

Rozvoj bezkontaktních optoelektronických měřicích metod v hydromechanice

Metody výzkumu

Modelování představuje jednu z důležitých cest poznání. Při použití tohoto způsobu poznáváme objekt (prototyp) prostřednictvím sledování jeho modelu. Je nutné nalézt a 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 fyzikální.

Modelování lze definovat jako zobrazování objektů a jevů na nich probíhajících matematickými nebo 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 vesměs o kontinuální, popř. diskrétní 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.

Matematické modelování je určeno pro sledování analýzy 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.

Metody měření rychlosti proudění tekutin

Měření rychlosti proudu – kontaktní metody

Rychlost proudu kapalin je hydraulická veličina, jež 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 $u = (0,1 \div 10,0) \text{ m.s}^{-1}$. 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 m.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 ($u > 1 \text{ m.s}^{-1}$) 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.

Společnou vlastností těchto sond je, že musejí být orientovány pro přesné měření s relativně malou odchylkou $\pm (5 \div 15) \%$ v závislosti na úpravě čelního otvoru od natékajícího proudu. Pokud vyloučíme možnost velmi složitého prostorového natáčení sondy, lze polohu osového natékání čelního otvoru nalézt a stabilizovat velmi obtížně.

Moderní způsob měření velikosti případně dvou nebo tří složek vektoru rychlosti využívají **žhavené sondy** (žárové) [3,5].

Princip metody žárové anemometrie je naznačen v mezinárodně používaném názvu „Constant Temperature Anemometry“ (CTA). Příslušný element sondy je nahříván na poměrně vysokou teplotu protékajícím elektrickým proudem. Rychlost média je odvozována od změn odporu nahřívajícího elementu, který se výrazně mění v závislosti na intenzitě ochlazování nažhaveného elementu proudícím médiem. Řídící elektronické zařízení má tedy za úkol stabilizovat sondu na neměnné teplotě.

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

Společnou vlastností těchto kontaktních měřicích metod je umístění (kontakt) měřícího elementu v mediu. Tato skutečnost způsobuje jisté omezení možnosti zmenšení modelovaného proměřovaného protékaného prostoru případně snížení přesnosti a spolehlivosti měřených rychlostí či jejich složek. Používané kontaktní metody neumožňují

korektní měření dynamiky proudu a okamžitých stavů (s výjimkou CTA v plynných mediích) či časový vývoj úplných rychlostních polí.

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 mikročastic. Pro oba popsane způsoby je možno 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. V dolní části obr.2 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 ϑ mezi paprsky a vlnové délce λ . 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 přímo úměrná složce rychlosti unášené částice v_x :

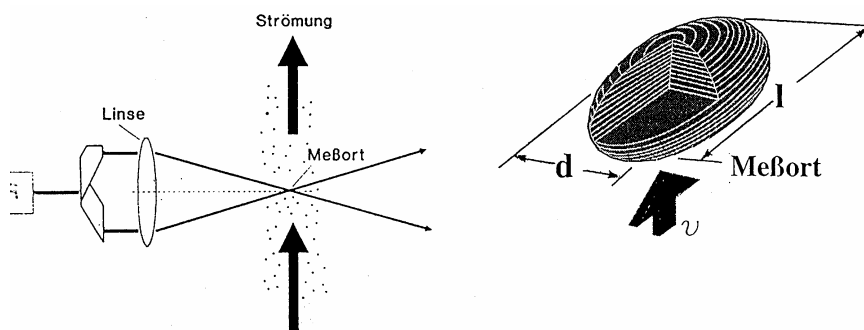
$$f_D = 2 v_x / \lambda \sin(\vartheta / 2). \quad (1)$$

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

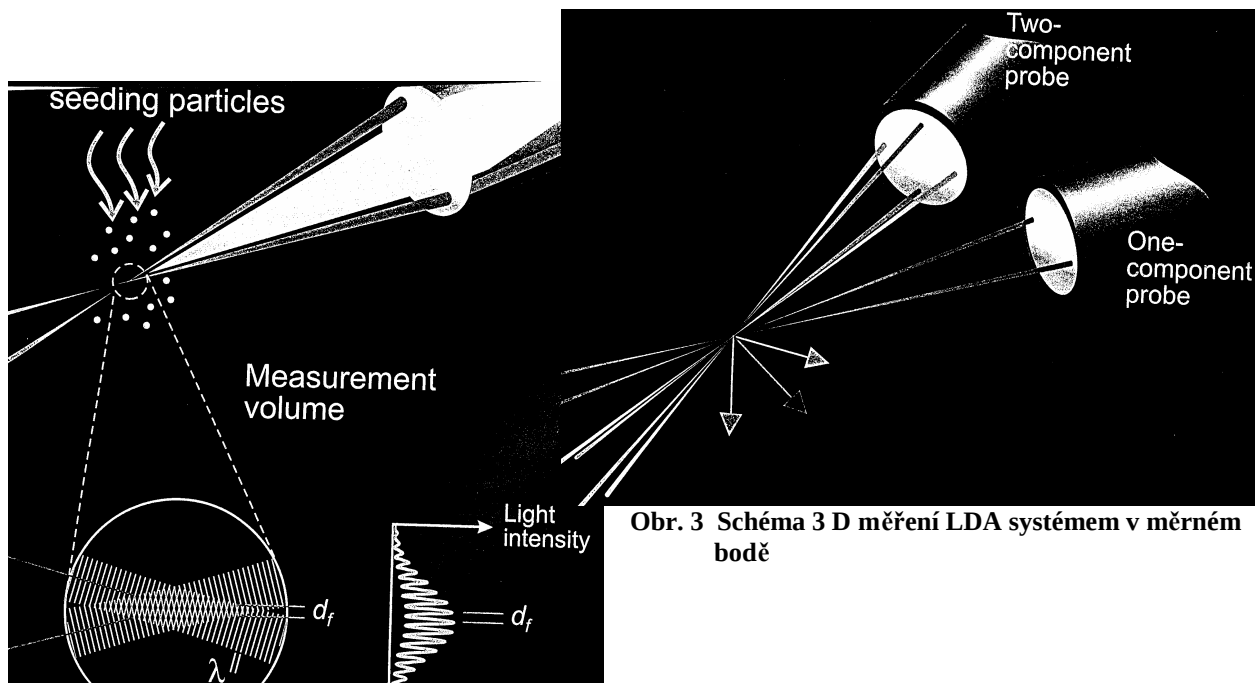
Popsaným způsobem je změřena a vyhodnocena velikost složky rychlosti (průmět vektoru rychlosti do roviny svazků laseru).

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 pootočená, zpravidla o 90° . Všechny čtyři paprsky se protínají v jediném bodě. Dvojice se navzájem liší vlnovou délkou světla (barvou). Na obr.4 je tato soustava. 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).

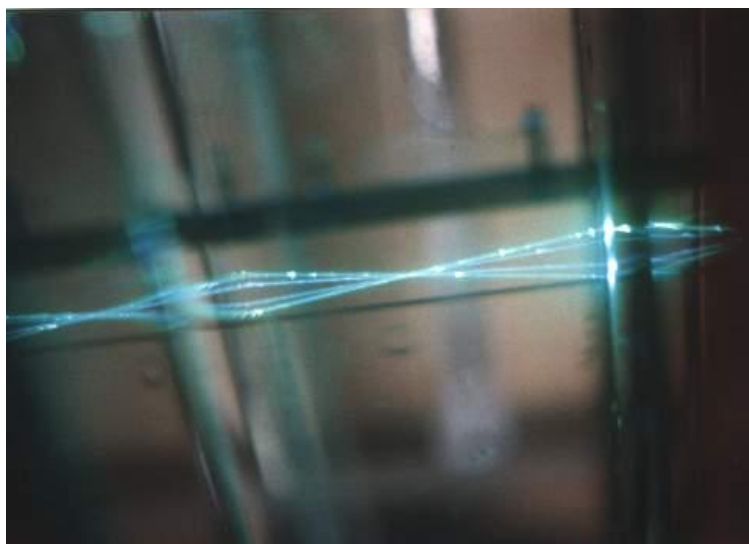


Obr.1 Schéma průniku svazku laseru; detail interferenčních rovin v měrném bodě



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

Obr. 2 Schéma pro výpočet složky rychlosti u LDA systému



Obr. 4 Dvousložkové měření dvoubarevným LDA systémem (svazky v proudu v protékaném prostoru)

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 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.

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 m.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 [7].

