

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav vodních staveb

**Doc. Ing. Jan Šulc, CSc.**

**SOUČASNÉ METODY STANOVENÍ CHARAKTERISTIK  
PROUDÍCÍ KAPALINY A JEJICH APLIKACE  
PŘI FYZIKÁLNÍM A MATEMATICKÉM MODELOVÁNÍ  
V HYDROTECHNICE**

**MODERN METHODS OF DETERMINING THE PARAMETERS  
OF THE STREAMING FLUID AND THEIR APPLICATION  
IN PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING  
IN HYDRAULIC ENGINEERING**

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2003

**KLÍČOVÁ SLOVA**

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

**KEY WORDS**

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

Práce bude uložena v knihovně Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb FAST, Veveří 95, Brno.

# **PŘEDSTAVENÍ AUTORA**

## **1 ÚVOD**

- 1.1 Časové etapy základních používaných principů modelování a měření v hydrotechnice
- 1.2 Charakteristické znaky používaných způsobů modelování z hlediska vstupních a výstupních parametrů

## **2 PODSTATA MATEMATICKÝCH MODELŮ**

- 2.1 Řešení 3-D úlohy proudění nestlačitelné kapaliny
- 2.2 Testování matematických modelů proudění v hydrotechnice – současný stav

## **3 VÝVOJ EXPERIMENTÁLNÍ TECHNIKY PRO VÝZKUM HYDROTECHNICKÝCH OBJEKTŮ**

- 3.1 Měřicí a vyhodnocovací technika
  - 3.1.1 Měření rychlostí proudu kapaliny - kontaktní metody
  - 3.1.2 Měření rychlosti proudu kapaliny – bezkontaktní metody
  - 3.1.3 Měření rychlosti kapaliny – integrální metody
  - 3.1.4 Měření tlaků, sil a momentů
- 3.2 Automatizace pohybu sond a zkoušených prvků
- 3.3 Zkušební tratě pro hydrotechnický výzkum

## **4 PŘÍKLADY POSTUPŮ UŽÍVÁNÝCH K ANALÝZE STRUKTURY PROUDĚNÍ**

- 4.1 Modelový výzkum struktury proudu a tlakových poměrů složitých hydraulických objektů
- 4.2 Měření na hydrotechnických dílech
- 4.3 Porovnání výsledků matematického a fyzikálního modelu

## **5 ZÁVĚR**

## **6 SUMMARY**

## **7 POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA**

## 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, 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)
- Řešené projekty (spoluřešitel):
    - 2003 – 2005 Vyšetřování turbulentního smykového proudění v kanálech s náhlým rozšířením průřezu (GAČR)
- 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 a doktorandů
    - Členství v komisích pro SZZ a obhajoby DDP na FAST a FSI VUT v Brně
    - Spoluautor výukového filmu pro potřeby VA Brno
- Publikace
    - 172 původních zpráv a článků,
    - 198 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 ÚVOD

## 1.1 ČASOVÉ ETAPY ZÁKLADNÍCH POUŽÍVANÝCH PRINCIPŮ MODELOVÁNÍ A MĚŘENÍ V HYDROTECHNICE

Při navrhování nebo posuzování hydraulických potrubních okruhů a koryt toků je většina úloh hydrodynamiky zaměřena na stanovení parametrů proudu případně na určení zatížení obtékaného povrchu části respektive celé hydrotechnické konstrukce. V těchto případech je zájmový prostor posuzován zpravidla průřezovými charakteristikami proudu a parametry zatížení (síly, kroutící momenty). Z hlediska sledovaného hydrodynamického jevu lze přístup náhledu charakterizovat jako „makropohled“. Tyto charakteristiky proudu mohou být (a bývají) v rámci dalšího využití s výhodou definovány ve formě bezrozměrných modelových kritérií, umožňujících následný aplikační přepočít na jiný objekt nebo situaci se shodnými, případně mírně odlišnými, okrajovými podmínkami.

Ke stanovení parametrů proudění, reprezentovaných průměrnými průřezovými nebo zatěžovacími charakteristikami, byly využívány v minulosti zejména fyzikální modely, případně přímo vlastní objekty. Zpracováním, vyhodnocením a přesnou archivací těchto údajů, charakterizujících vliv tvaru, viskozity kapaliny, povrchového napětí a míry turbulence, bylo umožněno následně spolehlivě stanovit hledané makrostrukturální proudové charakteristiky (průřezové rychlosti, síly, kroutící momenty).

Tento „makropohledový“ přístup k fyzikálnímu modelování hydrotechnických objektů je charakteristický zejména pro časové období let 1900 až 1960. Pro posuzování vhodnosti parametrů staveb a jejich technologických částí v rámci „inženýrských“ potřeb je a dlouho bude využíván i nadále. Daný přístup lze charakterizovat relativně vysokým stupněm spolehlivosti výsledků a relativně vyššími nároky na stavbu fyzikálních modelů. Měření v těchto případech je realizovatelné dostupnou klasickou měřicí technikou.

Dvou - případně třírozměrný pohled na problematiku proudění v počátcích vzniku matematických modelů byl svázán výhradně s ideální kapalinou a stacionárním pojetím. Počátky „mikrostrukturálních“ pohledů na ustálené proudění ideální kapaliny jsou časově orientovány do 20. století. Tehdejší řešení bylo zaměřeno na potenciální proudění, zejména rovinné. Byly vytvořeny různé metody – od grafických (Žukovskij, Prášil), přes konformní zobrazení graficko-početní (Trefftz) až po singularitní založené na vhodných kombinacích potenciálních zdrojů, propadů a vírů (Glauert) [1, 2, 4].

Rozvoj experimentálních metod zejména v oblasti měřicí a vyhodnocovací techniky umožnil po roce 1960 detailnější rozbor struktury proudění včetně analýzy zatížení obtékaných těles. Pomocí elektronických mikrosond a čidel (rychlostních, směrových, tlakových, teplotních) bylo již možné realizovat rozbor a vyhodnocení stavových veličin v protékaných prostorech a na ohraničujících obtékaných plochách. Tento rozvoj měřicí techniky umožnil sledování detailních charakteristik polí (tlakových, rychlostních, teplotních) a na základě jejich vyhodnocení určení polí hodnot Reynoldsova kritéria, smykových napětí a turbulentní vazkosti, bylo již možné provést bilanci celkové energie proudu v protékaném prostoru. Do určité míry umožnila měřicí i vyhodnocovací technika rozbor dynamiky proudění, lze hovořit o počátcích proniku do „mikrostruktury“.

Relativně náročná a citlivá měřicí technika omezovala realizaci měření a následného rozboru na laboratorní podmínky s fyzikálními modely hydrotechnických děl a části hydraulických okruhů.

Počátek rozvoje výpočetní techniky zejména před 30 lety položil základy k širokému využívání numerických metod pro řešení praktických úloh hydrodynamiky. Přestože počátky zrodu těchto metod zasahují do období daleko dřívějších (např. metoda konečných diferencí má základy v 18. a 19. století – Newton, Gauss a metoda konečných prvků ve 40. letech 20. století – Courant), bylo jejich praktické využití limitováno potřebnou úrovní výpočetní techniky.

Korektně realizovaný experiment na hydraulickém modelu nebo vlastním objektu s detailním měřením parametrů proudění a zatížení byl jednak zdrojem experimentálních součinitelů nutných

k definici okrajových podmínek (kalibraci) pro řešení teoretickým modelem, současně umožnil porovnáním výsledků stavových veličin ověřit přesnost a spolehlivost výpočtu.

Metoda konečných prvků patří k nepoužívanější v oblasti teoretického řešení problematiky mechaniky tekutin. První aplikace v této oblasti u nás přicházejí v roce 1974 (Kratochvíl, Ženíšek [7, 8]). Pohyb kapaliny je popsán Navier-Stokesovými rovnicemi. Tyto rovnice staré více než 150 let představují nejobecnější rovnice pohybu vazké nestlačitelné kapaliny. Numerický postup řešení těchto rovnic je znám již 10 let, možnost úspěšných aplikací však je při současné rychlosti a kapacitě počítačů omezena. Úspěšnost aplikací spočívá v současném stavu v jistém zjednodušení reality, které spočívá v časovém průměrování veličin a v převedení úlohy na stacionární problém.

Požadavky na znalost stavových veličin při „mikrostrukturálním“ pohledu vyžadují nutně špičkovou, nejlépe bezkontaktní, měřicí techniku, případně techniku s měřicími elementy relativně málo ovlivňujícími měřené hodnoty. Pro detailní popis reálné (třírozměrné a nestacionární) situace je nutné rozšířit přesné měření stavových veličin o případy časově závislých veličin ve velkém množství měrných bodů.

Tento požadavek je v současné době splnitelný výjimečně náročným integrálním, nejlépe bezkontaktním, měřicím postupem.

## 1.2 CHARAKTERISTICKÉ ZNAKY POUŽÍVANÝCH ZPŮSOBŮ MODELOVÁNÍ Z HLEDISKA VSTUPNÍCH A VÝSTUPNÍCH PROUDOVÝCH PARAMETRŮ

Z hlediska metody řešení a charakteru výsledků lze současné modelování (matematické nebo fyzikální) hydrodynamických jevů rozdělit do následujících charakteristických skupin:

- a) řešením je soubor průřezových charakteristik nebo integrálních hodnot parametrů zatížení – sledované řešení přináší „makrostrukturální“ pohled na proudění (jednorozměrné (1D) řešení),
- b) řešením je získán soubor detailních charakteristik proudění (stavových veličin) v zájmovém mnohdy relativně malém prostoru – sledované řešení přináší „mikrostrukturální“ pohled na stacionární nebo quasistacionární proudění (výsledné veličiny jsou reprezentovány časově středními hodnotami), řešení je rovinného (2D) nebo prostorového (3D) charakteru,
- c) řešením je soubor vybraných stavových veličin v (většinou relativně malém) prostoru, které přináší „mikrostrukturální“ pohled na nestacionární proudění v závislosti na čase.

