

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Ing. Pavel Zubík

Integrální laserová anemometrie

Particle Image Velocimetry

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

PHD THESIS

Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství
Školitel: Prof. RNDr. Miroslav Liška, DrSc.
Oponenti: Prof. Ing. František Pochylý, CSc.
Doc. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.
Ing. Ladislav Klaboč, CSc.

Datum obhajoby: 13. 7. 2001

Klíčová slova: PIV – měření proudění – bezkontaktní – mechanika tekutin – laser.
Key Words: Particle image velocimetry – Flow measurement – Non-intrusive,
Fluid mechanics – Laser.

*Originál práce je uložen na FAST, Ústav vodních staveb, Laboratoř vodo-
hospodářského výzkumu.*

ISBN 80–214–1965-2

ISSN 1213-4198

© 2001 Pavel Zubík

Obsah

1 Úvod	5
2 Současný stav řešené problematiky	5
3 Cíl práce.....	7
4 Základní princip PIV	7
5 Hlavní výsledky práce	9
6 Aplikační možnosti PIV	10
7 Závěr	15
8 Summary.....	16
Feasibility conditions for PIV application:	17
The ideal situation for PIV application may be described as follows:.....	17
Examples of PIV applications performed by the author:	18
9 Literatura a autorovy publikace.....	20
10 Autorovo curriculum vitae	22

1 ÚVOD

Práce vznikla na základě požadavků vědy a průmyslu zvětšovat rozsah, vypovídací schopnost a přesnost anemometrického experimentu.

Vysoce funkční systém pro Integrální laserovou anemometrii – Particle Image Velocimetry (PIV) se stal technickou skutečností. V disertační práci jsou uvedeny teoretické a experimentální přístupy a metody zjištěné při budování a provozování laboratoře reálně využívající tuto měřicí metodu v Ústavu vodohospodářského výzkumu a následně po reorganizaci v Ústavu vodních staveb, Fakulty stavební, Vysokého učení technického v Brně. Největší pozornost je věnována teoretickým základům, jejich souvislostem a z nich vyplývajícím možnostem a přístupům k řešení jednotlivých konkrétních úkolů.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Stále dokonalejší software pro matematické modelování proudění tekutin a stále výkonnější a přitom relativně levnější - tedy dostupnější - počítače mohou budít dojem, že experimentální výzkum využívající měření rychlostí (anemometrii) je odumírající obor. Ve skutečnosti tato „konkurence“ nezpůsobuje zánik experimentu, neboť vede sice ke snížení kvantity, ale zároveň ke zvýšení kvality měření. Aby bylo možno provádět vstupní, poznávací a ověřovací experiment, jako nezbytnou součást matematického modelování, současně s rozvojem výpočtových metod stoupají požadavky na preciznost naměřených výsledků v rozšiřujícím se oboru typů proudění.

Typické anemometrické metody a autorův přínos pro jejich rozvoj:

- a) Hydrometrická vrtule - měření časově střední velikosti vektoru rychlosti.
Návrh univerzálního, téměř za všech okolností použitelného traverzačního zařízení a příslušného programového vybavení pro částečně automatizované měření. S využitím této měřicí techniky, „Autorizační listiny“ a „Osvědčení o odborné způsobilosti úředního měřiče“ realizoval autor více než 90 „Posouzení funkční způsobilosti měřicího systému na stanovení průtoku a proteklého množství“ a vypracoval příslušné zprávy pro objednatele.
- b) Pětivotvorová tlaková sonda - měření celkového, statického a kinetického tlaku a vektoru rychlosti. To vše jako časově střední hodnoty.
Při používání této měřicí metody autor navrhl a realizoval dílčí zlepšení, která byla publikována v lit. [26] a [23].
- c) Zárová anemometrie - CTA
 - jednodrátková: měření velikosti vektoru rychlosti a její fluktuace v řádu stovek Hz;
 - dvoudrátková: měření průmětu směru vektoru rychlosti do jedné určené roviny a jeho fluktuace do řádu stovek Hz.;

- vícedrátková: měření vektoru rychlosti a jeho fluktuace v řádu stovek Hz. Měřené plyny musí být zcela čisté, unášené nečistoty mohou snadno sondu poškodit. V robustnějším provedení pro použití v kapalinách měří fluktuace pouze v řádu desítek Hz.

