prvcích hydraulických tlakových okruhů je měření prováděno až ve stovkách měrných bodů v daném vztažném profilu, obr.16,17. Dokonce výjimečně ve výstupních profilech z difuzorových prvků bylo v naší laboratoři na aerodynamické trati využito přes tisíc měrných bodů v obdélníkovém průřezu [31,32,33].

K danému účelu jsou využívány  $x, y$  souřadnicové systémy (úplný pohyb v rovině) a  $x, \varphi$  systémy (úplný pohyb v kruhovém rovinném profilu) vybavené dvojicí počítačem řízených krokových motorů. Sledovaným způsobem je dokonce realizován pohyb optického systému LDA za účelem přemísťování pozic „bodů“ proniku svazků laseru v zájmovém prostoru (prostředí vyžaduje realizovat vstupy přes planparalelní skla). Tento přesný a rychlý způsob přemísťování měrného bodu v měrném profilu u LDA systému je využíván i u měření externích (u zákazníků – např. hydroenergetické okruhy), obr. 8.

Řízení posuvu hydrometrické vrtule krokovým motorem bývá využito i při realizaci přesného autorizovaného měření v náročných podmínkách čistíren odpadních vod a kanalizačních systémů s často silně nestacionárním a těžko stabilizovatelným charakterem proudění.

Krokové motory jsou také využívány k přepínání (propojování) odběrných tlakových míst s tlakovým snímačem (stovky až tisíce tlakových hodnot bývá měřeno při použití pětiotvorové sondy v běžném měrném profilu při aerodynamickém výzkumu).

Mimo vlastního pohybu sondy je možné využít krokových motorů s náležitými převodovými úpravami k ovládní polohy sledovaného (zkoumaného) hydrotechnického prvku. Této možnosti je využíváno nejčastěji při výzkumu pohyblivých uzávěrových a hradicích konstrukcí zejména při sledování nestacionárních stavů.

Počítačem řízený proces pohybu různých technologických prvků včetně prvků rotačních (např. rotory vodních strojů) lze s výhodou realizovat výše uvedeným způsobem. Pro zajišťování požadovaných otáček elektromotorů se využívá frekvenční regulace.

V současné době vybudovalo naše pracoviště novou hydraulickou laboratoř orientovanou převážně na modelování o volné hladině. Nová hydraulická laboratoř byla projektově řešena od roku 2000, výstavba byla realizována v rekonstruovaném objektu bývalé zkušebny leteckých motorů v areálu Fakulty stavební VUT v Brně – Veveří – Žižkova. Výstavba stavební části trvala neobvykle krátkou dobu – od března do října 2003, některé úpravy technologické a elektronické řídicí části byly realizovány v roce 2004. Přemístěním dvou sklopných prosklených žlabů šířky 0,4 m a 2,5 m ze zrušených laboratoří v Kníničkách zůstaly tyto unikátní konstrukce využity pro další účely. Laboratoř je vybavena řízením



**Obr. 13** Protiproudňí pohled na VD Znojmo a jeho model v hydraulickém zkušebním žlabu

s úplnou automatizací provozu. Řízení je možné realizovat z řídicího počítače na velínu případně na dálku i z kancelářských prostor výzkumníků. Hladinové a průtokové poměry jsou monitorovány bezkontaktními způsoby. Laboratoř umožňuje provoz v režimu tlakovém i o volné hladině. Přesné stanovení hloubek i průtoků je navázáno na etalon vyhodnocované jednotky, tato skutečnost umožňuje garanci výsledků z metrologického hlediska. Vzhledem k definovaným proudovým podmínkám jsou žlaby laboratoře využívány k metrologickým zkouškám nových typů měřidel rychlostí, hloubek a průtoků. Jedná se v současné době o nejmodernější laboratoř proudu zkoušení hydraulických jevů o volné hladině v naší republice [26].

## **7 UKÁZKY Z MODELOVÉHO VÝZKUMU STRUKTURY PROUDU U SLOŽITÝCH HYDRAULICKÝCH OBJEKTŮ**

Mnoho protékanych nebo obtékaných tvarově složitých objektů způsobujících složitý mechanismus proudění lze zařadit v současné době do skupiny případů výhradně analyzovatelných fyzikálním modelováním. Pro názornost uvedeme některé charakteristické příklady výzkumů, které byly v této oblasti na našem pracovišti provedeny.

### **7.1 AERODYNAMICKÉ MODELOVÁNÍ HYDRAULICKÝCH JEVŮ**

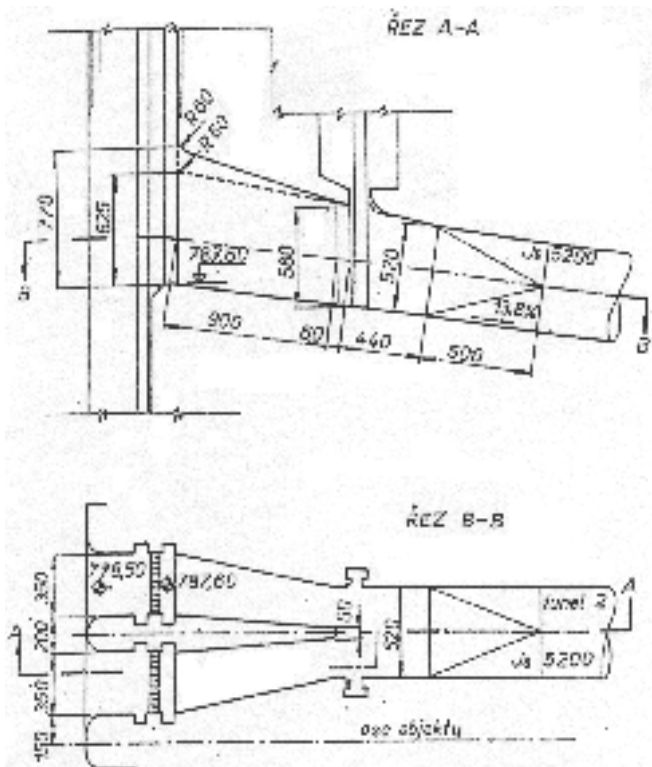
Přesné měření strukturálních parametrů proudu včetně tlakových charakteristik je u objektů provozovaných v tlakové (podtlakové) oblasti proveditelné na aerodynamických modelech, které lépe umožňují automatizovat měřicí proces při využití miniaturních sond bez vysokých nároků na vstupní otvory nosičů čidel.

Tímto způsobem, využívajícím aerodynamického modelování s plně automatizovaným procesem měření a vyhodnocení veličin, byly testovány a tvarově optimalizovány prvky pro změny směru (oblouky, odbočnice, okružní potrubí Peltonových turbín), vstupní části hydrotechnických okruhů, turbín a čerpadel, difuzorové objekty na výtocích z potrubí a vodních strojů (savky). Měrné (modelové) profily kruhové mívajjí zpravidla průměry  $d = (120 \div 250)$  mm, pravoúhlé bývají rozměrů až  $(550 \times 550)$  mm – tyto možnosti poskytují např. traverzační systémy naší laboratoře.

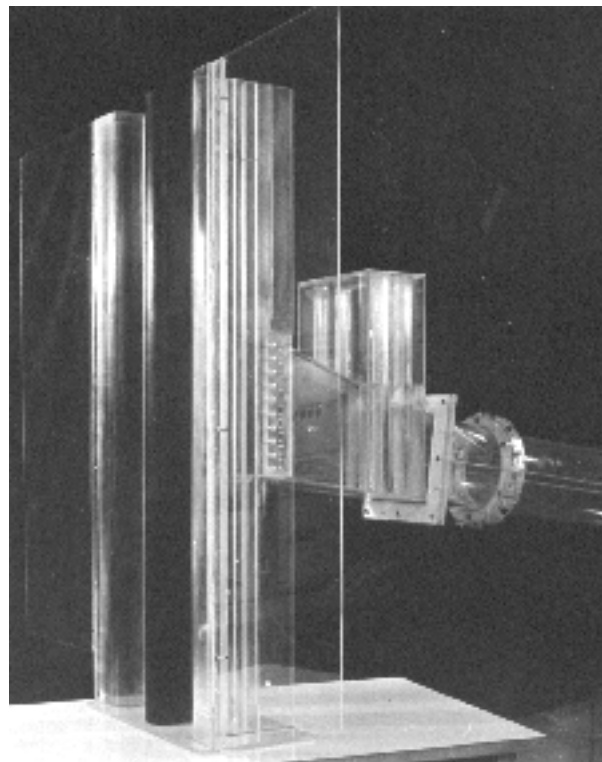
Na obr.17 je patrný model části šestidýzového okružního potrubí pro napájení vysokospádové Peltonovy turbíny [63].