Současné matematické modely umožňují relativně velmi přesné a spolehlivé řešení problémů náležejících do skupiny a) využívající integrální a průřezové hydraulické charakteristiky. Matematické modely ustáleného nerovnoměrného proudění využívají diferenciální rovnice pohybu vody v korytech. Problém neustáleného proudění v korytech, definovaný Saint Venantem v roce 1870, využívá soustavy rovnice dynamické a rovnice kontinuity. V případech obou typů úloh je nutné pro spolehlivé řešení definovat vliv třecích sil. Tento vliv bývá zahrnut do řešení zpravidla v Chezyho součiniteli. Jedná se o typy úloh, které jsou spolehlivě a ekonomicky řešitelné pomocí matematického modelování. Model musí být nejlépe přímo na prototypu nakalibrován (vliv ztrát mechanické energie od vlivu tření případně místních deformací proudění). Bez tohoto typu modelování se prakticky nelze obejít při řešení povodňových stavů na rozsáhlých povodích.

U hydraulických tlakových systémů je řešení obecného proudění pomocí matematického modelování založeno na využití dvojice diferenciálních rovnic – pohybové a kontinuity. I v těchto případech je úspěšná aplikace založena na přesném určení součinitelů ztrát mechanické energie (třecí i místní). Tento princip řešení je spolehlivě využíván při obtížných řešeních, která by byla fyzikálním modelováním finančně náročná dokonce i méně spolehlivá (případ řešení vlivu hydraulického rázu v okruhu ve vztahu k modelové podobnosti kapaliny, materiálu potrubí a uzávěru).

Tímto „makrostrukturálním“ (jednorozměrným) modelem sledovaného hydraulického jevu s využitím integrálních a průřezových charakteristik nelze popsat více nebo méně složité proudové

poměry. Jedná se o případy proudění dvou a vícefázového media, případně případy s výrazným odtržením mezní vrstvy a tranzitního proudu případně s vysoce intenzivními víry, které jsou v současné době spolehlivě řešitelné buď fyzikálním modelováním nebo v mnoha případech pouze přímým měřením na vlastním objektu.

Jistý časově zprůměrovaný „mikrostrukturální“ pohled na proudění, zařazený ve shora uvedeném rozčlenění do skupiny b), je zpravidla vázán na relativně menší prostor. Pokud sledovaná protékaná oblast je relativně velká (zpravidla převládá jeden rozměr), bývá realizován postup řešení „per partes“ při navázání úseků. Tento přístup bývá realizován u matematických i fyzikálních modelů proudění v protékaných úsecích a oblastech.

První pokusy o modelování rovinného případně prostorového proudění řešily pohyb ideální kapaliny nejčastěji ve stacionárním pojetí. Tyto první matematické modely z počátku 20. století řešily potenciální proudění různými přístupy. Grafické metody řešení byly využívány v době neexistence potřebné výpočetní techniky. Numerické řešení metodou singularit bylo využíváno již s existencí prvních počítačů, metoda byla zejména pro řešení profilových mříží využívána do roku 1980. Tyto postupy neumožnily řešit reálné proudění s viskozitou zejména v podmínkách s odtržením proudu od obtékaného povrchu. Rovněž nemohly svojí podstatou reálně vystihnout nestacionaritu.

Matematické modelování hydraulického jevu s využitím zprůměrovaného „mikrostrukturálního“ pohledu využívá statistický přístup s časově zprůměrovanými veličinami v rovnicích kontinuity a Navier-Stokese. Model je vybrán podle typu úlohy. Konstanty, které jsou při numerickém řešení používány pro vyjádření vlivu vazkosti kapaliny, jsou závislé vždy na konkrétním druhu proudění. Tato skutečnost klade požadavky na kalibraci a verifikaci modelů turbulence včetně vymezení jejich vhodnosti a spolehlivosti. V současné době jsou na našich spolupracujících ústavech používány softwarové soubory založené na různých typech modelů turbulence ( $k - \epsilon$ , RNG  $k - \epsilon$ , Realizable  $k - \epsilon$ , Spalart – Allmaras, Reynolds Stress Model).

Kalibrace i verifikace modelů vyžaduje přesné změření veličin v relativně husté síti měrných bodů. Toto náročné měření nelze prakticky realizovat bez špičkové techniky a jejího automatizovaného pohybu (jedná se o stovky až tisíce měrných bodů měrné sítě).

Stávajícími matematickými modely je při použití přesných vstupních veličin spolehlivě řešitelná převážná většina úloh i se složitými okrajovými podmínkami. Správné řešení silně nestacionárního proudění s výraznou změnou hladiny a proudění o dvou a více fázích zatím zůstává doménou mnohdy komplikované a náročně provedených fyzikálních modelů případně měření na vlastních dílech.

Nejvěrnější obraz o realitě proudových poměrů z „mikrostrukturálního“ pohledu je určen souborem vybraných stavových veličin v závislosti na čase. Modelování jevu při této dokonalé rozlišovací úrovni veličin je zařazeno ve výše charakterizované skupině c). Korektní stanovení i měření stavových veličin v závislosti na čase je záležitost velmi obtížná. U měření na fyzikálním modelu nebo díle je nutné zajistit okamžitý obraz o stavu v poli (síti měrných bodů). Velmi rychlá odezva měřicích elementů je nezbytná. Pro správné stanovení vstupních počátečních podmínek, možnou kalibraci i verifikaci matematických modelů je nutné realizovat měření proudových veličin integrálním způsobem (změření okamžitého stavu v úplném zvoleném profilu). Z hlediska správnosti provedení měření je možné vzhledem k rozměrům zájmových profilů využít pouze bezkontaktních způsobů měření nenarušujících proudové poměry.

Současný stav řešení v této oblasti maximálního rozlišení je charakteristický porovnáváním a doplňováním výsledků matematického modelu a experimentu. Testovací úlohy jsou zaměřeny na současné zvládnutelné jednodušší okrajové podmínky. Úlohy jsou náročné z hlediska matematického modelu jak na výkon počítačů, tak také na experimentální měřicí a vyhodnocovací techniku. Dosud velmi uspokojujivé shody řešení nestacionárního proudění oběma typy modelů bylo dosaženo u relativně jednoduchých geometrických okrajových podmínek při proudění s menšími rychlostmi (nižší hodnoty Reynoldsova kritéria). Této problematice kalibrací a vyhledávání



vhodných matematických modelů je nyní věnována řada grantových projektů u nás i v zahraničí. Z daného výčtu je zřejmé, že precizní experimentální laboratorní výzkum má v současné době i v budoucnosti prakticky nezastupitelný význam pro řešení případů proudění se značně složitými okrajovými podmínkami, při vysoce nestacionárním charakteru, výrazné deformaci proudění a při výskytu více fází. Přesné měření na fyzikálních modelech potvrzuje a umožňuje spolehlivost zvolených matematických modelů a korektnost jimi získaných výsledků.

Zcela zvláštní oblast stanovení parametrů proudu, v níž je přesná měřicí a vyhodnocovací technika nezastupitelná, představuje úřední autorizované měření. Úřední měření, které reprezentuje nezávislý a státem garantovaný metrologický akt (úřední měřič v tomto případě zastupuje státní či veřejný zájem), je vždy prováděno na vlastním konkrétním díle předepsanou metodou a technikou, uvedenou v příloze k autorizační listině. Kalibrace

legislativou definovaných pracovních měřidel je za předpokladu prokázání návaznosti na etalon měřené (stanovené) veličiny proveditelná v laboratorních podmínkách – například v našem případě na hydraulických žlabech či kalibračních okruzích.

## 2 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. Toto 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 matematického řešení pohybových rovnic jako hlavního nástroje pro určení stavu proudící kapaliny.

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

Detailní mikropohled na proudové poměry využívá k řešení dvou rovnic – pohybovou (hybnostní) a kontinuity. K řešení izotermického proudění jsou k dispozici 4 rovnice (3 Navier-Stokesovy a kontinuity) pro 4 neznámé (3 složky vektoru rychlosti  $u_x, u_y, u_z$  a tlak  $p$ ). Toto řešení uzavřené 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 i poznání stavových veličin je řešení s časově zprůměrovanými veličinami. Složky rychlosti i tlak jsou však vyjádřeny v tomto pojetí středními hodnotami  $\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z, \bar{p}$  a jejich fluktuačními složkami  $u'_x, u'_y, u'_z, p'$ . K řešení úlohy s 8 neznámými funkcemi však máme pouze 4 rovnice.

Přibližné řešení získáme zavedením dalších předpokladů založených na empiricky zjišťovaných hodnotách. Empirické charakteristiky bývají do systému rovnic zadány zpravidla při řešení hydrotechnických problémů [3, 6, 9, 10, 11] různými modely turbulence. 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 fluktuačními složkami, tak také počtem rovnic, které systém uzavírají.

Výraz  $\rho u_i u_j$  lze považovat za přídavná napětí  $\tau'_{ij}$  způsobené turbulencí k vazkému – laminárnímu (Newtonovu) napětí. Nazývá se často Reynoldsovo napětí. Určování hodnot Reynoldsova napětí v různých proudových poměrech patří k hlavním úlohám experimentálního výzkumu turbulentního proudění.

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

Nalezení vhodného modelu proudění k určité charakteristické oblasti 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 silně započal gradovat [3, 6, 9, 10, 11]. 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 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 [3, 12].

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) [28, 36, 12].

Obdobně jsou k „testování“ využívány též případy stékání a roztékání proudů při různých vzájemných poměrech průtoků. Tyto zájmové oblasti se vyznačují (opět při relativně jednoduché geometrii) výraznými zónami odtržení s vývinem vírových struktur.

Pro schůdné numerické řešení Reynoldsových rovnic jsou v současné době používány standardní a anisotropní modifikace  $k - \epsilon$  modelu, případně  $k - \omega$  modelu.

Při řešení problémů kalibrace, verifikace a vyhledávání vhodných modelů je zapojena naše laboratoř měřením a vyhodnocováním struktur proudu již několik let zejména díky využívání přesných experimentálních postupů včetně bezkontaktních metod [21, 22, 23, 27, 30, 35, 39, 44].

## 3 VÝVOJ EXPERIMENTÁLNÍ TECHNIKY PRO VÝZKUM HYDROTECHNICKÝCH OBJEKTŮ

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.

### 3.1 MĚŘICÍ A VYHODNOCOVACÍ TECHNIKA

#### 3.1.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDU KAPALINY – KONTAKTNÍ METODY

Tato hydraulická veličina 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 nejistotou  $\pm (1,5 \div 3,0) \%$  při dodržení odklonu osy rotoru od nabíhajícího proudu v rozsahu  $\pm (5 \div 15) \%$ .

Hydrometrické 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 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.