Díky tomuto bezkontaktnímu principu mohla být provedena řada měření, jež by byla jinými způsoby nerealizovatelná [4].

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 (traverse).

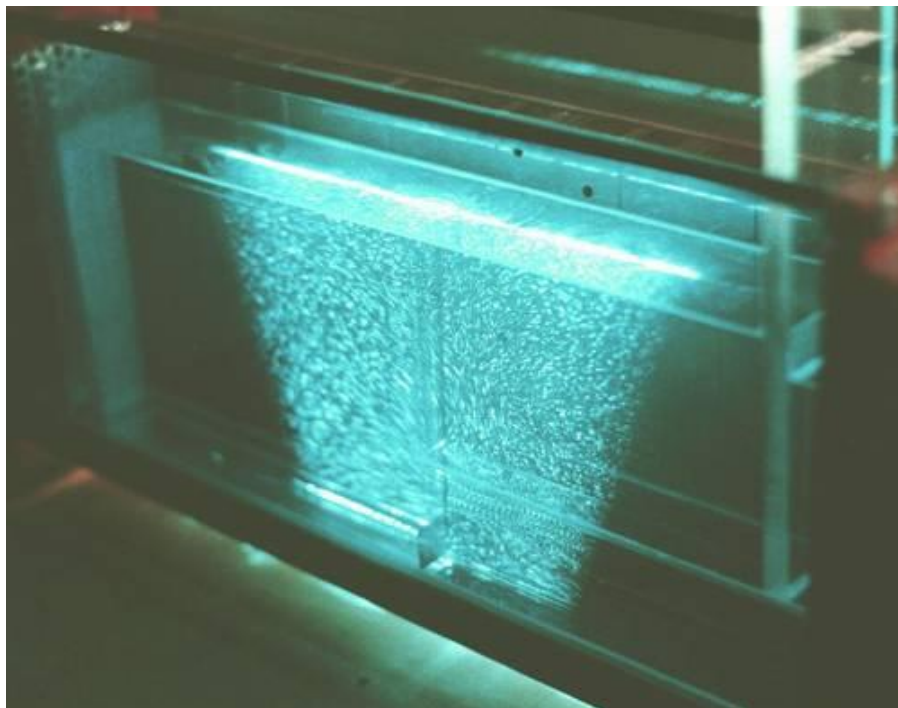
Měření rychlosti proudu – integrální metody

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 ($w = \text{konst}$).

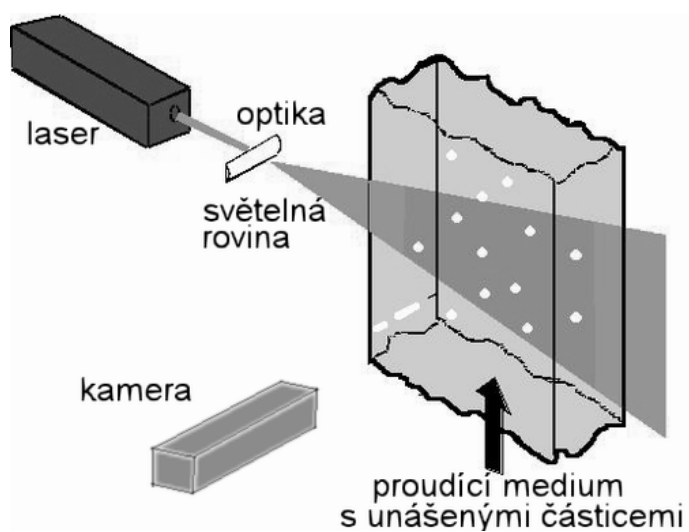
Proměření rychlostních parametrů metodou přemísťování měrného bodu je možné realizovat i při nestacionárním proudění, které však má dominantní periodický charakter. Takto jsou realizována například přesná měření na výstupech z oběžných kol vodních strojů nebo dokonce přímo v prostorách mezi statorovými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

Přesně zfázované 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 mimo optimálním režimu provozu s dominantním polohově rotujícím vírem [6].

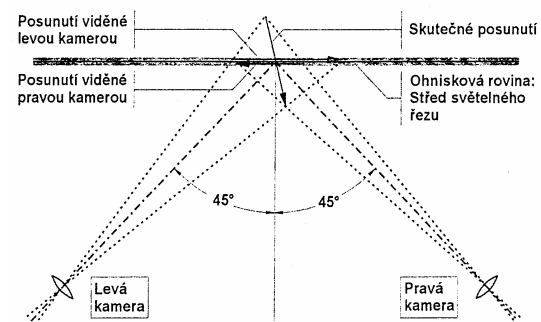
Prakticky před deseti lety se dočkala většího uplatnění metoda měření rychlosti pomocí obrazů částic – „Particle Image Velocimetry“ – PIV. Pro větší výstižnost je však vhodnější název **rovinná laserová anemometrie**.



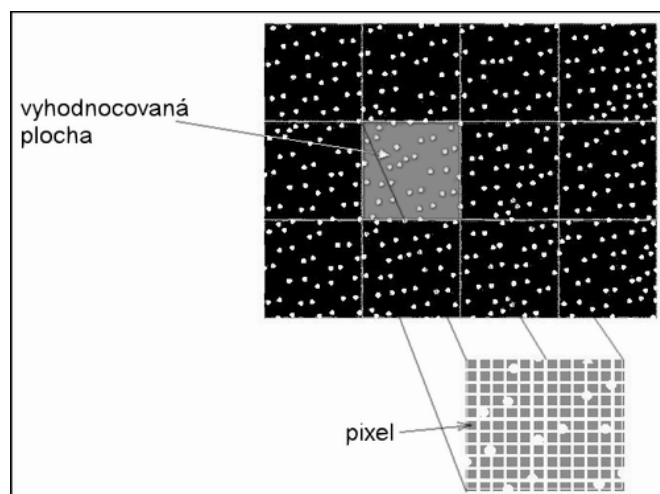
Obr.5 Laserový „světelný list“ v protékaném prostoru



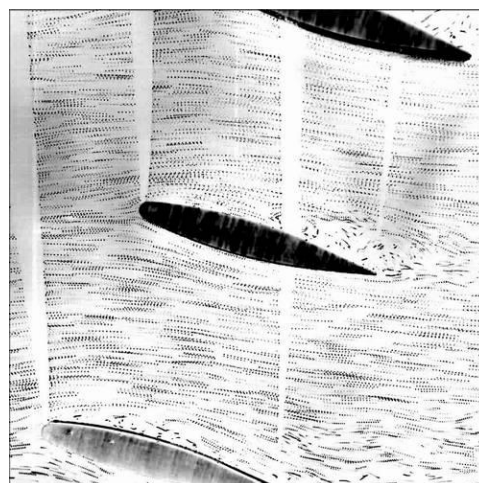
Obr.6 Základní uspořádání PIV – 2 D



Obr.7 Základní schéma PIV systému- 3 D

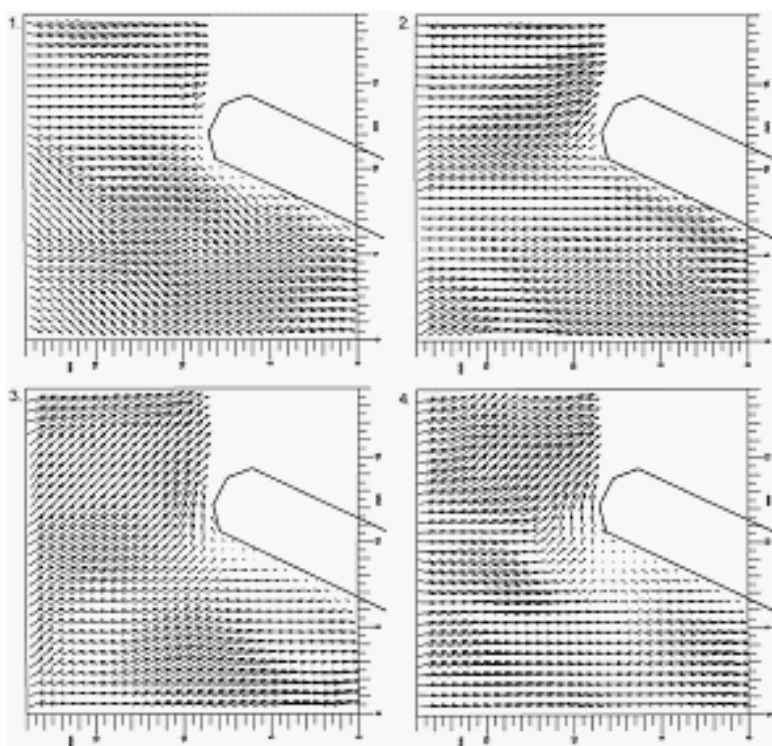


Obr.8 Záznam pozic odrazných částic – schéma; několikanásobný záznam z reálného měření