Na aerodynamických tratích je výhodné realizovat automatizované měření parametrů proudu složitějších odbočnic, kde je vždy zpravidla vyžadován kompromis tvarový, cenový i energetický. Důležité hledisko při nalézání vhodné alternativy je i bezpečnostní, které vyžaduje odstranění či maximální potlačení tlakových a průtokových nestabilit v návaznosti na pohyblivé části okruhu (uzávěry, vodní stroje). Ukázky modelů odbočnic pro hydraulické okruhy VD Marun v Iránu jsou na obr.18 [60].

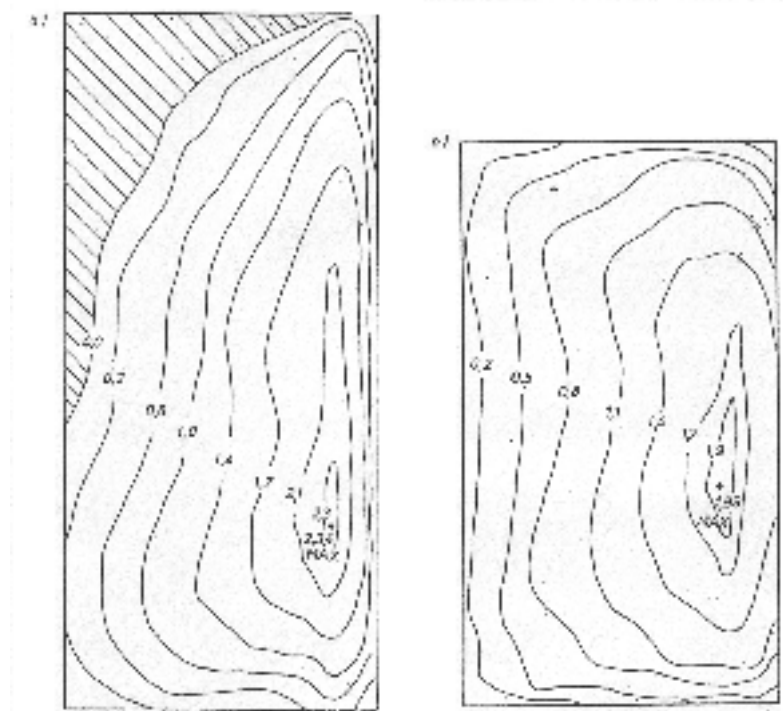
Poměrně rozsáhlý výzkum byl věnován difuzorovým objektům z hlediska stability proudění, energetické účinnosti a jejich tvarového zjednodušení. Automatizovaný proces měření umožnil rozbor struktury proudu (včetně dynamiky) až po definici základních doporučujících kritérií difuzornosti pro daný typ objektu. Právě vystižení kritického stupně (úhlu) difuzornosti určuje mezní rozšíření objektu s maximální energetickou účinností. Překročení této meze vede k zvláštním „bistabilním“, pro provoz nebezpečným proudovým poměrům [2,64,65,66,67]. Tímto postupem byly upravovány tvary reverzních vtoků přecherpacích vodních elektráren Dlouhé Stráně a Dalešice, viz obr. 14,15,16.



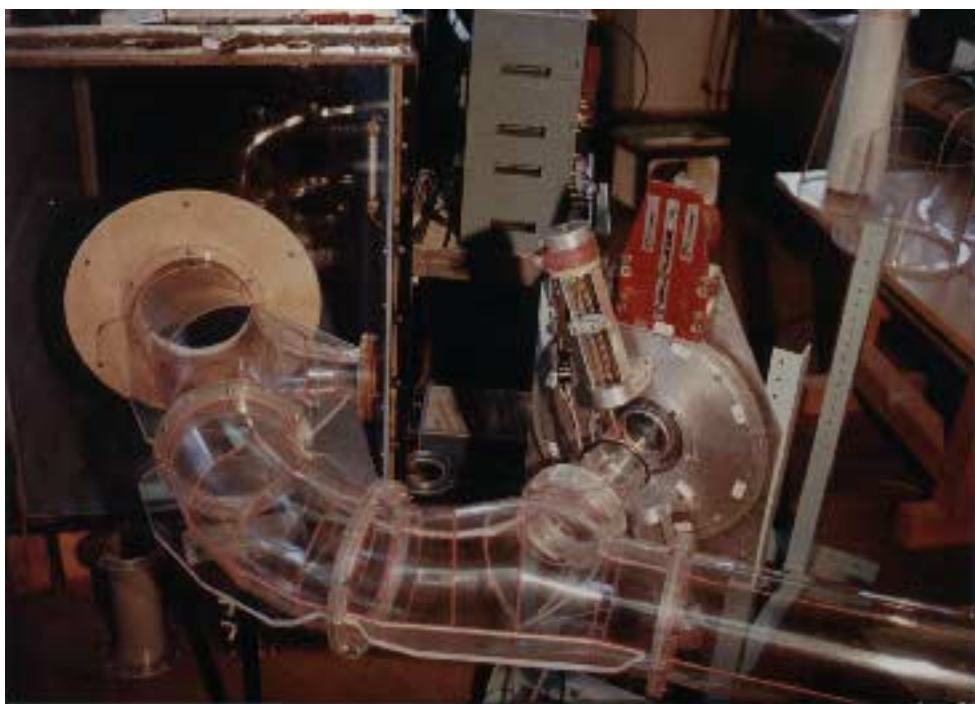
Obr. 14 Reverzní výtokový objekt dolní nádrže PVE Dlouhé stráně (část sduženého objektu). Čárkovane je proveden tvar doporučené úpravy. Kotv uvedeny v cm.