Pro měření rychlosti proudění plynů se používají 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  $100^\circ\text{C}$ .

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.

### 3.1.2 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 popsané způsoby možno pro upevnění čtenářů uvést, 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 velmi dobře popsat pomocí interferenčního modelu. Na horní části obr.1 je schematicky naznačeno sčítání a odčítání rovinných vln dvou interferujících koherentních svazků paprsků laseru. 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, tak jak je naznačeno na obr.1. Projde-li vhodná částice tímto prostorem, vyšle signál úměrný složce její rychlosti, ležící v rovině paprsků a kolmé na osu optické soustavy (obr.2), tedy složce kolmé na interferenční roviny (obr.1).

V následném kroku je z tohoto signálu zjišťována Dopplerova frekvence  $f_D$  a ta je přímoúměrná složce rychlosti unášené částice  $v_x$  :

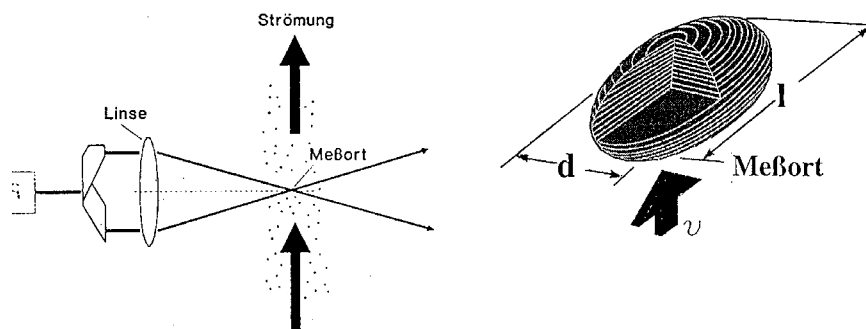
$$f_D = 2 v_x / \lambda \sin(\vartheta/2). \quad (1)$$

Tento princip je charakteristický pro nejčtenější využití v hydrotechnické praxi, jedná se o tzv. diferenční uspořádání využívající dvou laserových svazků o stejné intenzitě.

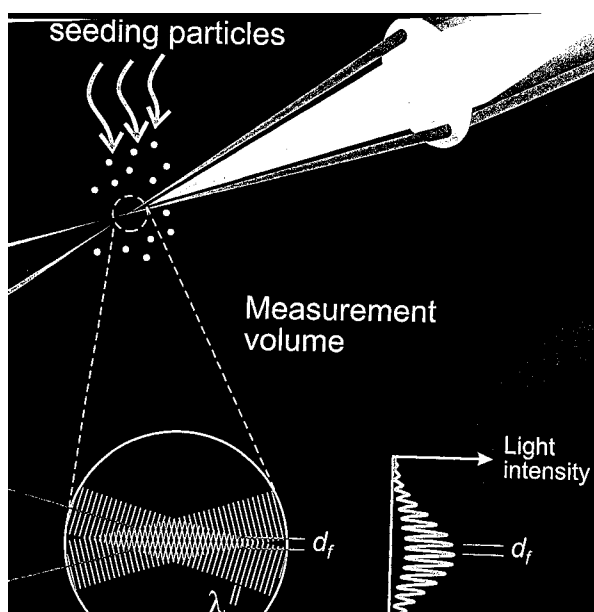
Popsaným způsobem je změřena a vyhodnocena velikost složky rychlosti (průmět vektoru rychlosti do roviny svazků laseru).

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

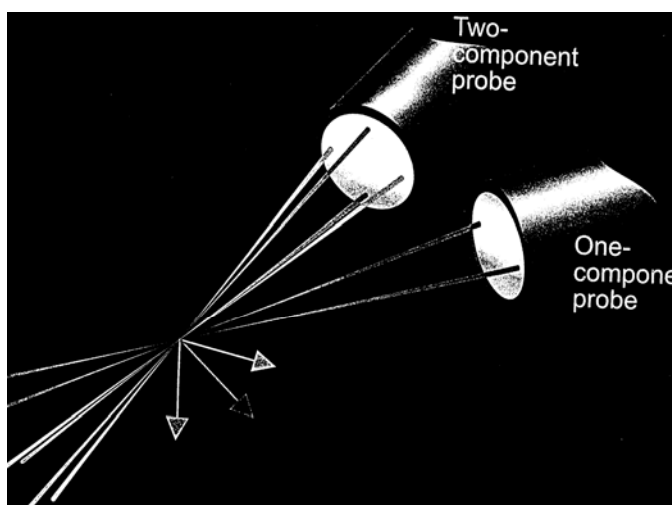
Při dvousložkovém uspořádání do měřené oblasti vstupuje ještě další dvojice paprsků podél stejné osy symetrie jako první dvojice. Rovina těchto paprsků je však oproti první dvojici pootočena, zpravidla o  $90^\circ$ . Všechny čtyři paprsky se protínají v jediném bodě. Dvojice se navzájem liší vlnovou 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 (obr.3).



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



Obr. 2 Schéma pro výpočet složky rychlosti u LDA systému



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

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

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, dvěma nebo třemi barvami je synchronně měřen příslušný počet složek rychlosti. V případě měření s jedнокanálovým 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.

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 [14].

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 osovým směrem 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 u měřeného proudu je ve vztahu k uvedeným frekvencím:

$$u_o = \frac{f_d}{2f_v} \cdot c, \quad (2)$$

kde  $f_v$  je vysílací frekvence,  $f_d$  frekvence dopplerovského posuvu a  $c$  rychlost zvuku v mediu.

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  $u_{\max} \sim 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 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 posuvu 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.

### 3.1.3 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 náchylná 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 přemísťování 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 prostorách mezi statorovými nebo rotorovými lopatkami. Jednotlivá měření musejí být vždy přesně jednoznačně časově „zfázována“.

Přesně zřazované 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 obdržetím odraženého signálu. Tento způsob přiřazuje ke každé dopplerovsky posunuté frekvenci  $f_d$  odpovídající časový posun  $\Delta t$ . Posun je svázán se vzdáleností od vysílače vztahem:

$$\Delta t = \frac{2x}{c}, \quad (3)$$

kde  $c$  je rychlost šíření UZV signálu měřeným medium a  $x$  je vzdálenost rozptylující odrazné částice od vysílací a přijímací sondy, viz obr.4.

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

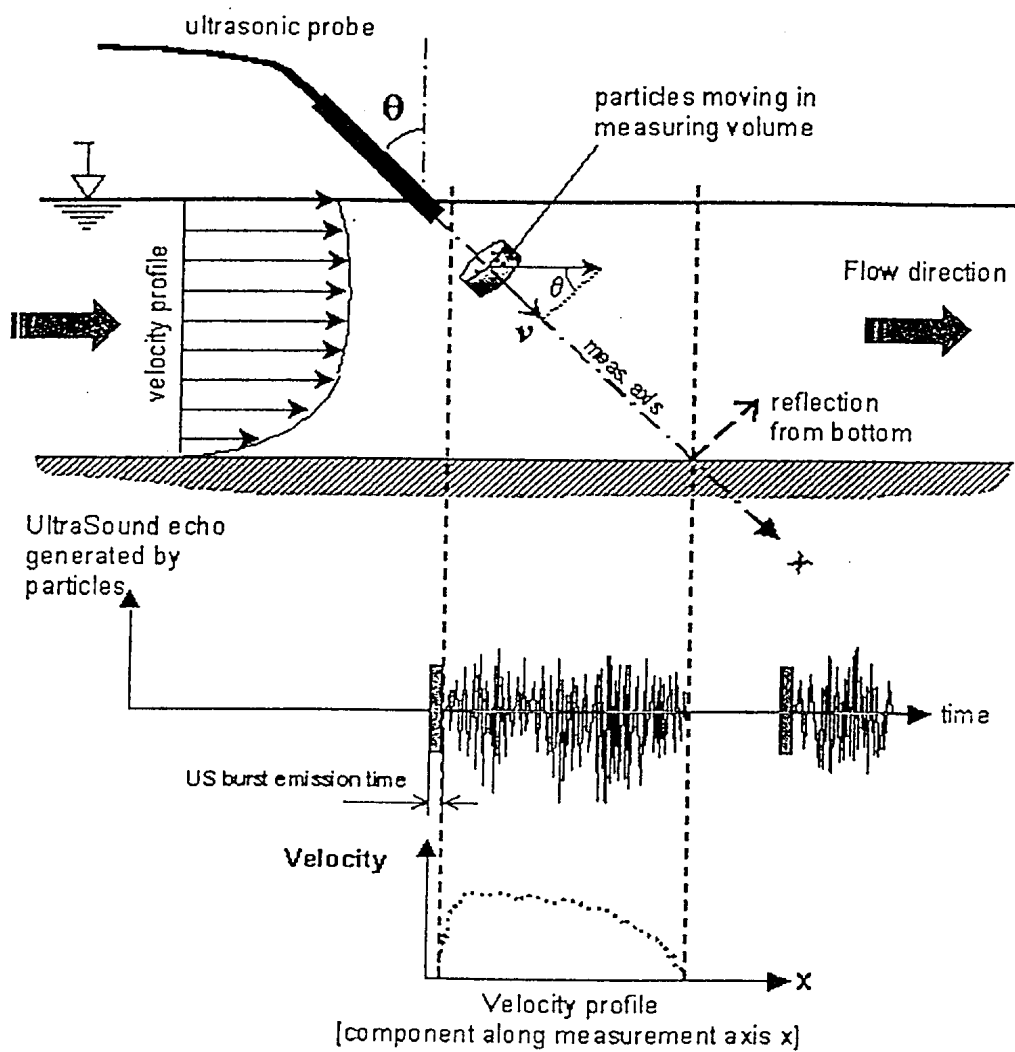
Při využití více vysílacích kanálů procesoru a více sond lze získat prakticky okamžitý obraz o rozložení složek rychlosti v úplném měrném profilu.

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.