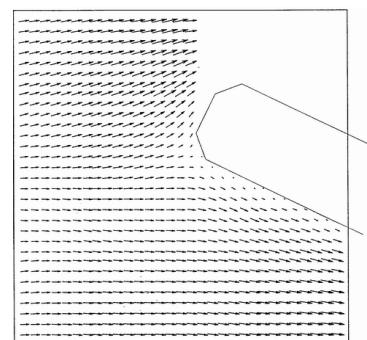




Obr.9 Souprava pro měření metodou PIV – Flow Map firmy DANTEC



Obr.10 Časová posloupnost okamžitých stavů rychlostního pole proudu natékajícího na pilíř



Obr.11 Časově střední obraz nestacionární situace

PIV je metoda měření rychlosti v celém dvourozměrném proudovém poli současně. Tato metoda vychází ze zaznamenávání poloh unášených částic. Sledovaná část proudícího média je určena průnikem oblasti osvětlované laserem a prostoru, jenž je v zorném poli záznamového fotoaparátu nebo jiného detektoru. K osvětlování se používá laserová stěna – tenký světelný list (obr.5) čímž je měřeno v tenkém „dvourozměrném“ prostoru proudu.

Vzhledem k významu metody je vhodné v úplné stručnosti charakterizovat postup získání rychlostního pole metodou PIV, který lze rozdělit na čtyři základní úkoly.

1. Nasycení měřeného proudu dostatečným množstvím vhodně velikých částic s nejlepšími možnými odraznými vlastnostmi a specifickou hmotností, pokud možno odpovídající měřené tekutině.
2. Osvětlení měřeného pole minimálně dvěma, případně více, záblesky laserového světla s nastavitelným a přesně známým časovým rozestupem. Stroboskopický jev umožňuje „zmrazení“ pohybu částic.
3. Zaznamenání několikanásobného obrazu nebo několika obrazů unášených částic (obr.6). Osa záznamového zařízení by měly být pokud možno kolmá na světelný list.
4. Zpracování záznamu. Základem je určení dílčích posunů unášených částic. K automatizovanému zpracování se používají metody autokorelace a vzájemné korelace, kterými je hledána typická opakující se frekvence jasu ve zvolených elementech obrazu (obr.8). K urychlení korelačních výpočtů se využívá rychlé Fourierovy transformace (FFT). Při známém zvětšení obrazu a času mezi záblesky laseru lze vypočítat rychlost. Výsledkem je potom vektorová mapa složek rychlosti promítnutých do měřené světelné roviny.

Metoda PIV je používána již mnoho let, jejímu širšímu uplatnění však bránila dříve používaná technologie a s ní spojené problémy. Byly to jak mokré chemický proces ke splnění výše zmíněného třetího úkolu, tak optické, optickodigitální nebo digitální postupy k provedení čtvrtého úkolu. Podrobný popis této problematiky je v [1,2]. Souhrnně řečeno, problémem byl příliš dlouhý čas mezi provedením měření a získáním výsledků. Zásadní obrat přišel v tomto desetiletí spolu s pokrokem v oblasti elektroniky. Příkladem, potvrzujícím toto konstatování, je měřicí komplet FlowMap (obr.9). Výrobek dánské firmy Dantec, zařízení FlowMap je stavebnicový systém k měření metodou PIV. Jádrem 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 (obr.10), 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.11.

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 [7].

Při snímání posuvu částic ve světelném „noži“ dvojicí kamer lze s použitím pulzního laseru zajistit 3D analýzu rychlostí proudu, schéma je patrné z obr.7.

Optoelektronické měřicí metody na FAST VUT v Brně

Ústav vodních staveb – Laboratoř vodohospodářského výzkumu (ÚVST – LVV) Fakulty stavební VUT v Brně vlastní v ČR unikátní měřicí techniku pro laserovou anemometrii. Díky mimořádnému vybavení a nepřetržité mnohaleté tradici v jeho obsluze je toto pracoviště opravdu „živé“ a pravidelně se na něj obracejí se svými požadavky na měření struktury proudu odborníci z výzkumu i praxe z oblasti mechaniky tekutin.

V roce 1973 byl pořízen laserový dopplerovský anemometr (LDA), čímž započala éra využívání optoelektronických systémů v hydromechanice. Na konci roku 1995 byl zakoupen další systém rovinné laserové anemometrie (PIV). V případech obou systémů a daných měřicích metod se jednalo o první pořízení a využívání v laboratořích a výzkumných pracovištích bývalého „východního bloku“. Obě zmiňované investice pořízené za přispění finančních zdrojů resortu školství a dále intenzivně doplňované, řadí současné pracoviště LVV ke špičkovým v dané oblasti. Měřicí systémy jsou též používány v těsné spolupráci s pracovišti Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a řady dalších výzkumných a vývojových institucí. Systémy PIV jsou v současné době v ČR na třech pracovištích. Na pracovištích stavební hydrauliky je investice daného typu jediná.

Laserová anemometrie v LVV se skládá ze dvou poměrně značně odlišných metod. První je, dnes lze již říci tradiční metoda, Laserová dopplerovská anemometrie a druhá je zatím relativně méně známá metoda Rovinná laserová anemometrie. Laserové anemometrické metody jsou bezkontaktní měřicí metody. Při použití obou těchto metod se na rychlost média usuzuje z rychlosti jím unášených mikročastic.

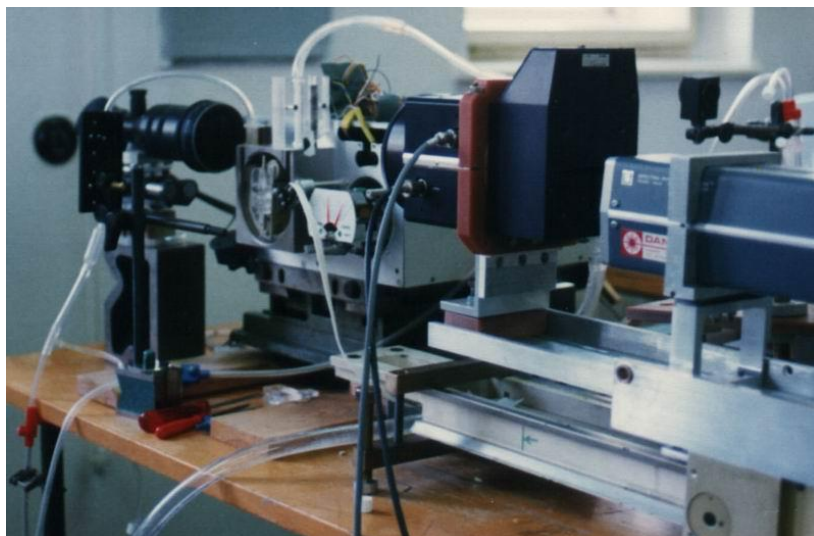
Některé z mnoha příkladů úspěšného použití laserových měřicích metod na pracovišti LVV, případně u externích zákazníků:

LDA

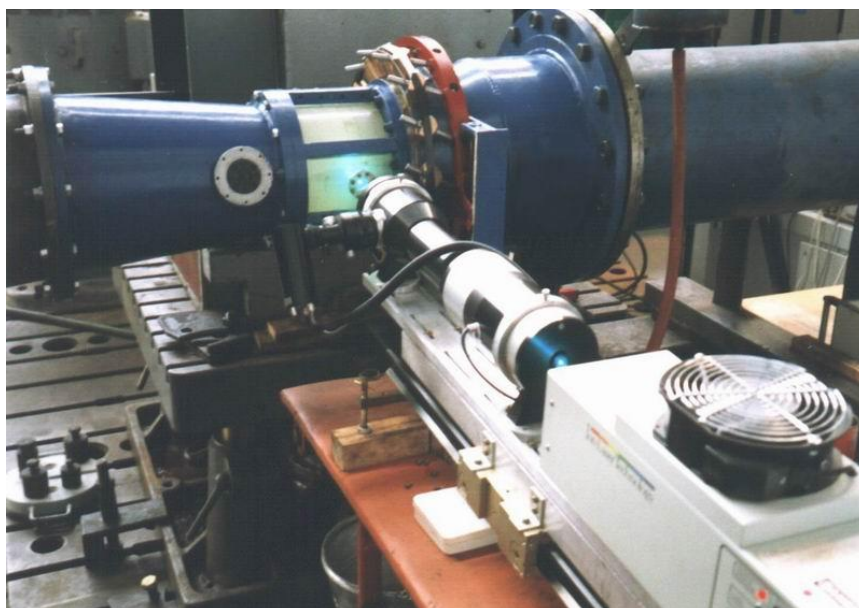
- časový vývoj rychlostního pole uvnitř plastové hadice, těsně za výstupem z krevního čerpadla pro dialýzu (obr.12),
- rozložení rychlostí na vstupu a výstupu z oběžného kola přímoproudé Kaplanovy turbíny (obr.13),
- rozložení rychlostí na výstupu z oběžného kola Francisovy turbíny a to v jeho časové proměnlivosti (obr.14),
- stanovení průtoku v tlakovém přivaděči malé vodní elektrárny v reálných podmínkách na díle (obr.15),
- měření rychlostního pole v prostoru přetékané hladinové klapky jezu (obr.16),
- kalibrace vodoměrných vrtulí (obr.17).