S měřicí metodou CTA autor pracoval při spoluřešitelství více než 5 výzkumných úkolů v období od roku 1987 do 1990.

d) Laserová dopplerovská anemometrie - LDA

- jednosložková: měření jedné složky vektoru rychlosti v určeném směru a její fluktuace v řádu stovek, případně až tisíců Hz;
- dvousložková: synchronní měření dvou složek vektoru rychlosti v určených směrech a jejich fluktuace v řádu stovek, případně až tisíců Hz;
- třísložková: synchronní měření tří složek vektoru rychlosti v určených směrech a jejich fluktuace v řádu stovek, případně až tisíců Hz.

Je nutný světlopropustný a paprsky laseru nedeformující vstup (případně i výstup) do měřeného prostoru. Sledovaná tekutina musí být průhledná a musí unášet optimální množství mikročástic. Zcela exaktně může měřit libovolně nízké rychlosti včetně nuly.

Zkušenosti s používáním LDA a nové metodické přístupy autor publikoval ve sbornících konferencí – lit. [27], [28], [31] a [37] a ve výzkumných zprávách – například lit. [20], [29], [30] a [39].

e) PIV: měření okamžitých stavů rozložení rychlostí v dvourozměrném poli. Podmínkou měření jsou dva navzájem kolmé optické vstupy do měřené oblasti, průhlednost měřené tekutiny a unášené částice. Minimální měřitelná rychlost konverguje k nule, ale je pouze omezený rozsah rychlostí, jež lze změřit současně v jednom okamžiku v jednom poli.

Zkušenosti s používáním PIV a nové metodické přístupy autor publikoval ve sbornících konferencí – lit. [21], [22], [24], [25], [27], [33], [34] a [38] a ve výzkumných zprávách – lit. [32] a [39].

V současné době existuje v České republice méně než 5 pracovišť (z toho jedno autorovo) vybavených pro LDA a pouze dvě (z toho jedno autorovo) pro integrální laserovou anemometrii. Proto informace a zkušenosti získával autor studiem cizí literatury [1] až [19] a zejména vlastním experimentováním.

3 CÍL PRÁCE

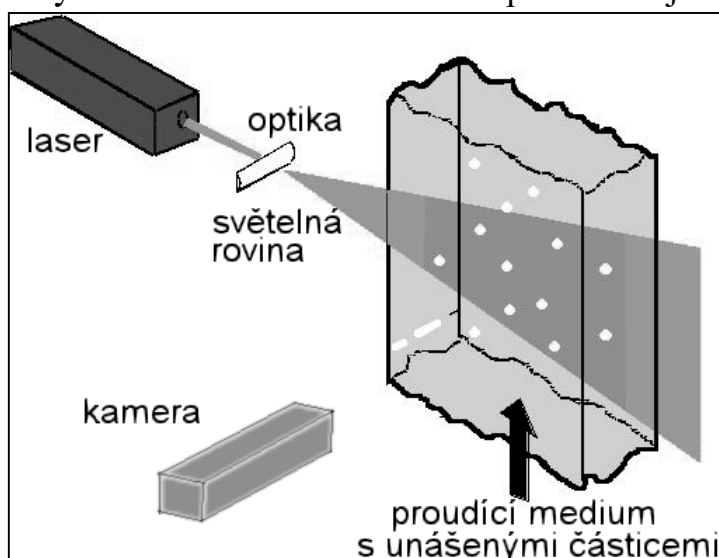
Vybavenost autora pracoviště neměla v posledních pěti letech v České republice obdobu. Zkušenosti s jinou laserovou měřicí metodou - LDA (a několika dalšími anemometrickými metodami) jsou velmi užitečné pro celkový rozhled, ale zásadní odlišnost PIV si vyžádala studium a analýzu velkého množství nových informací.

Cílem autora disertační práce „Integrální laserová anemometrie“ bylo především důkladné zvládnutí nové měřicí metody a její uvedení do běžné výzkumné praxe v České republice. Dále vytvoření podkladů pro případné další následovníky, kterým tak bude moci tato měřicí metoda začít přinášet užitek rychleji.