Obr. 15 Pohled na aerodynamický model výtokového objektu PVE Dlouhé Stráně



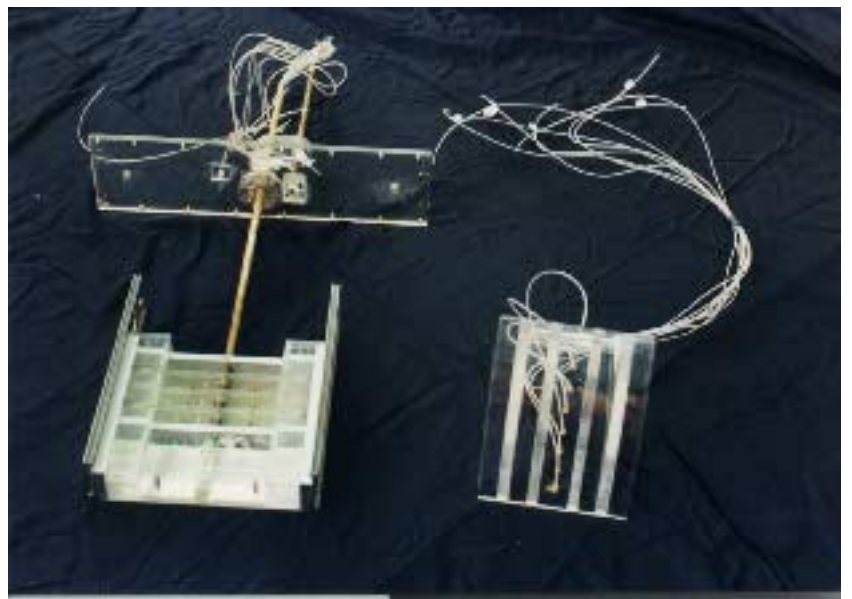
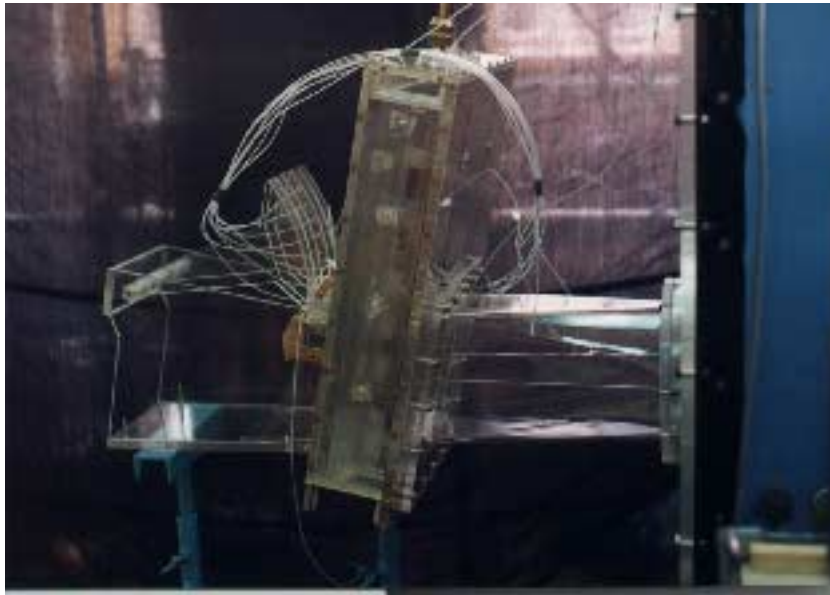
Obr. 16 Izolinie relativních rychlostí v profilu česlí při turbinovém režimu. Rychlosti jsou vztaženy k průřezové rychlosti. Vzhledem k symetrii znázorněno jednoho pole: a) původní návrh, b) doporučená úprava



**Obr. 17** Výzkum proudění v profilech šestidýzového okružního potrubí Peltonovy turbíny – zkoušky na aerodynamické trati s úplnou automatizací pohybu sondy



**Obr. 18** Výzkum proudových poměrů v systému odbočnic na odtoku z VD Marun v Iránské republice – aerodynamický model



**Obr. 19 Stanovení přitěžovacích sil a tlakových poměrů na uzávěrech spodní výpusti VD Marun v Iránské republice – výzkum na aerodynamickém modelu se snímáním tlaků v charakteristických bodech**

Aerodynamické modelování je také využíváno ke zkouškám uzávěrů. Součástí testů je též měření tlaků (včetně pulzací) k určení tlakových nebo zatěžovacích charakteristik. Tlaky je možné měřit i v oblastech s očekávatelným vznikem kavitace (drážky, hrany, ohyby). Na základě zpracovaných systematických zkoušek byla vypracována metodika výpočtu přitěžovacích sil na tabulové uzávěry. Byl vytvořen a ověřen model proudění (pro tabule s těsněním „po vodě“) [59,60,61,62], který vykazuje v oblasti zatěžovacích maxim dobrou shodu s výsledky fyzikálních modelů (vodních i aerodynamických) a s realitou. Touto metodou byla navrhována a posuzována řada bezpečnostních a provozních uzávěrů důležitých hydroenergetických okruhů u nás i v zahraničí (např. VD Marun a VD Alavian v Íránské republice), obr.19.

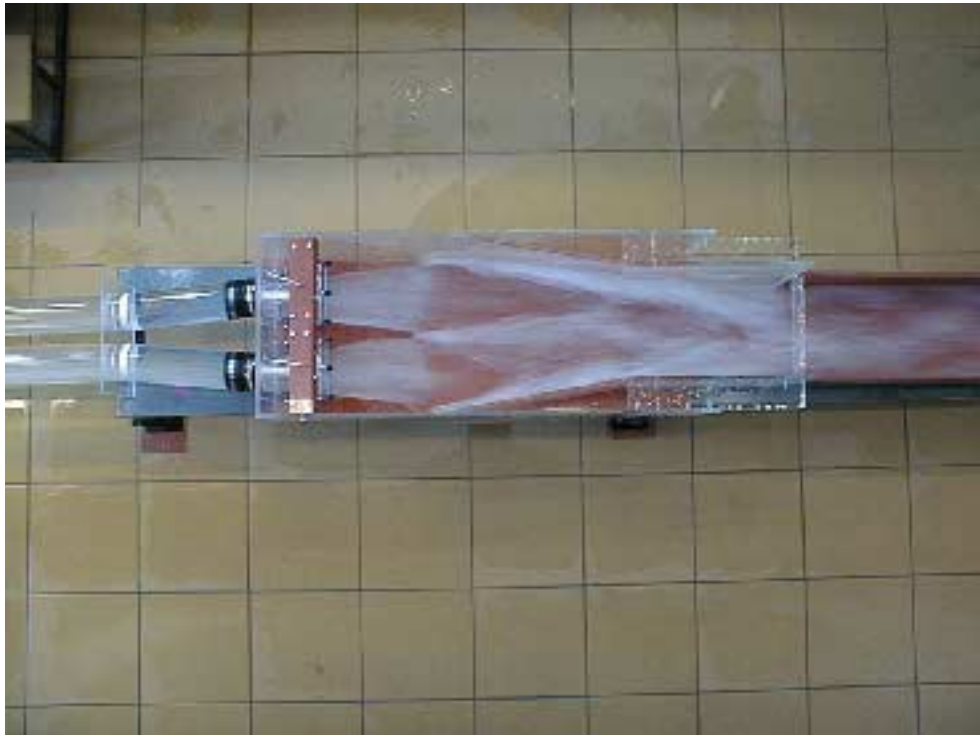
V závěru 80.let minulého století byla mým podstatným přispěním metoda aerodynamického modelování rozvinuta a ověřena i pro dosud neužívané modelování procesů s pohyblivým říčním dnem (štěrky). Využití se s výhodou použilo při prověřování pracovních postupů s nasazenou obtékanou stavební jímkou na dně Dunaje při průchodu zvýšených průtoků. Aerodynamické modelování podstatně zrychlilo proces zkoušek a umožnilo snadněji nalézt optimální snížení deformací dna v okolí jímky při ohrožení její stability [68,69].