PIV

- sledování proměnlivosti rychlostního pole při podtékání soustavy norných stěn na modelu vodního toku (obr.18),
- časový vývoj rychlostního pole v okolí ostrohranné překážky - clony v potrubí, při změnách směru toku,
- sledování časové proměnlivosti rychlostního pole při obtékání lopatek v mříži hydroenergetických strojů,
- měření rychlostního pole v mezilopatkovém prostoru oběžného kola čerpadla (obr.19, 20),
- měření rychlostního pole uvnitř oscilační vlny,
- vizualizace proudění pod stavidlem (obr.21),
- sledování vzdušného líce prosakující sypané hráze (obr.22),
- verifikační měření v okolí oblouku čtvercového průřezu (obr.23),



Obr. 12 Měření časového vývoje rychlostního pole za výstupem z čerpadla pro umělý krevní oběh (dialýzu) laserovým dopplerovským anemometrem



Obr. 13 Měření rozložení rychlosti na vstupu a výstupu z oběžného kola přímoproudé Kaplanovy turbíny laserovým dopplerovským anemometrem



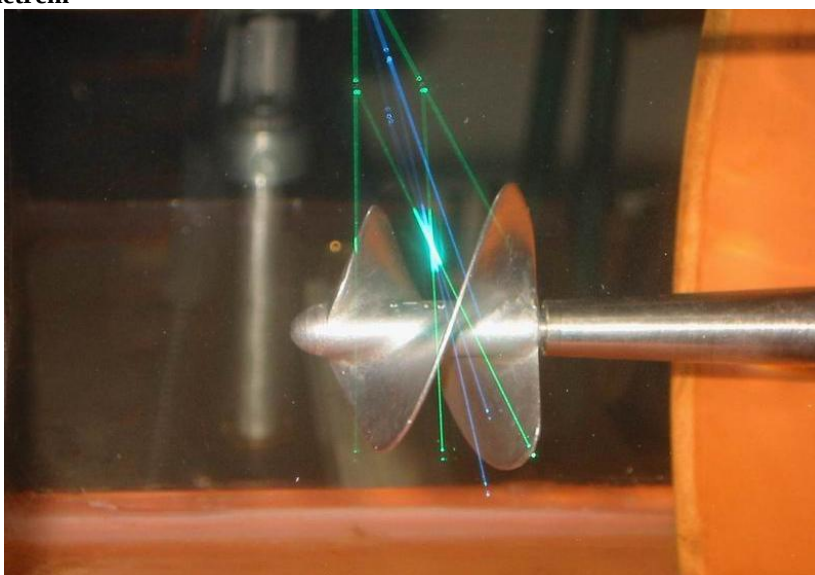
Obr. 14 Měření časového vývoje rychlostního pole s vírovým „copem“ na výstupu z oběžného kola Francisovy turbíny laserovým dopplerovským anemometrem



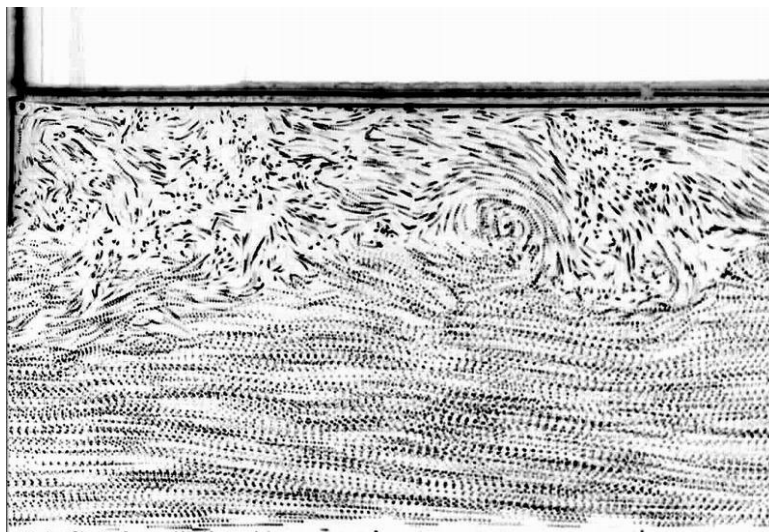
Obr. 15 Měření průtoku v tlakovém přiváděči MVE laserovým dopplerovským anemometrem pro stanovení účinnosti turbíny na díle



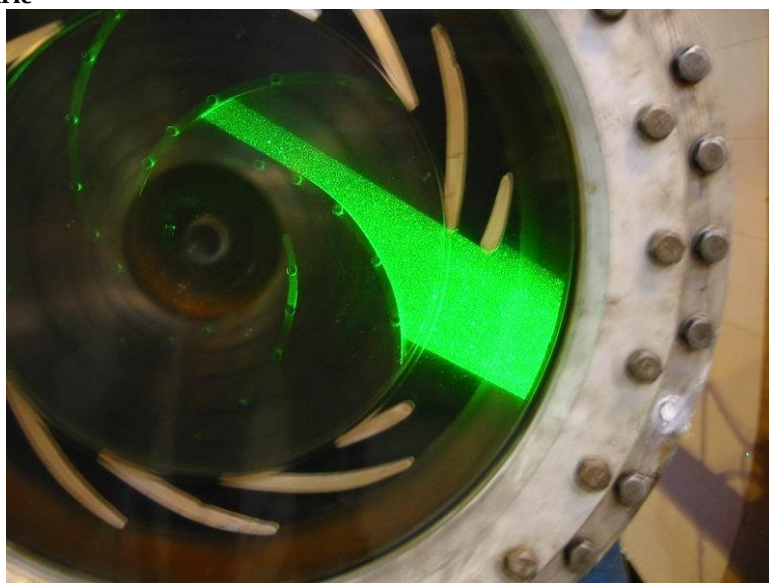
Obr. 16 Měření rychlostního pole v prostoru přetékané hladinové klapky jezu laserovým dopplerovským anemometrem



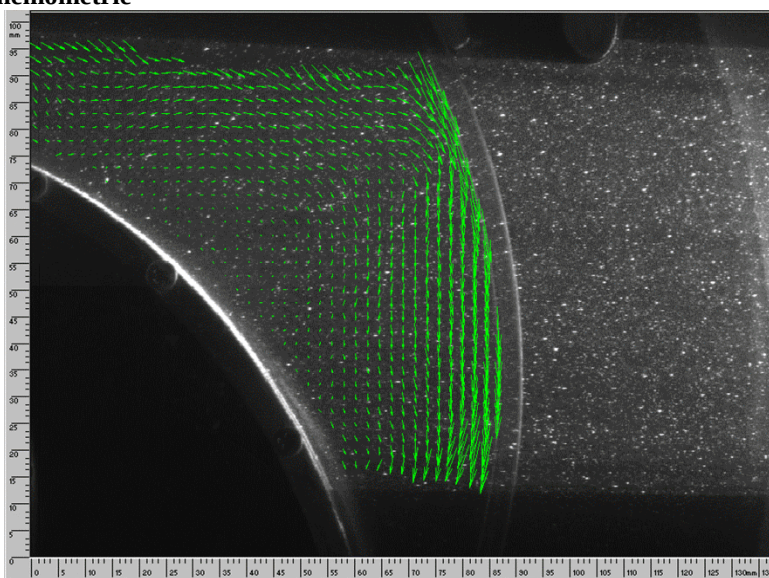
Obr. 17 Kalibrace vodoměrné vrtule jako pracovního měřidla laserovým dopplerovským anemometrem (LDA zajišťuje návaznost na etalon rychlosti)