4 ZÁKLADNÍ PRINCIP PIV

Integrální laserová anemometrie – Particle Image Velocimetry (PIV) je technika měření, umožňující získat informace o okamžitém rozložení rychlostí v dvourozměrném poli v proudící tekutině. Rychlosti se určují z měřené vzdálenosti, kterou urazí unášené částice v toku, a z času, který částice k překonání této vzdálenosti potřebují. Částice jsou buď součástí proudícího média (zcela vyjíměčně), nebo se jimi toto médium sytí (ve většině případů). Systém zobrazuje a analyzuje částice, které jsou v proudícím médiu vybrány rovinným světelným řezem. Vhodně umístěná světelná rovina je vytvářena výkonovým laserem a systémem optických prvků. Aby docházelo ke stroboskopickému jevu umožňujícímu „zmrazení“ pohybu částic, je buzení světelné roviny pulzní. Doba mezi impulzy je tím časem, který slouží k výpočtu rychlosti.

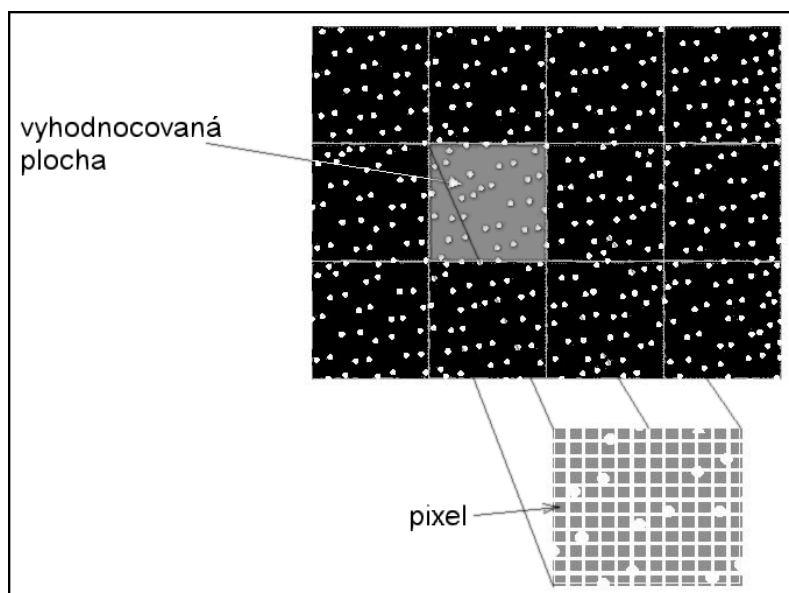
Záznamový systém, nejčastěji CCD kamera, umístěný optickou osou kolmo ke světelné rovině (základní rozmístění jednotlivých prvků měřicí soupravy je na obr. 1), zobrazí každou částici jako světlé zrno na tmavém pozadí. Jsou pořízeny dva snímky unášených částic velmi rychle za sebou.



Obr. 1: Základní uspořádání PIV.

Obrazy kamery jsou rozděleny na pravoúhlé oblasti (obr. 2). Pro každou z těchto vyhodnocovaných ploch je korelačními metodami stanoven jeden vektor, reprezentující průměrný posun všech částic uvnitř vyhodnocované plochy. Dělením tohoto posunutí známou dobou mezi dvěma záznamy obrazů jsou vektory posunu