## 7.2 PŘÍKLADY VYUŽITÍ HYDRAULICKÝCH MODELŮ PRO TVAROVOU OPTIMALIZACI OBJEKTŮ

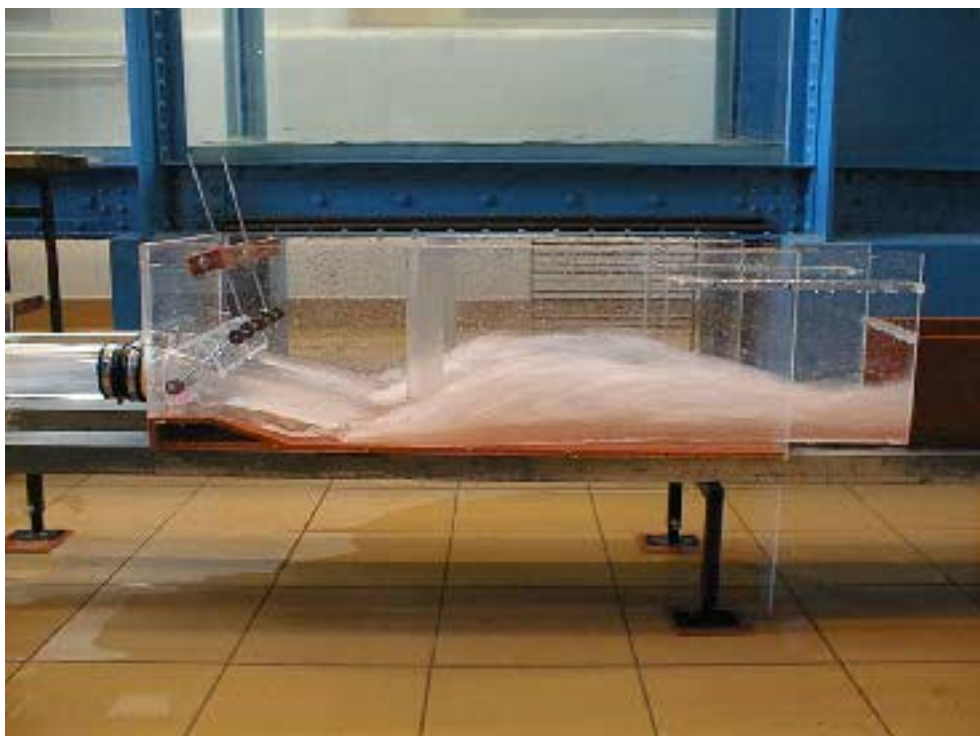
Stále detailnější pohled do struktury vyžadují též proudění dvou i vícefázového charakteru. V hydrotechnické praxi se nejčastěji jedná o sledování pohybu plavenin a splavenin ve vodních tocích při usazovacích a vymílacích procesech. Rovněž hladinové deformace proudu, doprovázené mnohdy intenzivními vírovými strukturami a pohlčováním vzduchu, jsou odstranitelné s využitím modelových zkoušek. Nebezpečí vzniku stavu nasycené páry případně kavitační destrukce obtékaného povrchu je identifikovatelné detailním rozбором proudění v zájmovém prostoru.

V případech, kdy požadujeme v souladu s následky povodňových událostí bezpečné „předpouštění“ prostoru nádrže, instalujeme na stávající výstup uzávěr se zvýšenou průtočnou kapacitou. Rovněž při zaústění bezpečnostních přelivů do prostoru kryté odpadní štolou se zvýšením kapacity přelivu nedá bez odstranění nebezpečí jejího zahlcení dosáhnout. Jako výsledek mnoha modelových zkoušek přelivů a koncových uzávěrů bylo navrženo, modelově vyzkoušeno a provozními zkouškami potvrzeno několik typů usměrňovacích elementů vhodných pro konkrétní řešení. Vyvinuté usměrňovací elementy zajišťují jednoduchost montáže (i dodatečné), výrobní nenáročnost a ekonomickou efektivnost. Tyto usměrňovací elementy byly realizovány nejprve v počátečním úseku odpadní štolu dolní nádrže VD Dlouhé Stráně, později při rekonstrukci spodních výpustí VD Souš, obr.20. Druhým typem je usměrňovač proudu používaný za rozstřikovacími uzávěry ve stabilním nebo mobilním provedení. Stabilní usměrňovač je využit na VD Morávka [70,71,72,73] jako součást komory dvojice uzávěrů a na VD Bystřička při současně probíhající rekonstrukci spodní výpusti. Mobilní element, jako součást pohyblivého regulačního uzávěru, je využit na rekonstruované výpusti VD Mostiště. Veškerá zde uváděná řešení byla ověřena v rámci provozních zkoušek na dílech, jejichž součástí bylo i potvrzení průtočné kapacity a zajištění dostatečného množství vzduchu přísávaného proudem vody do štol.

V předpolí vtoku do hydraulického (zejména tlakového) okruhu dochází při určitých nízkých polohách hladiny ke vzniku vtokových vírů. Tyto víry mají svá charakteristická stádia. Zvláště nebezpečná pro provoz okruhu s vodním strojem (turbínou nebo čerpadlem) jsou stadia neúplného a úplného hladinového víru, při nichž dochází ke vtahování a transportu vzduchu proudem. Vzduch je zdrojem snížení energetické účinnosti stroje a zvýšení provozní nespolehlivosti (tlakové, rychlostní pulzace). Při výskytu plovoucího ledu bývají víry zdrojem



100 % symetrické otevření obou výustí,  $Q = 20,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (přepočet na dílo), křížové vlny



Symetrické 100 % otevření  $Q = 20,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (přepočet na dílo),

Obr. 20 Usměrnění paprsků vytékajících ze segmentových spodních výpustí VD Souš - model



jeho vtažení pod hladinu. Výzkum vírových jevů byl systematicky několik let prováděn na modelech vtokových objektů definovaných geometrií při konkrétních proudových podmínkách. Modelovost jevu byla potvrzena pro určité meze zmenšení, pro přepočít bylo potvrzeno použití Froudeova kritéria modelové podobnosti [74,76]. Oproti dosavadní nejednotnosti názorů na možnost modelového přepočtu jsem definoval postupy přepočtu a definice kritérií pro kritické hloubky ponoru vtoku podložených porovnáními na prototypch či skutečných objektech. V dnešní době při rozvoji nízkospádových vodních turbín jsou využívány výsledky zpracované pro návrhy ponorů vtoků i kašnových turbín [74,75,80]. V rámci experimentů byla vyvinuta řada konstrukcí a metod pro potlačení či odstranění vlivu hladinových vírů. Výsledky byly a stále jsou aplikovány při řešení předpolí vtokových objektů VE. Aplikaci těchto výsledků byly odstraněny provozní nespolehlivosti okruhů důležitých vodních elektráren (např. PVE Štěchovice) [82,83]. Zvláštním způsobem byly uplatněny výsledky při úpravách hydraulického napájecího okruhu TE Mělník (blok 500 MW). Navržená úprava nátoku při provozní teplotě média 150°C odstranila „výpadky“ při nutných průtokových manipulacích, což byla jedna z podmínek pro propojení naší energetické sítě s energetickým společenstvím UCPTÉ [81].

Převádění zvýšených návrhových i kontrolních průtoků (extrémní povodňové průtoky nízké periodicity výskytu) bylo sledováno na řadě dílčích modelových výzkumů. Komplexní výzkum přelivu, hradicí konstrukce a vývaru byl realizován na modelu VD Znojmo [86,87], výsledky úprav jsou nyní na objektu realizovány, viz obr. 13.

Plovoucí pontonové mostové soupravy jsou moderním prvkem využívaným ve vojenské dopravě i v případech krizových situací k přemostění toků. Tyto typy mostů byly vyvíjeny a využívány pro určité omezené proudové a zátěžové podmínky. Požadavek na rozšíření oblasti využitelnosti v rychlých proudch s relativně menší hloubkou případně i v proudch nadkritického charakteru vzešel ze strategických požadavků. Rozsáhlý výzkum při definovaných hydraulických podmínkách byl realizován v hydraulických žlabech naší laboratoře. Do roku 1985 nebylo ve vojenské praxi konkrétní uspokojivé řešení zvýšení stability plovoucích mostů nalezeno. Výzkumem bylo definováno tvarové uspořádání štítů umístěných na přídi případně i zádi konstrukce. Výsledky řešení výrazně rozšířily možnost využitelnosti až do rychlostí proudu  $4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , což je využitelné zejména při povodňových situacích. Výsledky práce, v dané době utajené, byly publikovány v Knižnici vědeckých spisů VA [84,85].