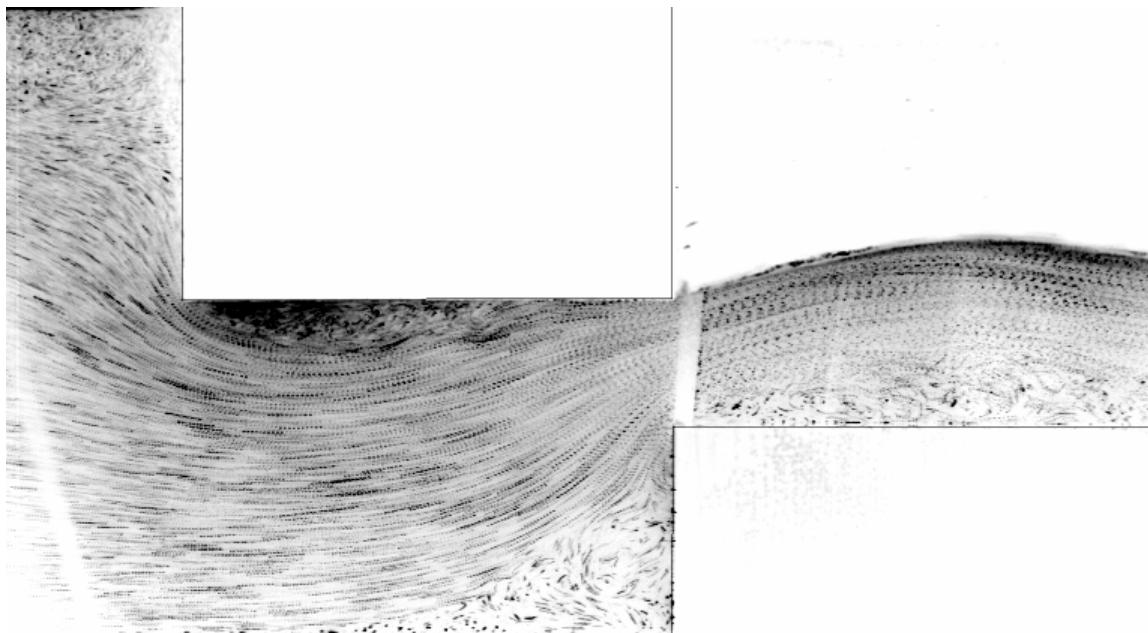
Obr. 18 Vývoj rychlostního pole při podtékání modelu norné stěny měřený metodou rovinné laserové anemometrie



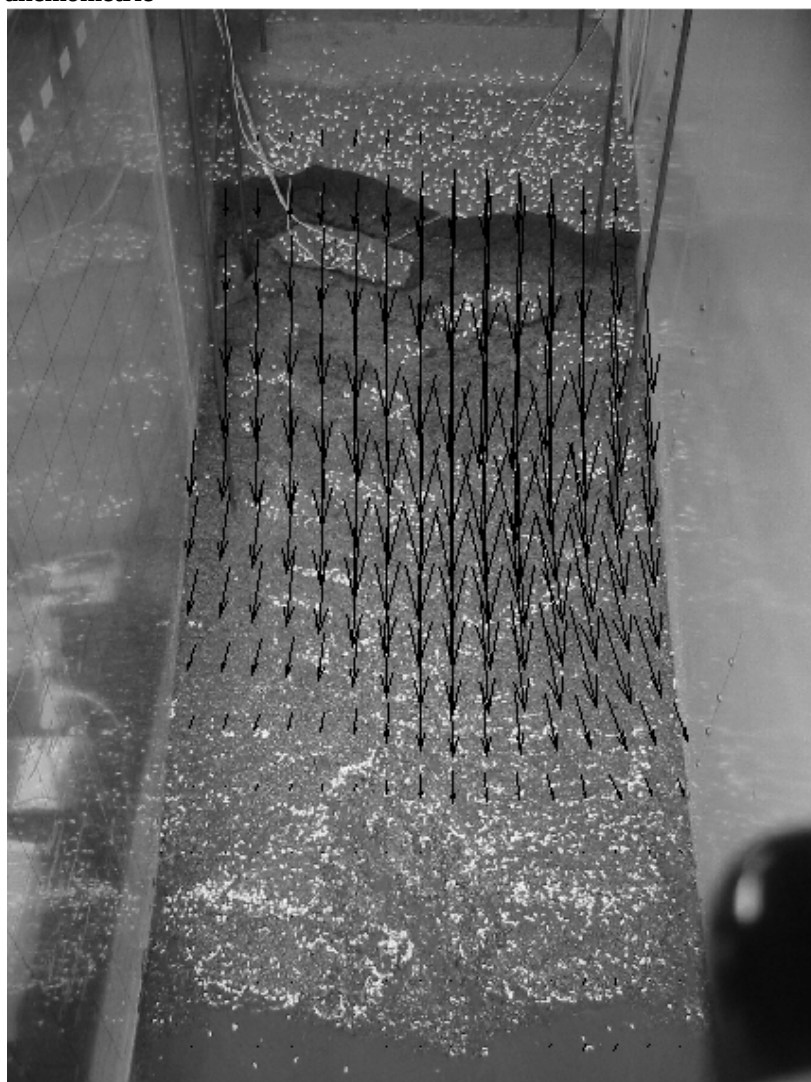
Obr. 19 Měření rychlostního pole v prostoru rozvaděče a oběžného kola čerpadla metodou rovinné laserové anemometrie



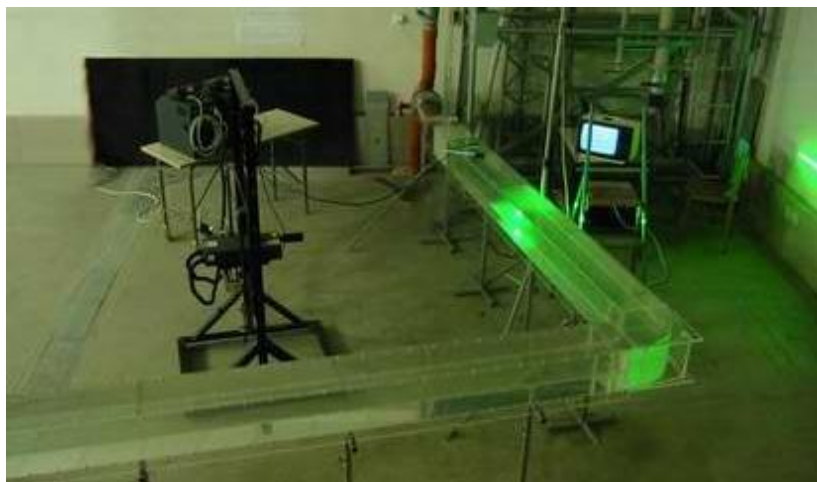
Obr. 20 Měření rychlostního pole v prostoru rozvaděče a oběžného kola čerpadla metodou rovinné laserové anemometrie



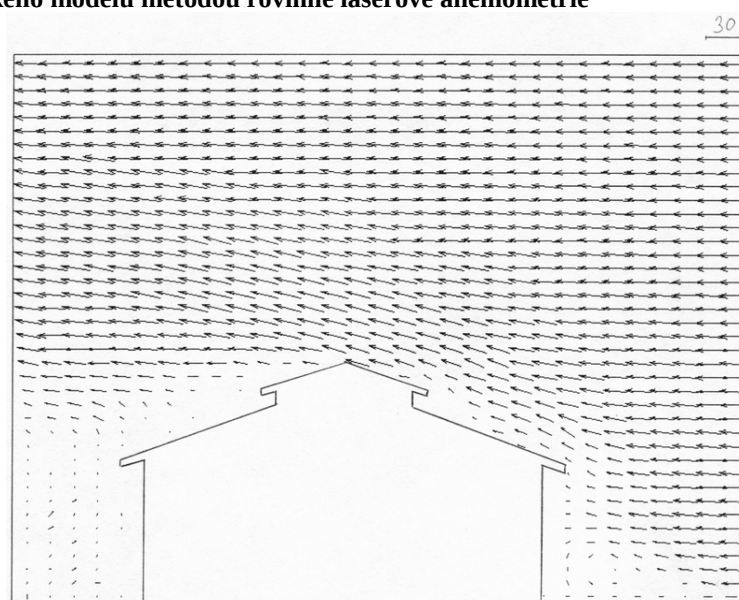
Obr. 21 Detail měření rychlostního pole pod dosedací hranou stavidlového uzávěru metodou rovinné laserové anemometrie