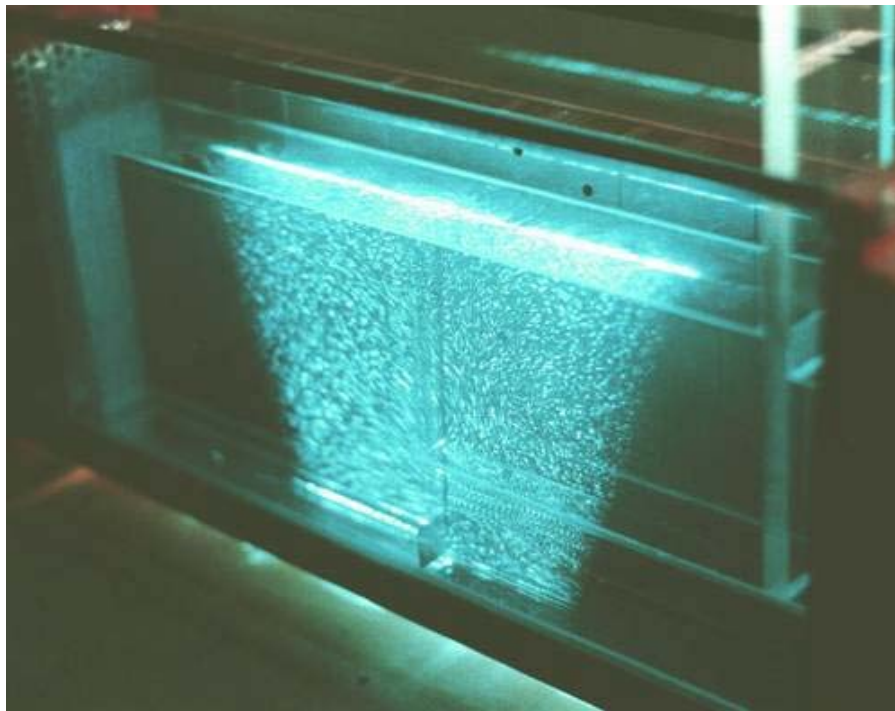
Prakticky ve stejném období se dočkala většího uplatnění metoda měření rychlosti pomocí obrazu částic – „Particle Image Velocimetry“ – PIV. Pro větší výstižnost je však vhodnější název **integrální laserová anemometrie**.

PIV je metoda měření rychlosti v celém dvourozměrném proudovém poli současně. Tato metoda vychází ze zaznamenávání poloh unášených částic (obr.6,7). 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.

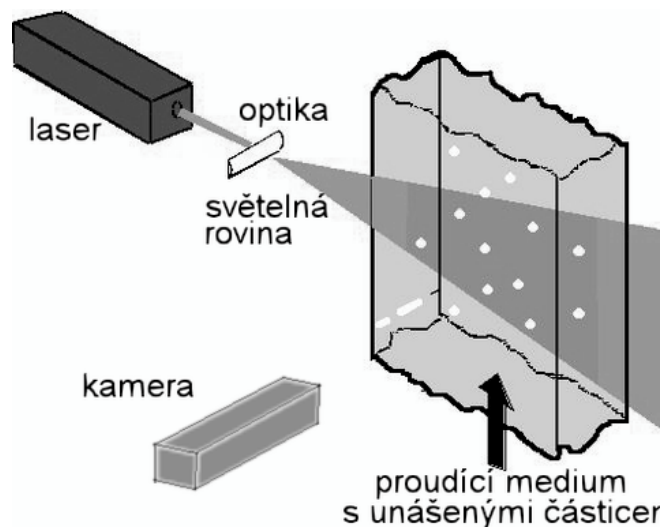


Obr. 4 Schématický obrázek UVP měření rychlostního profilu v proudu s volnou hladinou

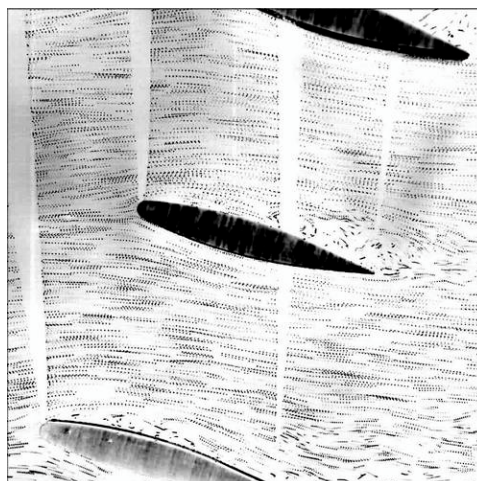




Obr. 5 Laserový „světelný list“ v protékaném prostoru



Obr. 6 Základní uspořádání PIV – 2 D



Obr. 7 Záznam pozic odrazných částic – schéma; několikanásobný záznam z reálného 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.

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), provedení optického vstupu. Rozbor technických omezení metody je uveden v práci [14].

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

### 3.1.4 MĚŘENÍ TLAKŮ, SIL A MOMENTŮ

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

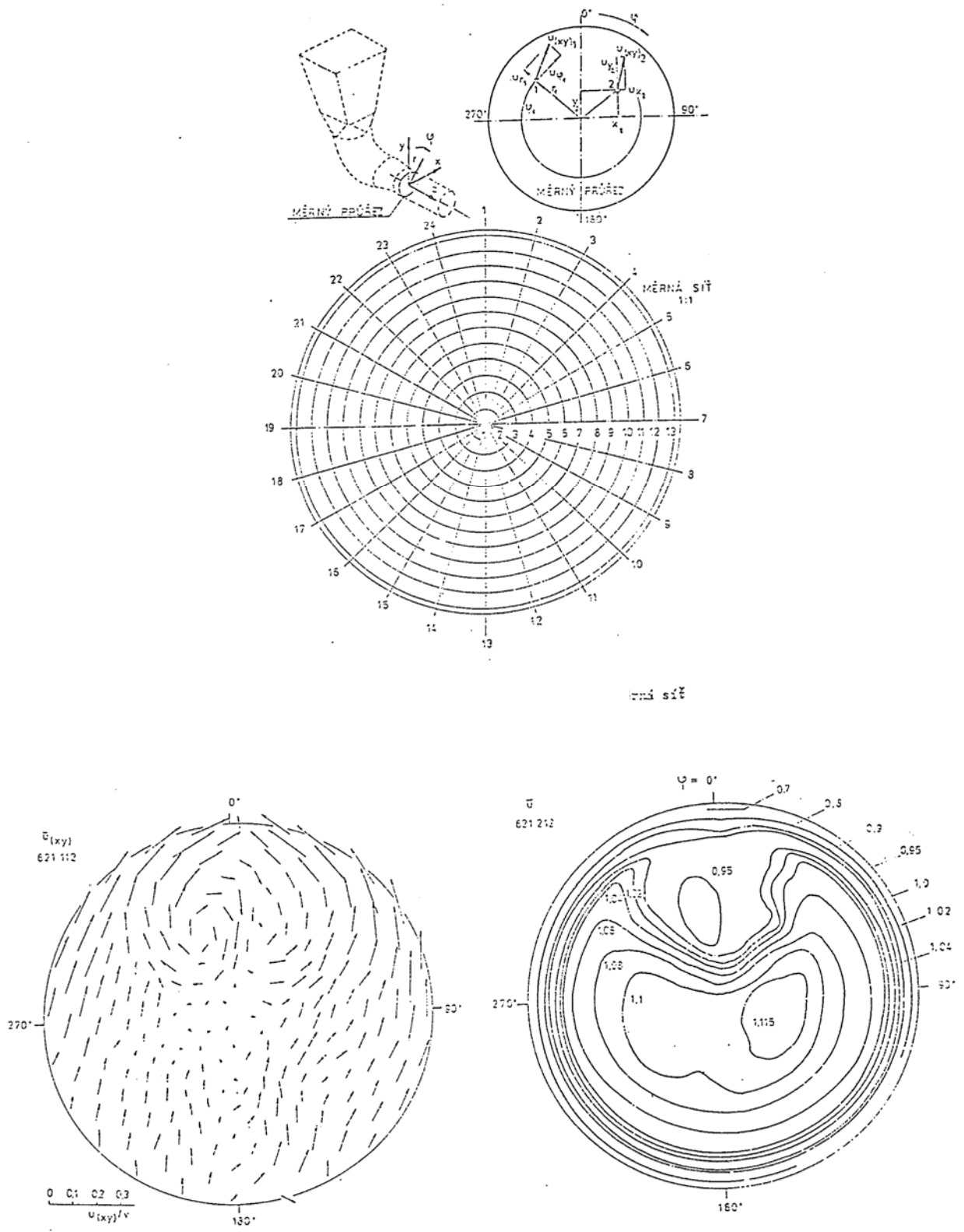
## 3.2 AUTOMATIZACE POHYBU SOND A ZKOUŠENÝCH PRVKŮ

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

Krokové motory a úchyt sondy včetně vodícího mechanismu umožňují pohyb přímočarý nebo rotační případně jejich kombinaci. V tomto pojetí jsou využívány přesné souřadnicové systémy, umožňující velmi přesné a rychlé přemístování sondy do určených pozic [28].

Při potřebě detailního stanovení proudových poměrů v prvcích hydraulických tlakových okruhů je měření prováděno až ve stovkách měrných bodů v daném vztažném profilu, obr.8. Dokonce výjimečně ve výstupních profilech z difuzorových prvků bylo v naší laboroři na aerodynamické trati využito přes tisíc měrných bodů v obdélníkovém průřezu.

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 přemístování pozic „bodů“ proniku svazků laseru v zájmovém prostoru (prostředí vyžaduje realizovat vstupy přes planparalelní skla). Tento přesný a rychlý způsob přemístování měrného bodu v měrném profilu u LDA systému je využíván i u měření externích (u zákazníků – např. hydroenergetické okruhy).



Obr. 8 Rozložení měrných bodů, složek rychlosti a relativních rychlostí v kruhovém měrném profilu popourdě za kolenem savky – automatizované měření

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 ovládnutí 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 různých otáček elektromotorů se využívá frekvenční regulace.

### **3.3 ZKUŠEBNÍ TRATĚ PRO HYDROTECHNICKÝ VÝZKUM**

Výzkum složitějších hydrotechnických objektů nebo hydrodynamických poměrů je v současnosti stále výhodné realizovat na modelech fyzikálních, pokud není požití matematického modelu ekonomicky výhodnější, časově rychlejší a dostatečně spolehlivé. V mnoha případech, kdy nelze dostatečně výstižně pro dokonalé poznání hydraulického jevu využít ani fyzikálního modelu, pak je nutné realizovat výzkum přímo na díle (prototypu).

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

## **4 PŘÍKLADY POSTUPŮ UŽÍVÁNÝCH K ANALÝZE STRUKTURY PROUDĚNÍ**

Mnoho protékaných nebo obtékaných tvarově složitých objektů případně i prvků tvarově jednodušších, 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.