Od roku 1994 je sledován vývoj vhodných vestavbových prvků pro přesné a spolehlivé stanovení průtoků. Prvky byly vytvořeny s přihlédnutím k montážní a provozní jednoduchosti při provozu v čisté i extrémně znečištěné vodě. Je vytvořeno několik typů vestavbových stabilních nebo mobilních systémů s modelově potvrzenými Q/H charakteristikami. Mimo tyto typizované konstrukce s možností modelového přepočtu tvarů a průtoků je rozšířena metodika návrhů objektů pro zcela atypické geometrické i proudové podmínky. Tyto jsou například využívány ve stísněných podmínkách injekčních a revizních štol přehradních hrází pro sledování průsaků. Jako příklady lze uvést VD Morávka, Šance, Bystřička, Lipno. Současně s vývojem nových vestavbových prvků je vytvořen systém úprav stávajících vestavbových žlabů (Venturiho či Parshallův) pro podmínky přesné měřitelnosti i v oblastech nižších průtoků nežli garantuje výrobce. Vestavbové mobilní prvky do kanalizačních systémů umožňují provádět týdenní měření proteklých objemů jako podklad pro stanovení poplatků za vypouštění odpadních vod a monitorovací účely pro projektování nových sítí. Prvky jsou vyvíjeny v systematických modelových řadách, kde potřebné hydraulické charakteristiky jsou získány přepočty z měření na hydraulických žlabech laboratoře. Laboratorní zkoušky včetně následných zkoušek provozních umožnily vyvinout i řadu vestaveb do kanálů se značným transportem splavenin a plovoucích předmětů vodním

proudem. Vyvinutý systém vestaveb je úspěšně aplikován v měrných profilech u řady odběratelů a znečišťovatelů vod případně provozovatelů vodních toků [49,54,55,56,57,58].

## 8 MĚŘENÍ NA HYDROTECHNICKÝCH DÍLECH

Při fyzikálním modelování využíváme zpravidla takového kritéria podobnosti, které zaručuje zachování vazby mezi dominující silou ovlivňující proud a silou setrvačnosti pro model a dílo. Jestliže toto jednoznačné kritérium nelze v celém provozním rozsahu díla nalézt, je nutné provádět zkoušky na modelu v omezeném provozním rozsahu. Pokud u hydrodynamického jevu jsou dominantní hodnotově srovnatelné dvě případně i více sil (hladinové vírové jevy u vtoků s působením sil gravitačních, povrchového napětí i tření), je nutné realizovat několik zmenšených modelů s různými měřítky podobnosti pro prokázání spolehlivých přepočtových zásad. Ve zvlášť složitých případech je pak nutné realizovat experimentální měření na vlastním objektu [45,46].

Výhradně na dílech jsou realizována měření účinnostní u hydroenergetických strojů (garanční měření), kapacitní u uzávěrů okruhů (pokud dodavatel a odběratel neodsouhlasí jinou metodu prokázání kapacity nebo ztráty mechanické energie). Rovněž přímo na dílech jsou realizována měření místních tlakových extrémů včetně rozboru dynamických charakteristik u kavitačních jevů a havárií pohyblivých částí konstrukcí.

Měření garanční, arbitrážní (při sporu dvou nebo více stran), kontrolní pro orgány státní správy nebo kalibrační pro potvrzení správnosti a funkčnosti pracovního měřidla v souladu se zákonem č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů je nutno realizovat pouze úředním postupem. Tento úřední postup vyžaduje „úřední měření“.

Při této příležitosti je vhodné uvést, že k úřednímu měření jsou užívány postupy a spolehlivá technika, která garantuje zachování přenesené hodnoty z etalonu měřené veličiny v rámci uvedené přesnosti. K úřednímu úkonu je naší laboratoří využívána vodoměrná vrtule i LDA.

## 9 ZÁVĚR

Úloha fyzikálního modelování doplněného přesným měřením charakteristik proudění při výzkumu složitých hydrotechnických objektů je v převážné míře dosud nezastupitelná. Dnešní doba je současně charakteristická rozvojem a ověřováním matematických modelů simulujících složité proudové podmínky s odtržením mezní vrstvy od obtékaného povrchu a tvorbou výrazných vírových struktur. Modely, založené v převážné míře na řešení Navier-Stokesových rovnic, lze v současných ověřovacích fázích charakterizovat vyhledáváním vlivu kinematické viskozity na proudění zejména s turbulentním režimem pro charakteristické případy obtékaných tvarů. Tvorba a ověření modelů turbulence jsou předmětem mnoha současně řešených projektů základního výzkumu u nás i v zahraničí do nichž je zapojena i naše laboratoř [36,37,38,39,40,41,42].

Fyzikální modely, doprovázené přesným měřením stavových veličin, budou v budoucnu stále využívány pro speciální účely zejména kalibračního typu. Lze očekávat také kalibraci modelů proudění neneutonských kapalin, dvou a vícefázových struktur.

Dlouhodobá systematická spolupráce laboratoří s ČMI umožňuje garantovat vysokou úroveň a spolehlivost vyvíjené měřicí techniky v oblasti stanovených i pracovních měřidel včetně nových odpovídajících měřicích a vyhodnocovacích postupů [44,47,48,50,51].

Prověřování nových měřidel v laboratorních a následně „polních“ podmínkách autorizovaným subjektem se špičkovým laboratorním vybavením umožňuje realizovat nejnáročnější zkoušky pro vydání „Certifikátu o schválení typu měřidla“ [52,53].

Nedílnou součástí moderních postupů a měřicí praxe v autorizovaném či akreditovaném pojetí musí být ve vysokoškolských laboratořích i školicí činnost v dané oblasti [44,88]. V naší laboratoři, která je autorizovaným subjektem pro oblast měření průtoků a proteklého objemu, probíhají již od roku 1997 výše uvedené technické zkoušky nových druhů měřidel, školicí činnost pro nové úřední měřiče a odborná část autorizačních zkoušek. Dva pracovníci laboratoře jsou členy certifikačního orgánu ČMI v oboru měření průtoku tekutin.

Unikátní vybavení špičkovou měřicí a vyhodnocovací technikou kontaktního i bezkontaktního typu a tým zkušených pracovníků laboratoře vyvolává rozšíření pracovních aktivit v oblasti měření hydraulických veličin. Již dnes jsou měření vybraných hydraulických veličin námi prováděna v oblastech hydroenergetických strojů, biomedicínské praxe, zemědělství, chemického, automobilního průmyslu a inženýrského stavitelství, viz obr. 7,8,9,10.

Pro důležité úkoly charakteru základního i aplikovaného výzkumu v uvedených oblastech budou vznikat dočasné týmy složené z odborníků více různých profesí. Součástí těchto týmů budou v mnoha případech i odborníci na problematiku měření, jejichž postavení může být navíc akcentováno autorizací či akreditací mateřských organizací a personální certifikací dle zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů.

## 10 POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA

- [1] Adrian,R.J.: Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. Annu. Rev. Fluid Mech., 1991, 23, str. 261-304
- [2] Albring, W.: Angewandte Strömungslehre. Theodor Steinkopf Verlag, Dresden, 1970
- [3] Boor,B. a kol.: Hydraulika pro hospodářské stavby. SNTL Praha, 1968
- [4] Daněk,M.: Vliv stlačitelnosti při aerodynamickém modelování hydrodynamických procesů. Závěrečná zpráva základního výzkumu, VUT v Brně, 1983
- [5] Durst,F.; Melling, A.; Whitelaw,J.H.: Principles and practice od Laser Doppler Anemometry. Academic Press Ltd., London, 1981
- [6] Durst, F ; Rastogi, A.K.: Theoretical and experimental investigations of turbulent flow with separation, Turbulent shear flows I. Springer Verlag, Heidelberg, 1979
- [7] Fargue,L.: La forme du lit des reviere à fond mobile. Gauthier Villars, Paris, 1908
- [8] Gray, C. a kol.: An analysis of the scanning beam PIV illumination system. Meas. Sci, Technol., 1991, str. 717 – 724
- [9] Haluza,M.; Zubík, P.: Měření LDA za oběžným kolem vírové turbíny. Sborník z konference „Aktuální problémy mechaniky tekutin 2001“, Ústav termomechaniky AV ČR, 2001, str. 49-52, ISBN 80-85918-62-5
- [10] Host-Madsen, A. a kol.: On the accuracy and Reliability of PIV Measurements. 7<sup>th</sup> International Symposium on applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisabon 1994, str. 214 – 226
- [11] Hwang, R.R.; Peng, Y.F.: Computation of backward-facing step flows by a second-order Reynolds stress closure model. Int. Jour. Numerical Methods in Fluids, 21 (3), 1995, str. 223 – 235
- [12] Keane,R.D.; Adrian, R.J.: Theory of cross-correlation analysis of PIV images. Applied Scientific Research 49, 1992, p. 191-215
- [13] Kratochvíl, J. ; Ženíšek, A.: Algoritmus řešení dvojrozměrného okrajového problému nevířivého proudění stlačitelné tekutiny metodou konečných prvků. Vodohosp. časopis 25, 1977, č.4