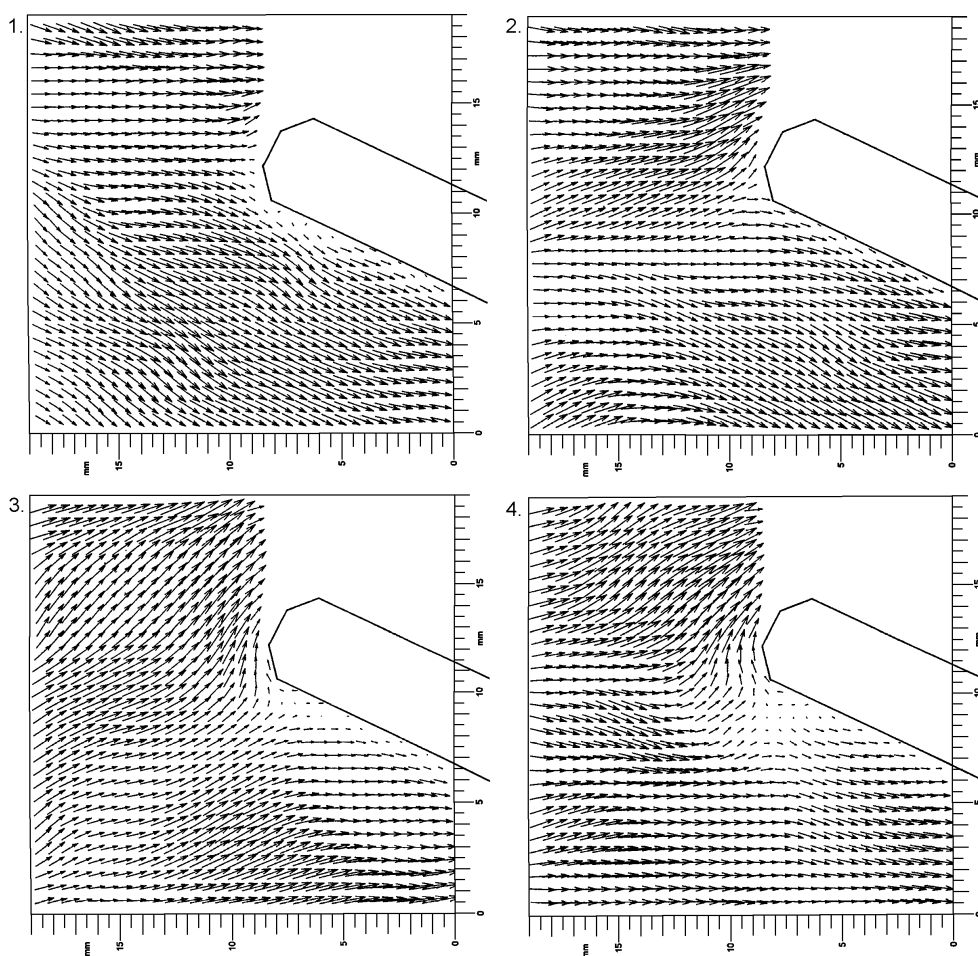
konvertovány do mapy nezpracovaných rychlostních vektorů. K urychlení výpočtu korelací se používá zpracování rychlou Fourierovou transformací (FFT). Přitom je nutno si uvědomit, že tento zpracovací postup stanoví výsledky z každé (tedy i místně nedostatečné nebo nekvalitní) vstupní obrazové informace a teprve následné



kontrolní postupy ukáží, zda platný, nebo nikoliv. Než se tak stane, tak se takové vektorové mapy nazývají nezpracované, nebo hrubé vektorové mapy.)

V další etapě se aplikují kontrolní algoritmy na nezpracované mapy a v nich detekují a odstraňují extrémní hodnoty, jimiž jsou chybné vektory. Výstupem je nová vektorová mapa, ze které je možno další analýzou vytvářet proudnice, pole vířivosti atd.

Obr. 2: Vyhodnocované plochy



Obr. 3. Okamžité stavy rychlostního pole při obtékání šikmé desky.

5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Ze základního principu PIV vyplývají tyto hlavní tématické okruhy:

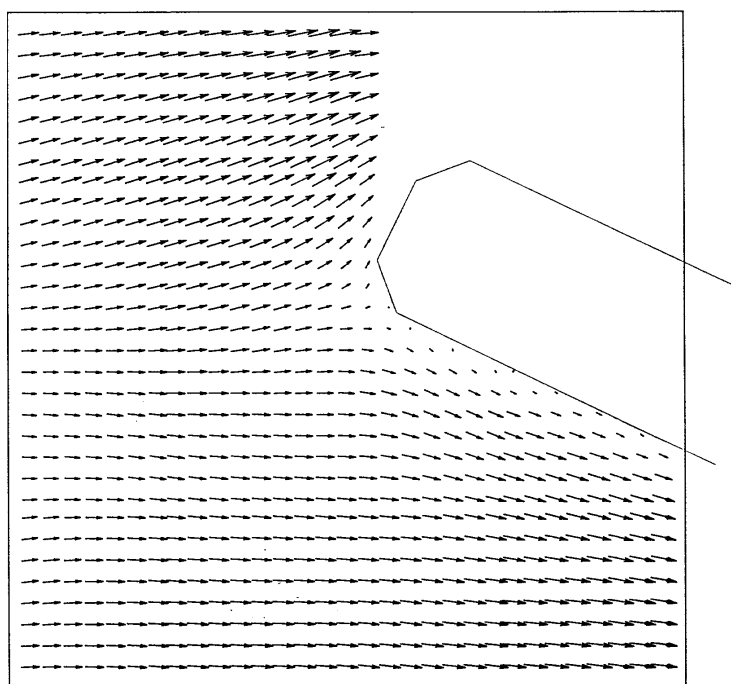
- a) Rozsetí částic sycení
- b) Metody osvětlování
- c) Záznam obrazů
- d) Zpracování obrazů na hrubé vektorové mapy
- e) Ověření platnosti a další analýza dat