### **4.1 MODELOVÝ VÝZKUM STRUKTURY PROUDU A TLAKOVÝCH POMĚRŮ SLOŽITÝCH HYDRAULICKÝCH OBJEKTŮ**

Matematické modely při současné úrovni rozpracovanosti a výpočetní techniky jsou schopny spolehlivě řešit proudění kapaliny (i stlačitelné) v případech relativně složitých protékaných oblastí bez výskytu odtržení tranzitního proudu. Pokud se vyskytuje odtržení tranzitního proudu nebo vírové struktury vyšších intenzit, lze využít matematických modelů spolehlivě k řešení struktury v tvarově jednodušších oblastech.

V hydrotechnické a zejména hydroenergetické praxi jsou využívány na tlakových nebo podtlakových okruzích pro dopravu kapalin prvky relativně složitých tvarů. Tyto tvary vyplývají z požadavků statických, konstrukčních a účinnostních zpravidla jako optimalizačně - kompromisní řešení. Dané protékané nebo obtékané konstrukce jsou zpravidla charakteristické jednak výskyty odtržení mezní vrstvy od obtékaných povrchů a současně jejich vzájemným, zejména poproudním, ovlivňováním. Pro tyto očekávatelné složité struktury proudu jsou v současné době využívány modelové experimenty.

Výjimku v oblasti problematiky proudění v tlakových okruzích představuje konfuzorové uspořádání hydrodynamicky účelně tvarovaného prostoru bez možného výskytu odtržení

v pracovním režimu. Toto přichází například v úvahu ve vstupních částech vodních strojů, v profilových mřížích statorového i rotorového typu. Pro řešení těchto výjimečných tvarových kombinací dává z hlediska tlakových poměrů spolehlivé výsledky dokonce i model využívající potenciálního proudění. Pro tvarování profilových mříží je i v současné době využívána singularitní metoda.

Pro výzkumy v této oblasti jsou využívány tradičně modely hydraulické, které mohou simulovat současně kombinaci poměrů tlakových i s volnou hladinou při atmosférických poměrech (koncové uzávěry tlakových okruhů). Na těchto modelech je však proveditelné přesné detailní měření struktury proudu při využívaných zmenšeních obtížně.

Přesné měření strukturálních parametrů včetně tlakových charakteristik je u objektů provozovaných v tlakové (podtlakové) oblasti proveditelné na aerodynamických modelech, tyto lépe umožňují automatizaci měřicího procesu miniaturními sondami bez vysokých nároků na vstupní otvory nosičů čidel.

Tímto způsobem, využívajícím aerodynamického modelování s plně automatizovaným procesem měření a vyhodnocení veličin, byly testovány 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 mírají zpravidla průměry  $d = (120 \div 250)$  mm, pravoúhlé bývají rozměrů až (550 x 550) mm – tyto možnosti poskytují např. traverzační systémy naší laboratoře. Dané rozměry při využití on-line automatizace umožní realizovat profilové měření až v 1000 měrných bodech.

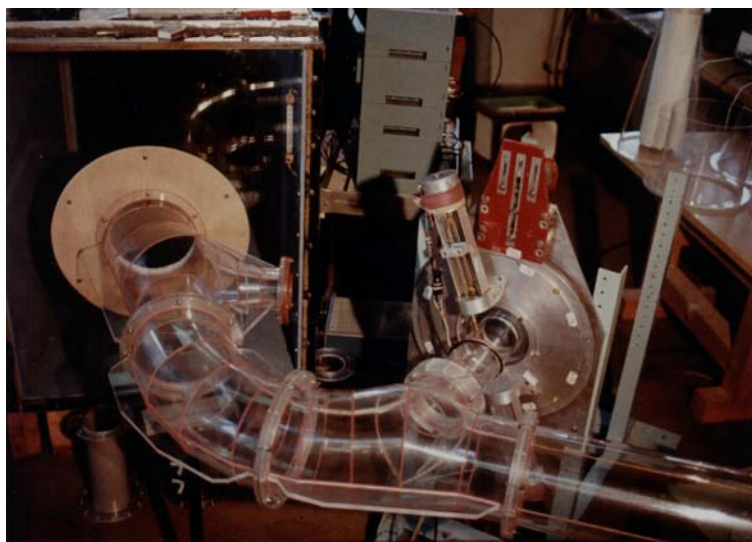
Na obr. 9 je patrný model části šestidýzového okružního potrubí pro napájení vysokopádové Peltonovy turbíny [34].

Na aerodynamických tratích je výhodné realizovat automatizované měření parametrů proudu složitějších odbočnic, kde je vždy zpravidla vyžadován kompromis tvarový, tím i cenový, a 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) tak i na stabilitu vlastního přiváděče. Ukázky modelů odbočnic pro hydraulické okruhy VD Marun v Iránu jsou na obr.10 [45].

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 [1, 18, 29, 37, 40].

Aerodynamické modelování je také využíváno ke zkouškám uzávěrů, jejichž součástí 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). Přepočtení na reálné dílo je nutné provést při použití obou modelových médií (voda nebo vzduch). Na základě zpracovaných systematických zkoušek byla vypracována metodika výpočtu přitěžovacích sil na tabulové uzávěry. Byl vytvořen a ověřen model potenciálního proudění (pro tabule s těsněním „po vodě“) [17, 43, 45], který vykazuje v oblasti zatěžovacích maxim dobrou shodu s výsledky fyzikálních modelů (vodních i aerodynamických) a s realitou.

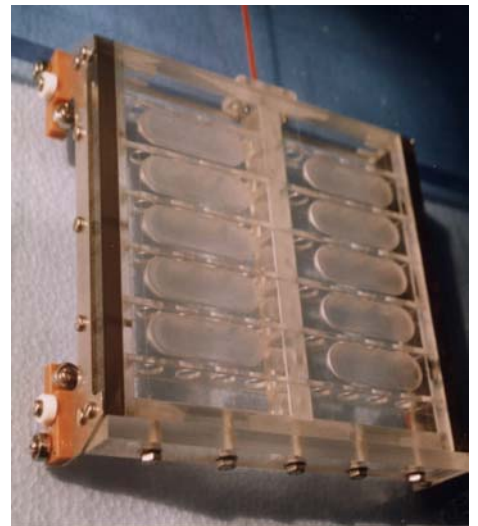
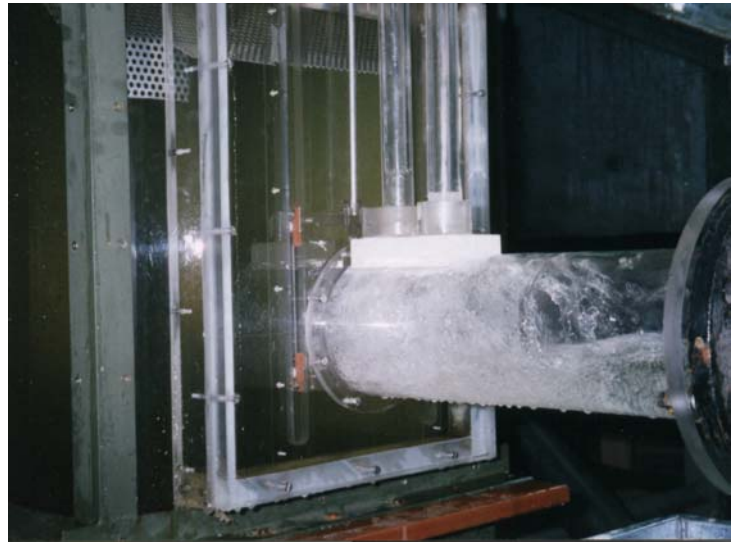
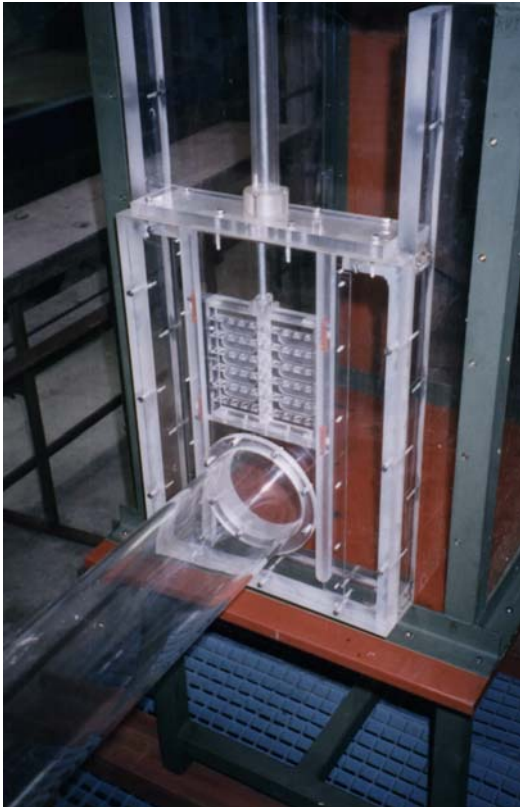
U přechodových jevů vznikajících při manipulaci s uzávěry hydraulických okruhů nelze zanedbat účinky objemových sil. Zkoušky musejí být prováděny na hydraulických modelech při dosažení přibližně modelové podobnosti, kdy lze simulovat proudové okrajové a počáteční podmínky s vysokou mírou spolehlivosti a výstižnosti. Příklad tohoto výzkumu pro tabuli s těsněním povodním ve vtokovém kruhovém profilu je uveden na obr. 11.



**Obr. 9** Výzkum proudění v profilech šestidýzového okružního potrubí Peltonovy turbíny – zkoušky na aerodynamické trati s úplnou automatizací pohybu sondy



**Obr. 10** Výzkum proudových poměrů v systému odbočnic na odtoku z VD Marun v Iránské republice – aerodynamický model



**Obr. 11 Modelování přechodových jevů při manipulaci s čelně umístěnými tabulovými uzávěry ve vstupních profilech potrubí kruhového průřezu; pohled na reálnou a modelovou tabuli**

Dispoziční komplikované podmínky při rekonstrukci PVE Štěchovice si vynutily pro potlačení nežádoucích namáhání původního potrubí a zajištění „hladké“ dynamiky reverzní turbíny realizaci vyrovnávací komory se škrticí clonou. Clona je umístěna mezi dvěma kolenovými velmi blízkými oblouky (řešení vyvolala nutnost nízké minimální hladiny v komoře při rozjezdu stroje). V těchto extrémně prostorově komplikovaných podmínkách bylo rychlé a operativní stanovení včetně „doladění“ tvaru clony v potrubí aerodynamickým modelováním jediným ekonomicky i termínově vhodným řešením [32].