- [14] Kratochvíl, J.; Růžičková, H.: Numerické řešení Navier-Stokesových rovnic kombinací metody charakteristik a metody konečných prvků. Vodohospodářský časopis, 35, 1987, č.5, str. 571-583
- [15] Lauder, B.E.: Progress in the modelling of turbulent transport. Lecture Series 76, von Kámán Institut, 1975
- [16] Leschziner, M.A; Rodi, W.: Calculation of strongly curved open channel flow. J. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 105, No.HY 10, 1979, str. 1297 – 1314
- [17] Lien, F.S; Leschziner, M.A.: Assessment of turbulent-transport models including nonlinear RNG eddy-viscosity formulation and second-moment closure for flow over backward-facing step. Comput. Fluids, 23,8, 1994, str. 983 – 1004
- [18] Mazur, O. a kol.: Temperature correction for a hot wire concentration measurements in a gas mixture. Inženýrská mechanika 2005, str. 221 – 222 (plný text CD), ISBN: 80-85918-93-5
- [19] Novák, P.; Čábelka, J.: Hydraulic Engineering. Pitman Press, London, 1981
- [20] Příhoda, J.; Vogel, J.: Turbulent flow in the inlet region of pipes with various wall roughness. Engineering Mechanics, Vol.2, No.6, 1995, str. 381 – 390
- [21] Rodi, W.: Turbulence models and their application in hydraulics. International Association for hydraulic research, state-of-the-art paper, Delft, 1980
- [22] Sharp, J.J.: Hydraulic Modeling. Butterworth, London, 1981
- [23] Skalička, J.: Teorie a aplikace aerodynamických modelů pro studium ustáleného tlakového proudění kapaliny. Vodní hospodářství č.2, 1962
- [24] Smrček, M.: Antonín Smrček – život a dílo. Nakladatelství VUT v Brně, 1999, ISBN 80-214-0392-6
- [25] Zubík, P.: Aplikace měřicí metody PIV. XII. Mezinárodní konference „Aplikácia experimentálnych a numerických metod v mechanike tekutin“, Rájecké Teplice, 2000, str. 246 – 251, ISBN 80-7100-717-5
- [26] Žoužela, M.: Výstavba a provoz nové laboratoře Ústavu vodních staveb. Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně, sešit 4, ECON publishing, s.r.o., 2003, ISBN 80-86433-26-9, str. 341-350

#### **Firemní internetové stránky**

- [27] <http://www.dantecmt.com>
- [28] <http://www.met-flow.com>
- [29] <http://www.dantecdynamics.com>
- [30] <http://www.aeroprobe.com>

#### **PUBLIKACE AUTORA SOUVISEJÍCÍ S UVEDENOU PROBLEMATIKOU (VÝBĚR Z 208 PUBLIKACÍ)**

- [31] Šulc, J.: Vlastnosti systému žárové anemometrie pro měření směrů vektorů rychlosti proudu vzduchu. Jemná mechanika a optika, č. 10, 1984, str. 273 – 277
- [32] Šulc, J.: Experimental research of profile cascade flow. Sborník HYDROTURBO 85, Dům techniky ČSVTS Ostrava, 1985, str. 289-298
- [33] Šulc, J.: Poznatky z automatizovaného měření charakteristik proudu na aerodynamických modelech. Jemná mechanika a optika, 6/1987, str. 181-185
- [34] Šulc, J.: Využití LDA při modelování procesů s volnou hladinou v hydrotechnice. Sborník 13. symposia o anemometrii, Holaný, 1994, str. 32 – 37
- [35] Šulc, J.: Ultrazvukové metody měření SOVAK, č.2, 1997, str. 19-20

- [36] Zubík,P. ; Šulc, J.: The measurement of flow parameters in square cross section bend. Sborník Engineering Mechanics 2003, Ústav pro teoretickou a aplikovanou mechaniku AVČR, Svratka 2003, str. 410-411, CD str. 153, ISBN 80-86246-18-3
- [37] Šulc, J.; Zubík, P.: Měření proudění v kanálových obloucích pravoúhlých průřezů. Sborník XIV. mezinárodní konference Aplikácia experimentálnych a numerických metod v mechanike tekutín, ŽU Žilina, 2004, str. 263 – 268, ISBN 80-8070-234-9
- [38] Šulc, J.; Lichtneger,P.; Zubík, P.: Flow parameters measurement in the channel with the negative step. Sborník Engineering Mechanics 2004, Ústav termomechaniky AV ČR Praha, 2004, str. 289 – 290, (úplný text CD), ISBN 80-85918-88-9
- [39] Zubík, P.; Šulc, J.: Flow parameters measurement in the curved diffuser of the rectangular cross – section. Sborník Engineering Mechanics 2004, Ústav termomechaniky AV ČR Praha, 2004, str. 343 – 344, (úplný text CD), ISBN 80-85918-88-9
- [40] Pochylý,F.; Příhoda,J.; Šulc,J.: Stanovení parametrů proudu v protékaném prostoru kanálového oblouku s pravoúhlým průřezem. Závěrečná zpráva projektu č. 103/02/0545 – GAČR, LVV-FAST-VUT v Brně, 2004, 45 stran
- [41] Příhoda,J.; Šulc,J.; Sedlář,M.; Zubík,P.: Modelování turbulentního proudění v zakřiveném složeném difuzoru. Sborník „Conference Topical Problems of Fluid Mechanics 2005“, ÚT AV ČR, Praha, str. 87-90, ISBN 80-85918-92-7
- [42] Zubík, P.; Šulc,J.: Analysis of the internal structure of flow in a channel with negative step. Sborník konference „Inženýrská mechanika 2005“, Ústav termomechaniky AV ČR Praha, str. 365 – 366 (úplný text CD), ISBN 80-85918-93-5
- [43] Šulc,J.: Stanovení maximálního hydrodynamického zatížení klapkového uzávěru. Vodní hospodářství č. 2, 1993, str. 3 – 8
- [44] Šulc, J.: Měřicí technika užívaná k analýze proudění tekutiny. Sborník ze semináře „Interakce pohybujícího se tělesa a tekutiny“, VUT v Brně, 2002, ISBN 20 – 214 – 2134 – 7
- [45] Čapka,K.; Šulc,J.; Zdařil,S.; Žoužela,M.: Stanovení komplexních parametrů aeračního zařízení. Sborník 4. vodohospodářské konference 2004, CERM, str. 58-65, ISBN 80-7204-360-9
- [46] Čapka,K.; Zdařil, S.; Šulc,J.; Žoužela, M.: Hydraulické zkoušky vyvíjeného aeračního zařízení ponorného typu. SOVAK č. 2/2005, str. 3-5
- [47] Šulc,J.: Specifications of the Basic Hydraulic Conditions for the Implementation of the Ultrasonic Flowmeters Q - LOGGER (Open Channel Systems). Výzkumná zpráva, ÚVV - FAST - VUT v Brně, 1995, 16 stran
- [48] Šulc,J.: A Check of the Conditions for Successful Implementation of Ultrasonic Flowmeters DETEC 3033 (Closed Conduit Systems). Výzkumná zpráva, ÚVV - FAST -VUT v Brně, 1995, 11 stran
- [49] Šulc,J.: Rozšíření použitelnosti Venturiho žlabů. SOVAK Časopis oboru vodovodů a kanalizací, č. 7-8/95, strana 8,9
- [50] Šulc,J.: Ověření rozsahu použitelnosti ultrazvukového průtokoměru DETEC 3013 pro měření rychlosti proudu s volnou hladinou. Výzkumná zpráva, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1995, 13 stran
- [51] Šulc,J.: Metrologické ověření pracovního měřiče průtoků Q-LOGGER-EEX ia lib T4. Posudek, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1997, 16 stran
- [52] Šulc, J.: Ověření funkční způsobilosti ultrazvukového hladinoměru MILLTRONICS PL-517 jako součást zkoušky pro osvědčení typu. Metrologický posudek, ÚVV-FAST VUT v Brně, 1999, 16 stran
- [53] Šulc,J.: Posouzení funkční způsobilosti přenosného magnetoindukčního průtokoměru FLO-TOTE FT 260A. Metrologický posudek, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1997