Obr. 22 Sledování vývoje sufozního jevu (výronu) na vzdušném líci modelu sypané hráze metodou rovinné laserové anemometrie



Obr. 23 Měření vývoje struktury proudu v oblouku kanálu čtvercového průřezu pro kalibraci a verifikaci matematického modelu metodou rovinné laserové anemometrie



Obr. 24 Časově střední obraz rychlostního pole z měření struktury proudění při dynamickém modelu budovy v aerodynamickém tunelu metodou rovinné laserové anemometrie



Obr. 25 Měření struktury proudění při dynamickém modelu budovy v aerodynamickém tunelu metodou rovinné laserové anemometrie

**ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII
A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ**



Č.j. 779/01/20 V Praze dne 20. září 2001

ROZHODNUTÍ

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví podle § 21 zákona č. 505/1990 Sb.,
o metrologii ve znění zákona č. 119/2000 Sb., rozhodl takto.

Žadatelé

**Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb -
Laboratoř vodohospodářského výzkumu**
Veveří 95, 662 37, Brno
IČO 216305

se uděluje

AUTORIZACE

**k výkonu úředního měření průtoku tekutin hydrometrováním v prismatických korytech,
objemovou metodou, prostřednictvím měrných žlabů a přelivů a prostřednictvím měření
rychlosti proudění tekutin laserovými anemometry.**

Podmínky autorizace, kterými se stanoví podmínky pro výkon činnosti autorizované osoby (úředního
měření) a specifikace rozsahů měření jsou uvedeny v příloze tohoto rozhodnutí, která tvoří jeho
nedílnou součást.

Odůvodnění
Ve výroku rozhodnutí uvedená právnická osoba vyhověla podmínkám stanoveným v § 13 vyhlášky
Ministerstva průmyslu a obchodu č. 262/2000 Sb., kterou se zajišťuje jednotnost a správnost měřidel
a měření. Splnění podmínek je dokumentováno ve spisu č.j. 779/01/20, uloženém v Úřadu pro
technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

Poučení
Proti tomuto rozhodnutí lze do 15 dnů ode dne jeho doručení podat odvolání u Úřadu pro technickou
normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví k Ministerstvu průmyslu a obchodu.

Příloha: Podmínky autorizace Ing. Alexander Šafarik-Pštroz
předseda

Obr. 26 Autorizační listina

- měření proudění v okolí modelu budovy v aerodynamickém tunelu (obr.24, 25).

Porovnání obou uvedených optoelektronických metod ukazuje možnost získávání rychlejšího celkového přehledu pomocí PIV oproti přesnějšímu a detailnějšímu měření pomocí LDA, ale za cenu mnohem větší pracnosti. Ovšem hlavní přednost PIV je možnost sledování vývoje rychlostního pole při konkrétním nestacionárním ději, což při podrobnějším pohledu je nejčastější typ reálného proudění. Nakolik je tato nestacionarita zanedbatelná, lze posoudit teprve až po jejím změření a vyhodnocení.

Autorizace LVV

Díky modernímu vybavení fakulty „úplnou škálou“ měřidel rychlosti proudění tekutin a personálnímu složení kolektivu laboratoře bylo pracoviště LVV autorizováno Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví k výkonu úředního měření průtoku tekutin (obr.26) a jako jediné v ČR je autorizované k úřednímu měření rychlosti proudění tekutin laserovými anemometry. Tři pracovníci kolektivu mají certifikát o odborné způsobilosti k výkonu funkce úředního měřiče pro zmíněný účel. Dva pracovníci LVV jsou členy komise certifikačního orgánu pro metrologickou činnost č. 3034 při Českém metrologickém institutu ČR (ČMI).

ČMI provádí na LVV zkoušky měřidel rychlosti, průtoku a úrovně hladin pro vydání „Certifikátu o schválení typu měřidla“.

Rozšíření možností měřicího procesu po nákupu nových investičních doplňků z dotace FRVŠ v roce 2004

Do roku 2004 používaná kamera DoubleImage 700 byla zakoupena za podpory grantového projektu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR (MPO). Kamera byla vyrobena v roce 1996 a od té doby výrazně zastarala jak morálně tak i fyzicky. Dokladem fyzického zestárnutí byly mimo jiné vleklé problémy s nemožností dosažení deklarovaného minimálního času mezi, pro PIV potřebnou, dvojicí snímků. S parametry nové kamery pořízené z dotace FRVŠ, v součinnosti s již zakoupeným pulzním laserem, je prakticky úplně odstraněno omezení v maximální měřitelné rychlosti oproti předchozímu osvětlovacímu systému.

Centrem celé měřicí soupravy PIV je řídicí jednotka, která především provádí velmi náročnou synchronizaci všech ostatních prvků systému. Nahrazení dříve používaného procesoru PIV 1500 novou jednotkou Systém Hub zajišťuje vyšší přesnost měření – v součinnosti s příslušným softwarovým blokem, jehož nákup byl také realizován ze zdrojů FRVŠ. Možnost provádět bez časového omezení delší série měření a perspektivní rozšíření systému až na čtyři snímací kamery a tím vytvoření fakticky několika nových měřicích systémů značně rozdílných vlastností je další přínos.

Světlovodící rameno je mechanismus, který umožňuje bezpečně a relativně jednoduše přivést světelnou energii z laseru až na požadovanou pozici měrné roviny. Zvýšení bezpečnosti práce znamená, při účasti studentů na měření, velmi podstatné zvýšení užitné hodnoty celé měřicí soupravy. Velmi varibialní možnost nastavování polohy měrné roviny bez nutnosti manipulace s celým laserem přináší zásadní rozšíření použitelnosti rovinné laserové anemometrie.

Doplnění stávajícího optoelektronického systému PIV umožňuje výrazně rozšířit oblast měřitelnosti struktury proudění. Možnost relativně snadného a přesného polohování měrné roviny značně zrychluje proces měření. V některých případech složitých tvarů protékaných a obtékaných částí hydraulických objektů je umožněno realizovat dosud neproveditelná měření proudových poměrů. Systém je využíván zejména pro účely základního výzkumu časového vývoje struktury proudění. Právě spolehlivé a přesné stanovení vývoje proudových poměrů touto bezkontaktní metodou určuje širokou využitelnost v mnoha oborech. Výsledky řešení získané za pomoci uvedené optoelektronické metody vždy garantují zvýšení spolehlivosti energetické účinnosti a snížení energetické náročnosti hydrotechnických a hydroenergetických děl.

Kamera FlowSense 2M

Zakoupení kamery FlowSense 2M s rozlišením 1600 x 1200 pixelů (světlocitlivých buněk) přineslo výrazné zlepšení všech parametrů tohoto článku v řetězci měřicího kompletu PIV. Doposud používaná, již poměrně značně zastaralá kamera DoubleImage 700, má rozlišení 768 x 484 pixelů. Zásadní zvýšení rozlišovací schopnosti kamery umožňuje získávat podstatně podrobnější informace o rozložení rychlostí v měřeném poli, toto názorně ukazují příklady z měření parametrů proudění za negativním stupněm ve dně starší kamerou na obr. 27 a novou kamerou na obr. 28. Taktéž poměrně značné omezení v parametru minimálního času mezi, pro PIV potřebnou, dvojici snímků bylo zakoupením nové kamery odstraněno a měřicí komplet PIV nyní umožňuje měřit rychlosti až 100 m/s oproti 13 m/s se starou kamerou. Vzhledem k tomu, že při určitých konkrétních podmínkách měření jsou tyto hodnoty několikanásobně nižší, je zde vytvořena velmi potřebná rezerva.