## 4.2 MĚŘENÍ NA HYDROTECHNICKÝCH DÍLECH

Při fyzikálním modelování využíváme zpravidla takového modelového kritéria, které zaručuje zachování vazby mezi dominující silou ovlivňující proud a silou setrvačnosti pro model a dílo. Jestliže toto kritérium s dominující silou nelze v celém provozním rozsahu díla nalézt, je nutné provádět zkoušky na modelu v omezeném provozním rozsahu nebo na zcela zvláštních a finančně náročných modelových sestavách. 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.

Závěrem této kapitoly budou vzpomenuty některé názorné atypické případy ověřovacích zkoušek na dílech, které umožnily porovnat a doplnit výsledky získané modelováním (zpravidla fyzikálním) v naší laboratoři.

Problematika tvorby vtokových vírů je jednou z nejobtížnějších oblastí modelování (matematického i fyzikálního). Pomocí výsledků fyzikálních modelů byly vyřešeny úpravy předpolí vtoků malých i velkých hydroenergetických celků. Tyto ověřovací zkoušky potvrdily oprávněnost používat k modelovým přepočtům v definované oblasti Froudova kritéria modelové podobnosti s přihlédnutím k omezující podmínce minima průměru potrubí. Tímto způsobem byla odstraněna i havarijní situace na reverzním vtoku dolní zdrže PVE Štěchovice, zde byla úprava proudových poměrů realizována dodatečně zaberaněným systémem ponořených usměrňovacích stěn [38], obr.12.

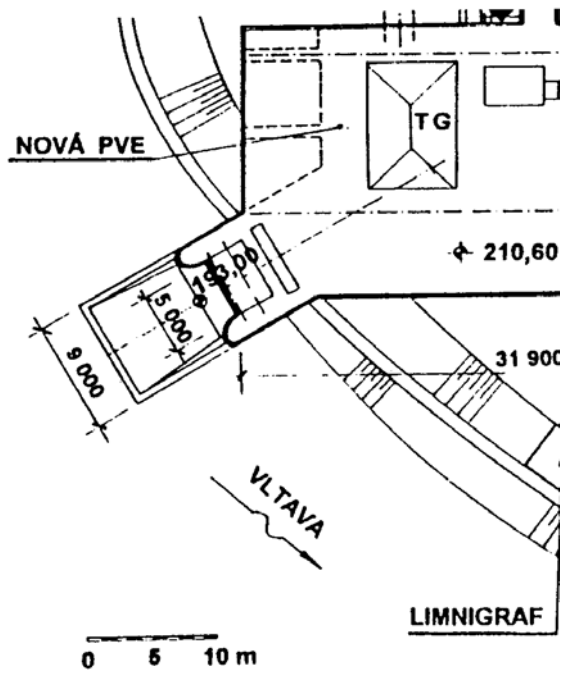
Prozdušněný proud a proudová tříšť jsou případy, kdy ze zmenšených modelů využitím běžných přepočtových postupů přesně výsledky na dílo transformovat nelze. Pro získání přepočtových zásad slouží právě měření na díle [24, 33]. Množství přisávaného vzduchu je měřeno mikrovrtulkou hydrometrovacím způsobem. Ukázky z měření průtoku přisávaného vzduchu na dílech jsou na obr.13.

Zvláštního způsobu usměrnění proudu a snížení jeho kinetické energie bylo využito na spodních výstupech VD Morávka, Mostiště případně i Mohelno. Řešení bylo realizováno na základě výsledků řady modelových zkoušek. Výtokový proud z rostřikovacích uzávěrů nabývá po usměrnění do jisté míry zčásti charakteru vodní tříště. Ke spolehlivému potvrzení a převzetí výsledků modelových zkoušek posloužilo doplnění ověřením na díle [24, 33].

Komplikovaná je též podobnost při sledování chování na hladině plovoucích ledových ker nebo ropného derivátu vtokovými víry případně víry vznikajícími při podtékání norných stěn. Bez ověření na díle nelze potvrzení závěrů modelových zkoušek pro účinné ochrany proti proniku vtažením či podplutím spolehlivě provést [31, 38].

Součinnost matematického a fyzikálního modelování lze dokladovat při řešení nestacionárního proudění v hydraulickém okruhu PVE Štěchovice [32]. Bez této součinnosti, kdy fyzikální aerodynamický model upřesnil a potvrdil řešení odporové clony na vstupu do vyrovnávací komory, by nebylo řešení ekonomické a spolehlivé. Porovnání shody výsledků umožnily provozní zkoušky, které současně potvrdily spolehlivost obou doplňujících se modelových přístupů.





Obr. 12 Vznik vtokových hladinových vírů v předpolí dolního reverzního vtoku PVE Štěchovice – provozní zkoušky



**Obr. 13** Měření průtoku vzduchu přisávaného do komor rozstříkovacích uzávěrů VD Slezská Harta, Vír, Šance za účelem stanovení součinitele provzdušnění reálného proudu  $\beta = Q_a/Q$

Odstranění nízkofrekvenčních polohových nestabilit pohyblivé válcové hradicí konstrukce jezu Doksany bylo způsobeno mimo jiné též nezavzdušněním prostoru pod válcem. Navržené úpravy konstrukce byly spolehlivě ověřitelné (vzhledem ke složité kmitající hydrodynamické soustavě) pouze při manipulaci s konstrukcí [20, 26].

Závěrem této kapitoly, zmiňující se o ověřování parametrů přímo na dílech, lze doplnit jednu zvláštní metodu využívající analogii mezi prouděním vody a vzduchu.

Během výstavby elektrárenské štolý došlo ke změně postupu. Vzhledem ke kompaktnosti skály, v níž byla štola délky 900 m ražena, bylo upuštěno od betonování obezdívky. Bylo nutné za situace při zvětšené ploše průřezu (výrubu) a ponechaném povrchu stanovit odpovídající jeho vyšší drsnost. Tato drsnost (součinitel ztráty třením) byla stanovena na díle při vhánění vzduchu kompresorem (průřezová rychlost  $v \sim 2,90 \text{ m.s}^{-1}$ ). Zkouška byla provedena v žádomím pásmu kvadratického odporu ( $Re = 810 \cdot 10^3$ ).

V mnoha případech, kdy je výroba geometricky zmenšeného modelu nereálná z hlediska proveditelnosti a dodržení rozměrů nebo finančně velmi nákladná, případně kdy zásady modelové podobnosti neumožňují použití zmenšeného modelu pro přepočet na skutečnost, je nutné realizovat měření na vlastních dílech. Tímto způsobem byla prováděna měření v biomedicínské problematice (náhradní okruhy pro dopravu krve, výzkum umělých srdečních chlopní), což jsou samozřejmě příklady našich měření mimo vlastní obor hydrotechniky.

V rámci prezentace možností měření rychlostí proudu možno uvést příklad extrémní, kdy byly úspěšně měřeny rychlosti proudu v jedné kapiláře umělé ledviny. Vnější průměr kapiláry 0,25 mm neumožňuje kontaktní způsob měření rychlosti. K tomuto účelu bylo využito LDA s fixací proniku svazků do osy jedné kapiláry.

Ve skutečných poměrech bylo prováděno též měření charakteru výstupního kmitajícího proudu z trysky do volné atmosféry. Využívá se samobuzené kmitání hydrodynamickým účinkem proudu v případech široké plochy či linie dopadu paprsku při zachování maximální úrovně dynamického tlaku. Vlastní měření bylo prováděno metodou PIV.

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 splňuje a garantuje „úřední měření“.

„Úřední měření“ realizuje autorizovaná organizace prostřednictvím úředních měřičů, při použití postupů a měřicí techniky určených v přílohách „Autorizační listiny“.

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 nejistoty. V případě okruhů s volnou hladinou je využívána klasická hydrometrická vrtule, u okruhů tlakových je to opět hydrometrická vrtule a, v případě naší autorizované laboratoře, i LDA.

#### **4.3 UKÁZKA POROVNÁNÍ VÝSLEDKU MATEMATICKÉHO A FYZIKÁLNÍHO MODELU**

Pro matematické modelování jevů v hydrotechnice byly využívány v závislosti na možnostech výpočetní techniky nejprve modely založené na řešení potenciálního proudění (ideální kapaliny) a následně modely simulující proudění s viskozitou. Využití jednorozměrných řešení předcházelo případům rovinným a prostorovým opět v závislosti na možnostech výpočetní techniky.

Nástupem bezkontaktních metod s úplnou automatizací postupu měření bylo umožněno provádět detailní („mikrostrukturální“) kalibraci a verifikaci v měrných bodech zájmových protékavých oblastí. Daný způsob umožňuje měřit přesné bodové charakteristiky (zejména LDA princip jako měřidlo absolutní rychlosti). Způsob je využíván pro precizní kalibraci jevů s ustáleným prouděním, který je řešen matematickým modelem využívajícím časově středovaných Navier-Stokesových rovnic. Přesné měření LDA metodou je využíváno i u zcela periodických jevů. Kontaktními metodami nelze v případech těchto proudových a prostorových poměrů měření provádět.

Jistou vrcholovou velmi potěšitelnou shodou mezi výsledky měření a matematického modelování periodického proudění s dominantním polohově rotujícím vírem souborem FLUENT je následující ukázka výsledků měření, které bylo provedeno synchronizovaně s otáčkovou frekvencí Francisovy turbíny v mimooptimálním režimu pod oběžným kolem v savce [13]. Matematický model však simuloval **nestacionární** proudění ideální kapaliny (využita Eulerova rovnice). Porovnání výsledků je předloženo na obr. 14, který zachycuje jeden okamžitý stav reality.

Nestacionární proudění reálné kapaliny je sledovatelné a tím i verifikovatelné pouze integrálními metodami. Při velikostech používaných modelů je schůdný a přesný pouze bezkontaktní princip. Zde přicházejí v úvahu uvedené metody PIV nebo UVP. Do jisté míry je využitelné i snímání fotografické nebo videotechnikou, zde však je problém přesně definovat polohu „světelné roviny“. Metoda bývá využita spíše pro pomalejší děje nízkých frekvencí.