- [54] Šulc,J.; Hlaváček, J.: Stanovení proteklého množství a znečištění z měrných průřezových charakteristik na stokách a vodotečích. Sborník z 11. Mezinárodní vědecké konference, podsekcce č. 10.1., FAST – VUT v Brně, 1999, str. 73-76, ISBN 80 – 214 – 1440 – 5
- [55] Šulc,J.: Využití měrných vestaveb pro přesné a spolehlivé stanovení průtoku prosakující vody. Sborník z mezinárodního vodohospodářského kolokvia. AN CERM, Brno, 2001, str. 46-51, ISBN 80-214-2033-2
- [56] Šulc,J.; Žoužela,M.: Genaue Abflussmessung in Kanalisationsnetzen. Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 21, TU Dresden, 2002, str. 179-189, ISBN 3-86005-297-7
- [57] Šulc,J.; Hlaváček,J.: Měření průtoků na ČOV v České republice. Sborník ze 3. Mezinárodní konference ODPADNÍ VODY 1999, Teplice, 1999, str. 173 – 179 , ISBN 80 – 238 – 3977 – 2
- [58] Šulc,J.: Využití měřicí techniky a hydraulických laboratoří pro přesné a spolehlivé stanovení průtoků v měrných profilech. Sborník referátů ze symposia měření odpadních vod, ČVTS, Praha, 1999, str. 23 – 30, ISBN 80 – 02 – 01297 - 6
- [59] Jaroš,F.; Šulc,J.: The Bottom Outlet Tandem Slide Gates of the HC Alavian. Posudek, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1994, 32 stran
- [60] Šulc,J.; Jaroš,F.: The Bottom Outlet Twin Gate Marun. Výzkumná zpráva, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1994, 35 str.
- [61] Šulc,J.; Haluza,M.; Pochylý,F.: Hydrodynamic Loads Acting on a Slide Gate. Sborník Workshop 96, VUT v Brně, str. 349 - 350 (Fluid Mechanics)
- [62] Šulc,J.; Haluza,M; Pochylý F.: Computation of the Hydrodynamic Load Action on the Lower lip of a Slide – Gate Sealed on Downstream Face. Sborník Workshop 97, ČVUT Praha, str. 435-436
- [63] Šulc, J.: Proudění v odbočnicích okružního potrubí šestidýzových Peltonových turbín. Výzkumná zpráva VVÚ VSH – VUT v Brně, 1991, 51 str.
- [64] Šulc,J.. Výzkum výtokového objektu dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně. Výzkumná zpráva, VVÚVSH-VUT v Brně, 1982, 65 str.
- [65] Šulc,J.: Úloha modelového výzkumu při navrhování tvarů vtoků a výtoků PVE. Vodní hospodářství řada A, č.8, 1984, str. 201 - 206
- [66] Šulc,J.: Příspěvek k řešení hydraulických tvarů reverzních vtoků a výtoků včetně předpolí. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně, 1984, str. 101 - 108
- [67] Šulc,J.: Vliv tvaru stěn na hydraulickou funkci plochého difuzoru. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně, 1992, str. 43 - 55
- [68] Šulc,J. - Maleňák,J. - Skalička,J. : Výzkum problematiky stability dna při výstavbě podchodu rychlodráhy přes Dunaj v Bratislavě. Výzkumná zpráva VVÚVSH - VUT v Brně, 1987, 99 str.
- [69] Šulc,J.: Aerodynamické modelování výmolů u obtékaných stavebních jímek a pilot. Sborník konference – Krizové situace, VA v Brně, 2003, CD – str. B – 6, ISBN 80-85960-66-4
- [70] Šulc,J.: Úloha modelového výzkumu funkčních zařízení přehrad. Sborník 3. Vodohospodářské konference 2003. ECON publishing, s.r.o. Brno, str. 526-539, ISBN 80-86433-26-9
- [71] Šulc,J.: Usměrnění proudění v odpadních štolách za segmentovými a rozstřikovacími uzávěry. Sborník 17. Mezinárodní konference o hydroenergetice, VUT v Brně, 2004, str. 189-198
- [72] Šulc,J.: Modelový výzkum rozstřikovacích uzávěrů zaústěných do štoly nových základových výpustí VD Morávka. Výzkumná zpráva, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1998, 45 stran

- [73] Šulc,J.: Shaping the outflow jet of tainter gates and hollow cone valves directed into water tunnels. Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 29, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, 2005, str. 45 – 54,ISSN 0949-5061
- [74] Šulc,J.: Modelový výzkum kritické hloubky ponoru vtoku kašnové turbíny. Sborník mezinárodní konference HYDROTURBO 93, Brno, 1993, str. 489-500
- [75] Šulc,J.: Stanovení minimální provozní hladiny turbíny v kašně. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně, 1992, str. 57-74
- [76] Šulc,J.: Poznatky z modelového výzkumu vtokových vírů u vtoků vodních elektráren. Vodní hospodářství, ročník 40, č. 3, 1990, str. 102-107
- [77] Šulc,J.: Modelový výzkum tvorby vírů u vertikálních dnových a horizontálních bočně zaústěných vtoků. Vodní hospodářství, ročník 41, č. 3/91, str. 81-86
- [78] Šulc,J.: Poznatky z hydraulického modelového výzkumu proudění v předpolí vtokového objektu horní akumulární nádrže PVE Dlouhé Stráně. Vodní hospodářství řada A, č. 8, 1986, str. 242 – 247
- [79] Šulc,J.: Experimentální výzkum kritické hloubky ponoru vtoku. Sborník X. vědecké konference FAST - VUT v Brně, 1989, sekce 16, str. 39-44
- [80] Šulc,J.: Stanovení bezpečné hloubky ponoru vtoku proti vnikání ledových ker. Sborník HYDROTURBO 87, Trenčín 1987, str. 115 - 123
- [81] Šulc,J.: Příčiny přerušení dodávky kondenzátu v sací části hydraulického okruhu napájecího systému parní turbíny 500 MW TE Mělník. Posudek, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1995, 26 stran
- [82] Šulc,J.: Vnik splavenin do dolního vtoku PVE Štěchovice (rozbor příčin a možností zamezení). Posudek, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1996, 23 stran
- [83] Šulc,J.: Návrhy úprav hydraulického okruhu pro zvýšení provozní spolehlivosti kondenzátních čerpadel CJAV-150 (Elektrárna Mělník I). Posudek, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1998, 20 stran
- [84] Dvořáček,P.; Šulc,J.:Možnosti použití mostů s kontinuálními plovoucími podpěrami při zvýšených rychlostech proudu. Sborník vědeckých spisů VAAZ v Brně - řada technická B, č. 1, 1986, str. 137 – 150
- [85] Dvořáček,P.; Šulc,J.: Vymezení oblasti použitelnosti plovoucích mostů s kontinuálními plovoucími podpěrami v závislosti na hydraulických parametrech proudu. Sborník vědeckých spisů VAAZ v Brně - řada technická B, č.1,1985, str. 119 – 129
- [86] Stara,V.; Šulc, J.; Špano,M.: Hydrotechnický modelový výzkum funkčního objektu vodního díla Znojmo. Vodní hospodářství č. 4/2005, str. 104 - 107
- [87] Stara,V.; Šulc,J.; Špano,M.: Proposal of measures on enhancement of safety of the Znojmo dam on the Thaya River during floods. Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 29, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, 2005, str. 19 -202, ISSN 0949 - 5061
- [88] Šulc,J.; Zubík, P.: Moderní metody experimentální analýzy proudění tekutin. Sborník semináře „Interakce pohybujícího se tělesa a tekutiny“. FSI VUT v Brně, 2005, 5, ISBN 80-214-2936-4

## 11 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Ve vědecké a odborné činnosti předpokládá autor pokračovat v rozvíjení metod modelování a analyzování hydrodynamických jevů a procesu především na zmenšených fyzikálních modelech. K těmto účelům se předpokládá využívání špičkové měřicí techniky a zkušebních okruhů v laboratoři autora případně u spolupracujících organizací (Odbor

fluidního inženýrství Victora Kaplana FSI – VUT v Brně, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.M. Praha, ČBE, a.s. Blansko).