System Hub

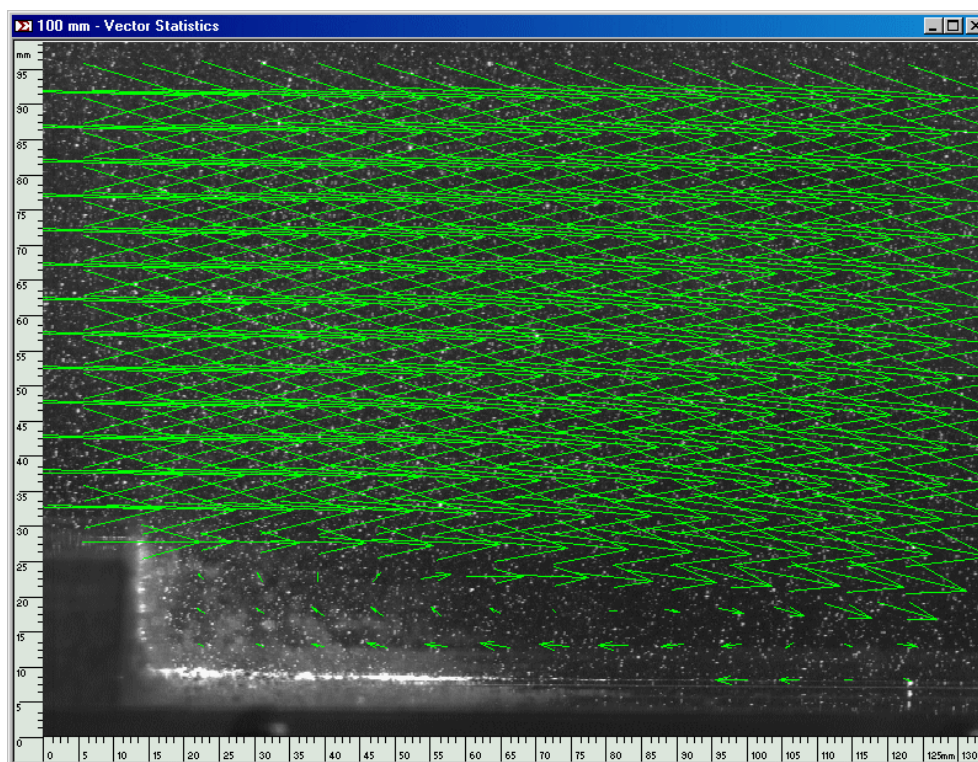
Centrem celé měřicí soupravy PIV je řídicí jednotka která především zajišťuje velmi náročnou synchronizaci všech ostatních prvků systému. Nová centrální jednotka System Hub, v součinnosti s taktéž zakoupeným speciálním softwarovým blokem, přinesla zvýšení přesnosti měření.

Softwarový blok „Vysoká přesnost“ (FlowManager High Accuracy Module) umožňuje vyhodnocovat délku dráhy pohybu obrazů částic s vyšší přesností než odpovídá vzdálenosti jednotlivých pixelů na CCD čipu kamery. To se obzvláště projevuje při zpracování snímků s velmi malým pohybem částic mezi prvním a druhým snímkem. Prakticky se tím zvětšuje rozsah mezi maximální a minimální rychlostí jež lze měřit současně, tedy se stejným nastavením systému. Příklad je na dvojici obrázků 28 a 29 z jednoho měření, při kterém bylo nastavení měřicího systému přizpůsobeno poměrně vysokým rychlostem v hlavním poli. Jak je zřejmé z obr. 29, současně byly správně vyhodnoceny i velmi malé rychlosti v levé spodní části měřeného pole.

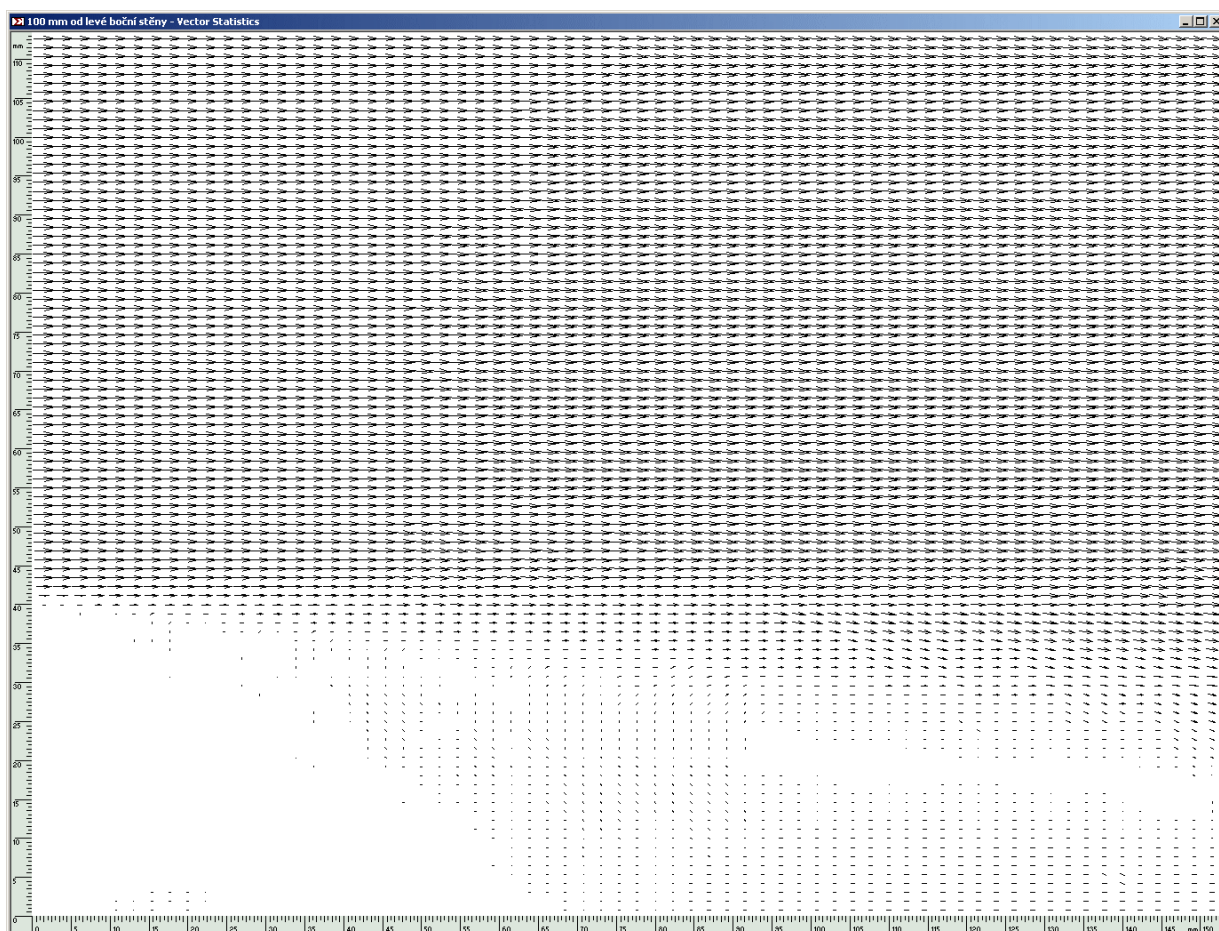
Centrální jednotka System Hub s přiměřeně dimenzovanou rychlou pamětí LIFO 1,5 GB také umožňuje provádět bez časového omezení delší série měření. Dále System Hub poskytuje perspektivní možnost rozšíření systému až na čtyři snímací kamery a tím vytvoření fakticky několika nových měřicích systémů značně rozdílných vlastností.

Nová centrální řídicí jednotka System Hub se v provozu plně osvědčila.