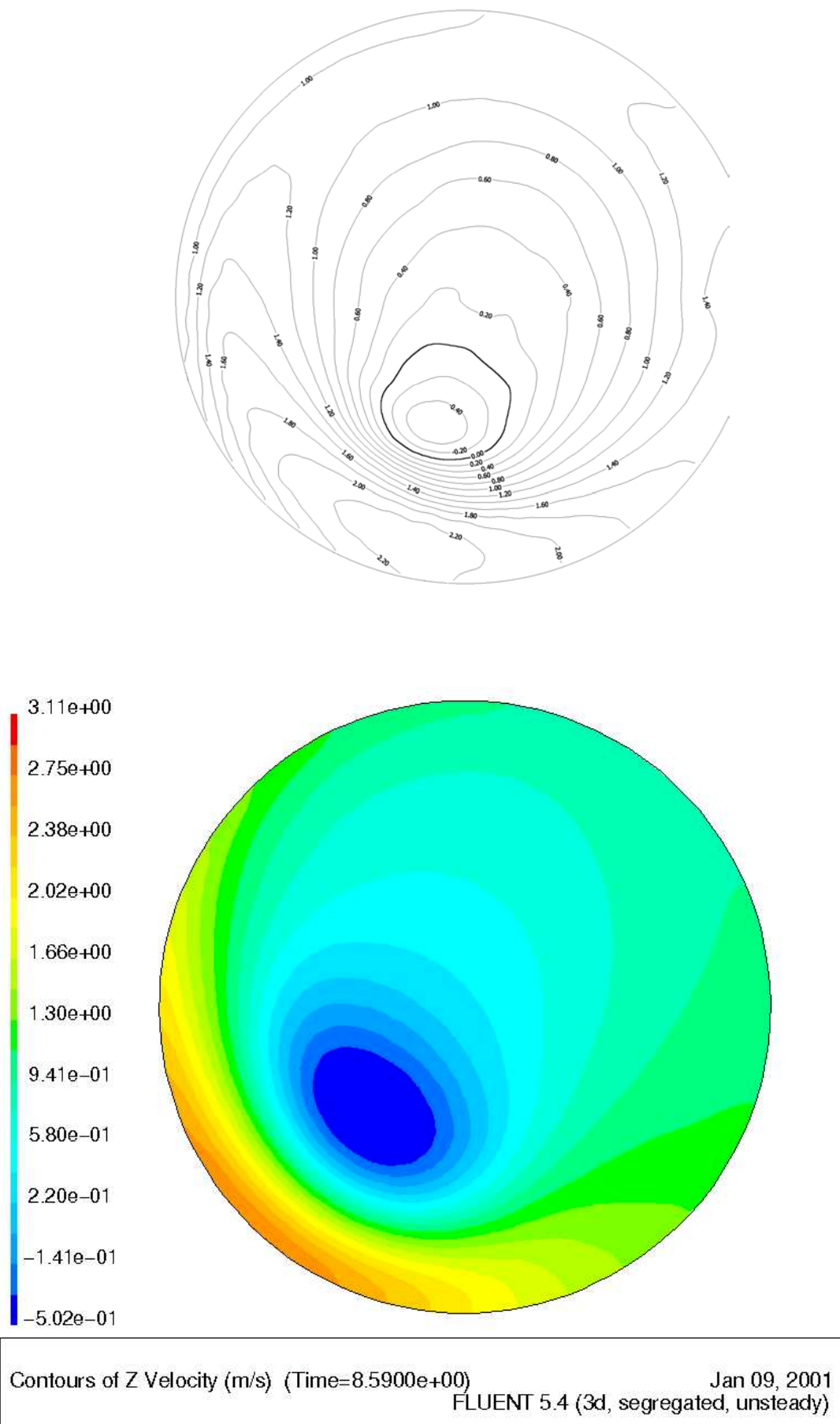
## 5 ZÁVĚR

Současná úloha fyzikálního modelování s přesným měřením hydraulických charakteristik při výzkumu složitých hydrotechnických objektů je v převážné míře dosud nezastupitelná. Tato doba je současně charakteristická pro rozvoj a zejména ověřování spolehlivosti matematických modelů složitých proudových podmínek odtržením mezní vrstvy od obtékaného povrchu s tvorbou výrazných vírových struktur. Modely, založené v převážné míře na řešení Navier-Stokesových rovnic, lze v současných ověřovacích fázích charakterizovat vyhledáváním odpovídající a spolehlivé definice funkční závislosti vlivu kinematické viskozity pro dané charakteristické případy obtékaných tvarů prvků a režimů proudu. Vhodné přístupy k modelům turbulence jsou předmětem mnoha současně řešených projektů základního výzkumu u nás i v zahraničí.

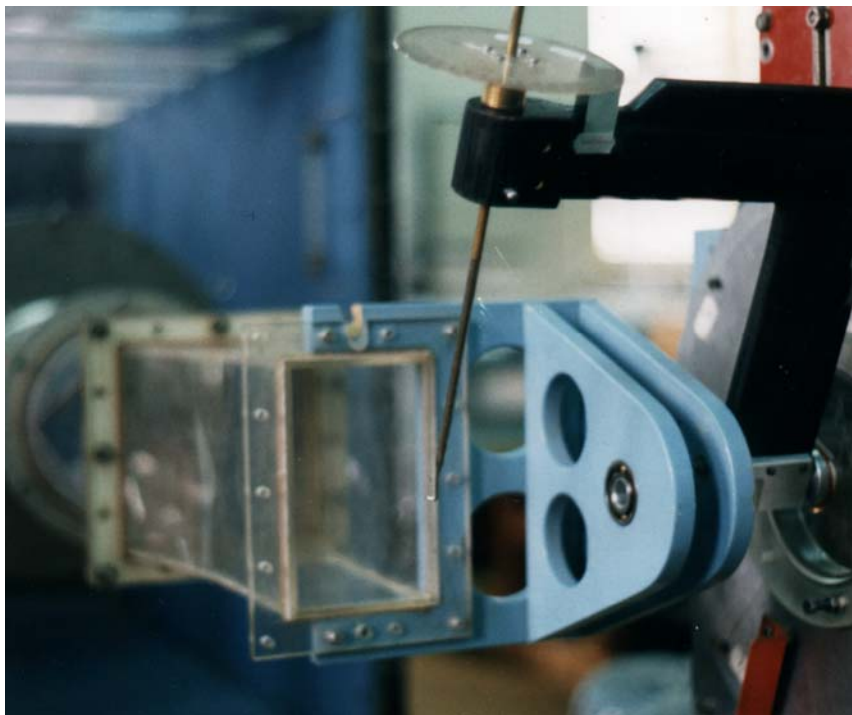
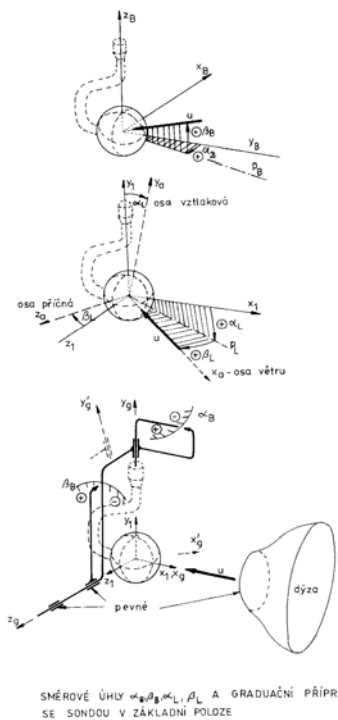
Po nalezení vhodných funkčních závislostí pro vliv viskozity a při dostupnosti počítačů nebo počítačích stanic požadovaných kapacitních a rychlostních parametrů bude převážná většina úloh hydrotechnické praxe s prouděním reálné kapaliny i v nestacionárním pojetí řešena matematickými modely.

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

Stále se zpřísnující podmínky v oblasti životního prostředí vynucují změny přístupů ke sledování a monitorování ve vodohospodářské praxi. Tyto změny jsou doprovázeny generováním nových zákonů, vyhlášek a nařízení, jejichž plnění vyžaduje přesné monitorování hydraulických a aerodynamických charakteristik v reálném čase. Vzhledem k tomu, že ve sféře životního prostředí jsou realizovány i úplaty za znečišťování ovzduší a vod (vypouštění vod do vod povrchových), jsou na přesná a spolehlivá měření kladeny vysoké nároky. Fakturační, kontrolní a arbitrážní činnost v oblasti měření veličin může být realizována, pokud nedojde k dohodě mezi oběma stranami, výhradně subjekty autorizovanými případně určenými ze zákona (Český metrologický institut).



Obr. 14 „Zmražený“ okamžitý stav nestacionárního víru v savce Francisovy turbíny při mimoprovozním režimu, LDA metoda a model FLUENT 5.4 (ideální kapalina)



**Obr. 15** Kalibrace víceotvorových tlakových sond – definované prostorové pozice vzhledem k nabíhajícímu proudu



**Obr. 16** Kalibrace vestavbové konstrukce s ostrohranným složeným přelivem na hydraulickém žlabu a jeho následné umístění ve štolě VD Morávka pro sledování průtoku prosáklé vody (součást monitorovacího systému TBD)



**Obr. 17** Měření průtoku vodní turbínou LDA metodou jako součást garančních a účinnostních zkoušek stroje v reálných podmínkách



**Obr. 18** Traverzační systém k posuvu měrného bodu napříč zájmovým prostorem (LDA systém, měření na zkušebně ČKD Blansko Engineering, a.s.)

Právě dlouhodobá systematická spolupráce laboratoří s ČMI umožňuje garantovat vysokou úroveň a spolehlivost měřicí techniky v oblasti stanovených i pracovních měřidel včetně nových odpovídajících měřících a vyhodnocovacích postupů [15, 16, 21, 35, 39, 41, 42], obr. 15.

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“ [19, 30].

Nedílnou součástí moderních postupů a měřicí praxe v autorizovaném či akreditovaném pojetí musí být ve vysokoškolských laboratořích i školící a osvětová činnost v dané oblasti [25].

Například v naší laboratoři, která je autorizovaným subjektem pro oblast měření průtoků a proteklého objemu, probíhají již od roku 1997 výšeuvedené technické zkoušky nových druhů měřidel, školicí činnost pro nové úřední měřiče a odborná část autorizačních zkoušek. Dva pracovníci jsou členy certifikačního orgánu ČMI v oboru měření průtoku tekutin.