K danému účelu je předpoklad doplňování měřicí techniky kontaktního a především bezkontaktního charakteru pro analýzu rychlostních a tlakových polí v proudu tekutiny.

Toto unikátní technické vybavení bude využíváno v rámci smluvních podmínek i dalšími pracovišti pro výzkumné a zejména vývojové účely.

Pro úplnou analýzu proudových polí ještě stále není k dispozici přesné měření tlaků v měrných bodech, tento požadavek bude realizován zakoupením víceotvorové tlakové kulové mikrosondy (současný výrobek firmy Aeroprobe USA).

Autor předpokládá využití této přesné měřicí techniky na stávajících hydraulických okruzích k testování a kalibraci matematických modelů proudění složité struktury.

Pro kalibraci měřidel bodové rychlosti proudu vody se předpokládá vybudovat tlakový hydraulický okruh s proskleným měrným prostorem. Měrné prvky zde budou kalibrovány pomocí měřidla „absolutní“ rychlosti, kterým je laserový dopplerovský anemometr. Tento systém bude využíván pro potvrzení návaznosti kalibrovaných měřidel na etalon jednotky rychlosti Českým metrologickým institutem (ČMI).

Autor bude nadále pokračovat ve spolupráci na vývoji nových měřicích systémů rychlosti proudu, hloubky a průtoku zejména v oblasti proudění o volné hladině. Vytvoření definovaných proudových podmínek zejména s výraznější deformací je nutnou a vyžadovanou podmínkou pro testování nových měřicích rychlostních i průtokových systémů. Tyto podmínky budou v laboratoři využívány i zahraničními výrobci měřicí techniky, požadujícími vystavení Certifikátu o schválení typu měřidla v ČR (Edmund Bühler GmbH, Arkon flow systems, Nivus GmbH).

Autorem vytvořená úspěšná řada měrných vestavbových prvků využíváná zejména v kanálech s prouděním o volné hladině bude nadále přizpůsobována podmínkám stísněných instalačních rozměrů a splaveninového režimu. Využívání těchto prvků ve stávajících kanalizačních systémech minimalizuje náklady na stavební a výrobní práce při dobré spolehlivosti a přesnosti měření proteklých objemů. Vestavbové konstrukce jsou využívány též v rámci technicko-bezpečnostního dozoru nad vodními díly při měření průsaků.

Autor se bude i nadále věnovat vývoji uzávěrových konstrukcí hydraulických okruhů z hlediska jejich tvarové optimalizace, regulační schopnosti a kavitačních vlastností. Využití nových typů uzávěrů při výstavbě nebo rekonstrukci přehradní nebo jezové stavby pomůže zvýšit kapacitu výpustí žádanou zejména před příchodem povodňových vln. V této oblasti má autor spolupráci s řadou výrobců i provozovatelů v ČR i zahraničí (ČKD Blansko Strojírny, a.s., státní podniky Povodí Moravy, Odry, Labe, Vltavy).

V rámci autorizovaného pracoviště k metrologickým úkonům měření rychlostí a průtoků tekutin předpokládá autor i nadále realizaci kontrolní činnosti pro orgány státní správy (MŽP ČR, Státní fond ŽP ČR, Inspekce ŽP ČR) u instalovaných měřicích systémů, posudkovou a kalibrační činnost pro širokou oblast uživatelů.

Na pracovišti předpokládá autor nadále pokračovat ve školicí činnosti budoucích i stávajících úředních měřičů v oboru měření rychlostí a průtoků tekutin. Součástí činnosti realizované ve spolupráci s ČMI je odborná a praktická část zkoušek pro získání Certifikátu úředního měřiče.

S novými poznatky v oboru měření parametrů proudění bude autor nadále seznamovat posluchače Fakulty stavební VUT v Brně v rámci magisterského i doktorského studia.

Zkušenosti z problematiky měření a modelového výzkumu hydraulických jevů budou prezentovány autorem na seminářích a konferencích v ČR i zahraničí. Zintenzivnění vzájemných vazeb pracovišť za přispění autora se očekává s TU Dresden a Quantum Hydrometrie GmbH Berlin (výměnné pobyty doktorandů).



## 12 SUMMARY

Physical modeling with exact measurements of hydraulic parameters is still inevitable in most cases of research of complicated objects in hydraulic engineering. A typical example is the development and especially calibration of mathematical models in conditions of 3D structures. The mathematical models are mostly based on the solution of Navier-Stokes equations. Calibration problems are related to the problem of finding a suitable definition of cinematic viscosity effects when complicated boundary conditions and regimes of flow are involved. Many projects of basic research in our country and abroad are aimed at finding suitable approaches to turbulence models.

Once the suitable functions for viscosity effects are found the solutions of most hydraulic technical problems involving stationary as well as non-stationary flows will be solved by mathematical models. The only necessary condition is the availability of computer systems of the required speed and memory capacity.

The physical models combined with exact measurements of physical values will in future be used for special tasks only. Most of these will be related to calibration. One can expect the calibrations of flows involving non-Newtonian fluids, two/more phase structures or significant diffusion phenomena.

New approaches to the monitoring problems in water management practice must be found due to growing requirements and standards of environmental organizations. More and more laws, regulations etc. come into being. To comply with them exact monitoring of hydraulic and aerodynamic values in real time is inevitable. High standards of precision and reliability are required due to great financial flows involved in regular payments or fines related to water/air pollution.

In case of disagreement between two parties the inspection, invoicing and arbitration activities may be done only by the subjects authorized or specified by the law (e.g. the Czech Metrological Institute - CMI).

It is the long and systematic cooperation between the laboratories and CMI that enabled to guarantee the high precision and reliability of the measurement technology i.e. of the instruments and of the measurement and evaluation techniques [35,56,57,58,88].

The testing of a new measuring instrument first in laboratory and then in field conditions by an authorized subject possessing top level instrumentation and experienced staff is a condition for the issue of the Instrument Approval Certificate [47,48,50,51,52,53].

The university – type laboratories active in the field of authorization and accreditation must also organize the corresponding teaching and PR activities [88].

To cite an example: in our laboratory – an authorized subject for the measurement of mass and volume flow – the testing of new measurement systems, training the official measuring staff and organizing the technical part of the authorization examinations has been done since 1997. Two of the laboratory personnel are members of the certification committee of CMI for the branch of fluid discharge measurement.

The law prescribes long term monitoring of selected hydraulic values in the field of environment organized and guaranteed by the institutions responsible for the pollution and by water consuming firms. The lower limit of pollution range at which the payment of fees starts is set by government regulations. The fulfillment of this duty requires a correct and reliable monitoring system with a proved relation to the etalon measuring system for the particular measured & declared value.

The Technology Safety Monitoring of hydro – structures forms an important item of the operation of all bigger water management structures. Periodical and in case of need continuous measurements (e.g. of pressures and seepage) are made by the operators and by independent inspecting organizations, too [54,55,57].