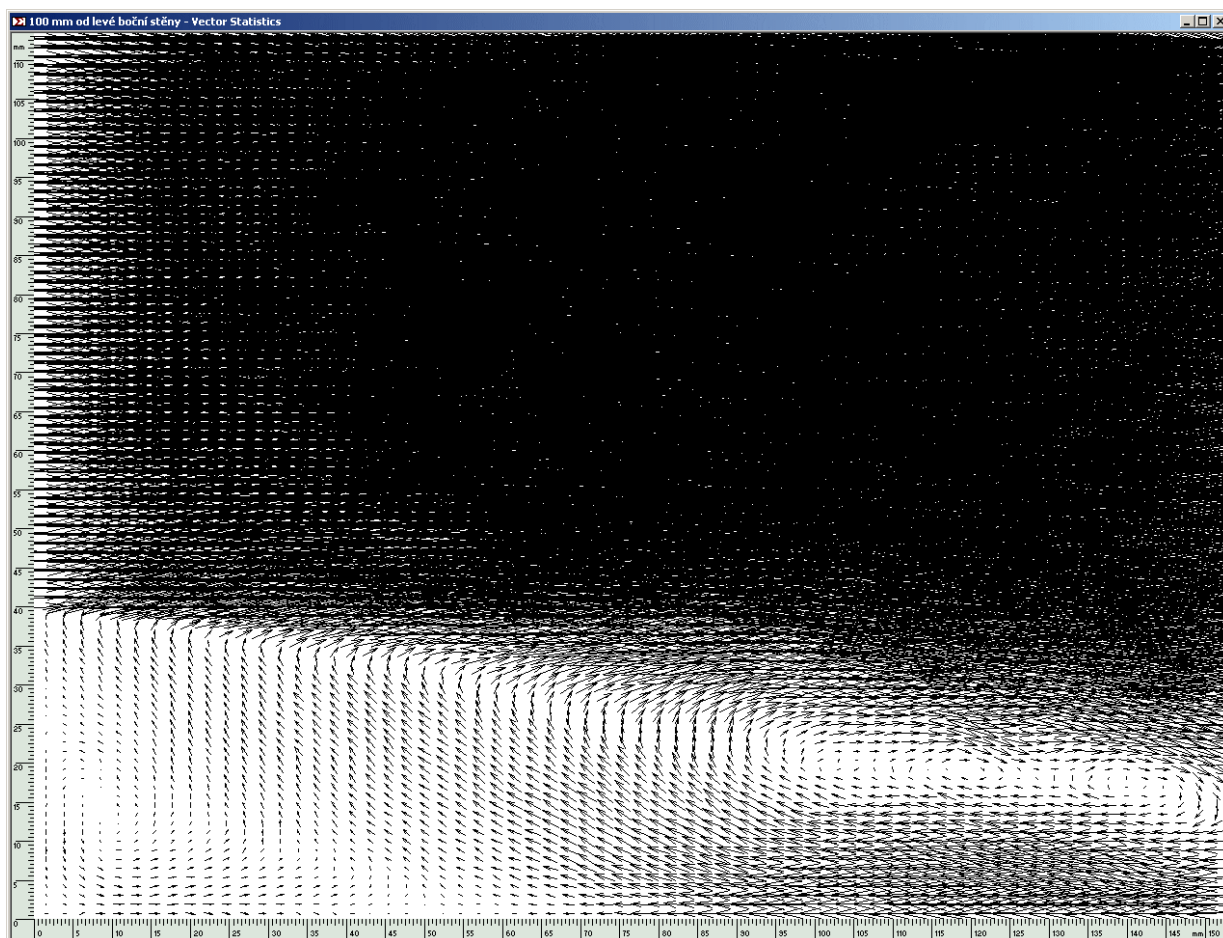
V průběhu realizace projektu se ukázalo jako velmi přínosné zakoupení dalšího softwarového bloku který umožňuje přímé propojení databáze dat z PIV měření a speciálního vykreslovacího programu Teplot. Tímto propojením se několikanásobně zrychlují činnosti spojené s prezentací naměřených parametrů proudění.



Obr. 27 Rozložení rychlostí ve svislé rovině symetrie kanálu za negativním stupněm ve dně výšky 20 mm.



Obr. 28 Rozložení rychlostí ve svislé rovině symetrie kanálu za negativním stupněm ve dně výšky 40 mm (měřítko vektorů přizpůsobené vysokým rychlostem).



Obr. 29 Rozložení rychlostí ve svislé rovině symetrie kanálu za negativním stupněm ve dně výšky 40 mm (měřítko vektorů přizpůsobené nízkým rychlostem).

Světlovodící rameno

Zakoupení světlovodícího ramene (Short Mirror Arm) zlepšilo možnosti polohování světelného listu a tím volbu měrné roviny bez nutnosti obtížné manipulace s celým pulzním laserem. Světlovodící rameno je mnohakloubový mechanismus, který umožňuje uvnitř svých trubkových ramen zcela bezpečně přivést světelnou energii z laseru až na požadovanou pozici měrné roviny.

Při současném zvýšení bezpečnosti práce umožnilo světlovodící rameno zpřesnit a především zrychlit proces měření.

Využití optoelektronických metod ve výuce posluchačů

S bezkontaktním způsobem měření rychlostí se setkávají posluchači v prostorách hydraulických laboratoří Fakulty stavební VUT v Brně. V některých případech konkrétních měření na hydraulických strojích je systém instalován v hydraulické laboratoři Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

Systémy s doplňky pořízenými v rámci projektu Fondu rozvoje vysokých škol v roce 2004 budou využívány při výuce v současném magisterském i doktorandském studiu fakulty. Konkrétně v magisterském programu se jedná o předměty: hydraulika a hydrologie I, hydraulika I, čistota vod, technologie vody. V doktorandském programu budou systémy

využity v konkrétních pracích a v rámci předmětů: matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice, hydromechanika, měření provozních veličin ve vodním hospodářství a přesná kalibrační a laboratorní měření hydraulických veličin.

V současné době jsou na pracovišti LVV řešena témata dvou doktorandských prací s využitím laserových metod.

Tyto nejmodernější optoelektronické systémy budou prezentovány také posluchačům dalších fakult a vysokých škol při exkurzích.

Využití laserové anemometrie při řešení grantových projektů

Na Fakultě stavební VUT v Brně byla od roku 1975 řešena celá řada úloh s využitím LDA metody při měření rychlosti proudu v oborech nejčastěji hydrotechniky, vodních strojů a biomechaniky. Tato technika byla též prostředkem pro měření parametrů proudu u několika kandidátských a doktorských disertačních prací.

V posledních letech byly v hydraulické laboratoři FAST řešeny následující grantové projekty při využití laserových metod měření rychlosti:

rok	téma	podporovatel
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 anemometrií	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
2003 – 2005	Vyšetřování turbulentního smykového proudění v kanálech s náhlým rozšířením průřezu	GAČR

Právě při finanční podpoře resortu školství a výše uvedených poskytovatelů byly z větší části pořízeny nejmodernější měřicí systémy laboratoře.

Použitá literatura

- [1] Gray C. a kol.: An analysis of the scanning beam PIV illumination system. Meas. Sci, Technol., 1991, str. 717 – 724
- [2] Host-Madsen A. a kol.: On the accuracy and Reliability of PIV Measurements. 7th International Symposium on applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisabon 1994, str. 214 – 226
- [3] Šulc J.: Poznatky z automatizovaného měření charakteristik proudu na aerodynamických modelech. Jemná mechanika a optika, 6/1987, str. 181-185
- [4] Šulc J.: Převádění splaškových vod svislým potrubím extrémní délky. Výzkumná zpráva, SVL-FAST-VUT v Brně, 1993
- [5] Šulc J.: Vlastnosti systému žárové anemometrie pro měření směrů vektorů rychlosti proudu vzduchu. Jemná mechanika a optika, č. 10, 1984, str. 273 – 277
- [6] Zubík P.: LDA měření nestacionárního proudového pole. XVII. Sympozium o anemometrii, Úvaly, 2001
- [7] Zubík P.: Možnosti měření a zhodnocení reálných proudění. Teze disertační práce, ÚVV – FAST – VUT v Brně, 1997
- [8] Zubík P. Rozšíření aplikační oblasti PIV. In.: XIII. medzinárodná vedecká konferencia „Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín“. Žilinská univerzita v Žiline 2002, s. 236-241. ISBN 80-7100-955-5.
- [9] Zubík P., Šulc J. The measurement of flow parameters in square cross section bend. In.: Engineering Mechanics 2003, Ústav pro teoretickou a aplikovanou mechaniku AVČR, Svratka 2003, s. 410-411, CD s. 153. ISBN 80-86246-18-3
- [10] Zubík P. Měření proudění chladící kapaliny ve spalovacím motoru. In.: Energetické stroje 2003. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra energetických strojů a zařízení, Česká společnost pro mechaniku, Asociace strojních inženýrů, Plzeň 2003, s. 139-142. ISBN 80-7085-950-8.
- [11] Šulc J., Zubík P. Měření proudění v kanálových obloucích pravoúhlých průřezů. In.: XIV. medzinárodná vedecká konferencia „Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín“. Žilinská univerzita v Žiline 2004, s. 263-268. ISBN 80-8070-234-9.
- [12] Šulc J., Lichtneger P., Zubík P. Flow parameters measurement in the channel with the negative step. In.: Engineering Mechanics 2004, Ústav pro teoretickou a aplikovanou mechaniku AVČR, Svratka 2004, s. 410-411, CD s. 153. ISBN 80-86246-18-3

Brno 22. 12. 2004