Trvalé monitorování vybraných hydraulických veličin v oblasti životního prostředí vyžaduje legislativa od znečišťovatelů a odběratelů vod (spodní hranice zpoplatněných limitů je určena vyhláškami). V praxi tato povinnost znamená zajistit korektní a spolehlivý systém monitoringu sledovaných veličin prokazatelně navázaný na etalon vykazované veličiny.

Technicko-bezpečnostní dohled nad vodohospodářskými díly je součástí provozních opatření důležitých hydrotechnických děl. Periodická přesná měření (mnohdy časově kontinuální – např. tlaky, průsaky) jsou prováděna jak vlastními provozovateli hydrotechnických děl, tak nezávislými kontrolními orgány [22, 23, 27,44], obr. 16.

Unikátní vybavení špičkovou měřicí a vyhodnocovací technikou kontaktního i bezkontaktního typu včetně týmů zkušených pracovníků hydraulických laboratoří s největší pravděpodobností vyvolá při očekávatelném budoucím transformačním procesu „rozšíření pracovních aktivit“ v oblasti měření hydraulických veličin. Již dnes jsou měření vybraných hydraulických veličin prováděna v oblastech hydroenergetických strojů, biomedicínské praxe, zemědělství, chemického, plynárenského a automobilního průmyslu včetně inženýrského stavitelství, viz obr. 17, 18.

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 (zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii ve znění pozdějších předpisů).



## 6 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 relayed 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 [15, 16, 21, 35, 39, 41, 42], Fig.15.

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 [19, 30].

The university – type laboratories active in the field of authorization and accreditation must also organize the corresponding teaching and PR activities [25].

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 [22, 23, 27, 44], Fig.16.

The availability of top – level measuring and evaluation systems served by a team of experienced personnel will undoubtedly result in an increase of demand for measurements of hydraulic values. Selected measurements of this type are currently made in the branches of hydro - energy, biomedicine, agriculture, chemistry, gas and automobile industries, as well as in structural engineering, see Figs. 17, 18.

Temporary teams of specialists from many branches will be set up to solve both basic and applied research problems with part of these specialists coming from the measurement technology branch. Their standing may be underlined by the authorization or accreditation of their mother organizations under the Metrology Act No.505/1990.

## 7 POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA

- [1] Albring, W.: *Angewandte Strömungslehre*. Theodor Steinkopf Verlag, Dresden, 1970
- [2] Czibere, T.: Über die Beregnung der Schaufelprofile und der Strömung um die Schaufeln von Strömungsmaschinen. *Ing. – Arch. Zeitschrift*, 33/64, Leipzig, 1964
- [3] Durst, F ; Rastogi, A.K.: *Theoretical and experimental investigations of turbulent flow with separation, Turbulent Shear Flows I*. Springer Verlag, Heidelberg, 1979
- [4] Glauert, H.: *Die Grundlängen der Tragflügel und Luftschraubentheorie*. Berlin, 1929
- [5] Habán, V.; Pochylý, F.: Nestacionární laminární rychlostní profil. XII. Mezinárodní konference „Aplikácia experimentálnych a numerických metod v mechanike tekutin“, Rájecké Teplice, 2000, str. 38 – 43
- [6] 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
- [7] Kratochvíl, J. ; Ženíšek, A.: Algoritmus řešení dvojrozměrného okrajového problému nevířivého proudění stlačitelné tekutiny metodou konečných prvků. *Vodohosp. časopis* 25, 1977, č.4
- [8] Kratochvíl, J.: Řešení dvojrozměrného proudění vazké kapaliny popsané Navier-Stokesovými rovnicemi metodou konečných prvků. *Vodohosp. čas.* 26, 1978, str. 92 – 112
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Zubík, P.: Aplikace měřicí metody PIV. XII. Mezinárodní konference „Aplikácia experimentálnych a numerických metod v mechanike tekutin“, Rájecké Teplice, 2000, str. 246 – 251
- [13] Zubík, P.: LDA měření nestacionárního proudového pole. XVII. Sympozium o anemometrii, Úvaly, 2001
- [14] Zubík, P.: Možnosti měření a zhodnocení reálných proudění. Teze disertační práce, ÚVV – FAST – VUT v Brně, 1997

## SOUVISEJÍCÍ PUBLIKACE AUTORA (VÝBĚR ZE 172 PUBLIKACÍ)

- [15] Šulc, J.: Měření průtoku dle současné legislativy. *SOVAK* č. 3/2000, str. 18 – 22
- [16] Šulc, J.: Současné legislativní požadavky na provozní způsobilost instalovaných systémů pro měření průtoku odpadních vod. *Sborník přednášek ze semináře “Nové metody a*

- postupy při provozování ČOV.”, VHOS, a.s. Moravská Třebová, duben 2000, ISBN 80 – 86020 – 27 – 4, str. 1 – 8
- [17] Šulc, J., a kol.: Hydrodynamic Loads Acting on a Slide Gate. Sborník Workshop 96, VUT v Brně, str. 349 - 350 (Fluid Mechanics)
- [18] Šulc, J.: Výzkum výtokového objektu dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně. Výzkumná zpráva, VVÚVSH-VUT v Brně, 1982
- [19] 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
- [20] Šulc, J.: Hydraulické řešení nástavby válcových konstrukcí pro zvýšení vzdutí jezu Doksany na Ohři. Výzkumná zpráva ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1998
- [21] Šulc, J.: Měrné objekty pro extrémně rozkolísané průtokové poměry v systémech s volnou hladinou. Sborník z 15. symposia o anemometrii – Úvaly u Prahy, 1998, NOEL 2000
- [22] Šulc, J.: Měrné vestavbové žlaby pro stanovení průtoků umístěné v injekční štole VD Morávka (bloky č. 11, 22, 24). Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, 1999
- [23] Šulc, J.: Měrné žlabové vestavby pro stanovení průtoků prosáklé vody odvodňovacími systémy VD Šance. Výzkumná zpráva, LVV-FAST-VUT v Brně, 2000
- [24] Šulc, J.: Měření průtoků přísávaného vzduchu do komor rozstřikovacích uzávěrů spodních výpustí VD Slezská Harta. Výzkumná zpráva, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1997
- [25] Šulc, J.: Metodická příručka pro prověřování odborné způsobilosti právnických nebo fyzických osob (měřících skupin) k výkonu měření průtoků a posuzování funkční způsobilosti měřidel pro realizaci zákona č.58/1998 Sb. Metodická příručka, LVV – FAST – VUT v Brně, 1999
- [26] Šulc, J.: Odstranění polohových nestabilit tělesa jezového stupně Doksany na Ohři. Výzkumná zpráva, ÚVV-VUT v Brně, 1997
- [27] Šulc, J.: Ostrohranné přelivy v měrných profilech šachtice a sběrného příkopu pro stanovení průtoků prosáklé vody (součást monitorovacího systému VD Morávka). Výzkumná zpráva, ÚVV – FAST – VUT v Brně, 1999
- [28] Šulc, J.: Poznatky z automatizovaného měření charakteristik proudu na aerodynamických modelech. Jemná mechanika a optika, 6/1987, str. 181-185
- [29] Šulc, J.: Příspěvek k řešení hydraulických tvarů reverzních vtoků a výtoků včetně předpolí. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně, 1984
- [30] 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
- [31] Šulc, J.: Stanovení bezpečné hloubky ponoru vtoku proti vnikání ledových ker. Sborník HYDROTURBO 87, Trenčín 1987
- [32] Šulc, J.: Stanovení průměru clony ve spojovacím potrubí k vyrovnávací komoře PVE Štěchovice (modelový výzkum). Výzkumná zpráva, ÚVV - FAST-VUT v Brně, 1995
- [33] Šulc, J.: Stanovení součinitele zavzdušnění u rozstřikovacích uzávěrů VD Mostiště a VD Vír. Výzkumná zpráva ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1997
- [34] Šulc, J. a kol.: Proudění v odbočnicích okružního potrubí šestidýzových Peltonových turbín. Výzkumná zpráva, VVÚ VSH – VUT v Brně, 1991
- [35] Šulc, J.: Ultrazvukové metody měření SOVAK, č.2, 1997, str. 19-20
- [36] Šulc, J.: Vlastnosti systému žárové anemometrie pro měření směrů vektorů rychlosti proudu vzduchu. Jemná mechanika a optika, č. 10, 1984, str. 273 – 277
- [37] Šulc, J.: Vliv tvaru stěn na hydraulickou funkci plochého difuzoru. Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně, 1992

- [38] Šulc, J.: Vyhodnocení účinnosti záchytné stěny před vtokem PVE Štěchovice. Výzkumná zpráva, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1997
- [39] Šulc, J.: Využití měřicí techniky a hydraulických laboratoří pro přesné a spolehlivé stanovení průtoků v měrných profilech. Sborník ze 16. Symposia o anemometrii a měření průtoků. FAST – VUT v Brně, 1999
- [40] Šulc, J.: Výzkum vtokového objektu horní akumulární nádrže PVE Dlouhé Stráně. Výzkumná zpráva, VVÚVSH-VUT v Brně, 1981
- [41] Šulc, J.: Zkušenosti měřicí skupiny z kontrol provozní způsobilosti systémů pro měření průtoku odpadních vod. Sborník seminářů “Vodohospodářské aktuality 2000”, Info – centrum HL, Praha, 2000
- [42] Šulc, J.: Vestavbové objekty pro měření rozkolísaných průtoků v kanálech a potrubích s volnou hladinou. Sborník z Regionální konference o čištění odpadních vod z malých zdrojů, 1998, TŘEŠŤ, str. 22 – 24
- [43] Šulc, J.; Haluza, M.: Výpočet hydrodynamického přetížení dolního obtékaného povrchu tabulového uzávěru s těsněním po vodě. Výzkumná zpráva grantu, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1996
- [44] Šulc, J.; Hlaváček, J.: Měrné ostrohranné přelivné vestavbové konstrukce na svodné kanálky prosakující vody v revizní štolě VD Želivka. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně, Brno, 1999
- [45] Šulc, J.; Jaroš, F.: The Bottom Outlet Twin Gate Marun. Výzkumná zpráva, ÚVV-FAST-VUT v Brně, 1994