Tyto hlavní okruhy jsou předmětem jednotlivých kapitol disertační práce. Jsou zde podrobně rozebrány teoretické podklady z dokumentace výrobce zařízení ([1] až [8]) a mnoha zahraničních publikací ([9] až [19]) a konfrontovány s praktickými zkušenostmi autora.

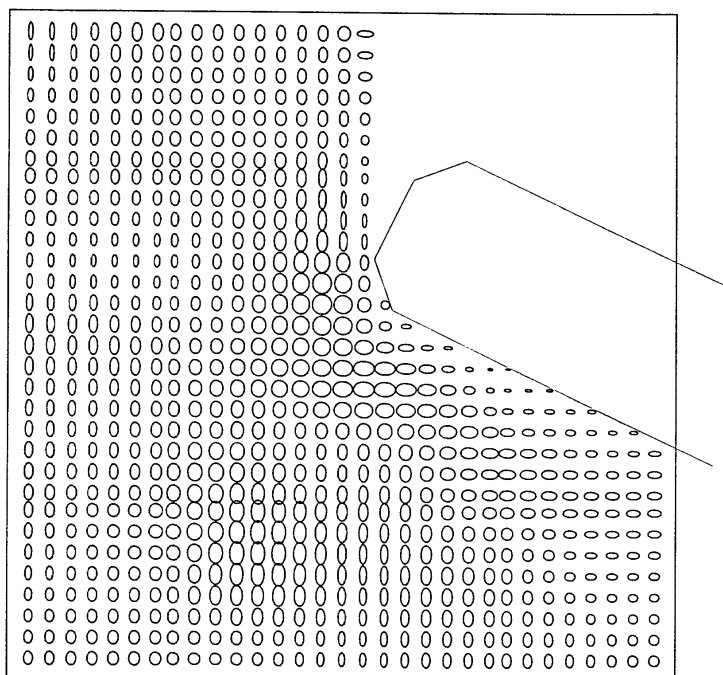
Například v kapitole o sycení je seznam všech použitelných částic s jejich vlastnostmi včetně nově získaných levných částic.

V kapitole o osvětlování jsou popsány vlastnosti a možnosti použití všech osvětlovacích souprav sestavitelných podle doporučení výrobce a v kapitole o praktických realizacích také původní autorova sestava.

V kapitole o doplňkové analýze dat je popsán nový, původní způsob zpracování dlouhých sérii okamžitých stavů rychlostního pole (příklad okamžitých stavů rychlostního pole je na obr. 3) na jeden časově středovaný obraz a způsob vyhodnocení a prezentace směrodatné odchylky. Tyto dva grafické výstupy, např. obr. 4 a 5, jsou potom schopny v případě kvazistacionárního rychlostního pole prezentovat v koncentrované podobě těžko přehlednou informaci obsaženou v několika desítkách grafů.



Obr. 4. Časově středované rychlostní pole obtékání pevné překážky.



Obr. 5. Rozložení rozptylu v rychlostním poli obtékání pevné překážky.

6 APLIKAČNÍ MOŽNOSTI PIV

Obecně vzato lze integrální laserovou anemometrii použít pro měření všech typů proudění tekutin – stacionární i nestacionární, laminární i turbulentní, jednorozměrného, dvourozměrného i třírozměrného charakteru. Z principu metody však vyplývá několik podmínek, jejichž splnění může být v konkrétních případech velmi obtížné, případně nemožné.

Podmínky aplikace integrální laserové anemometrie:

- Proudící médium musí být opticky průchodné v dimenzích vzdálenosti záznamového zařízení od měrného řezu - světelné roviny (zjednodušeně řečeno kamera musí přes vrstvu tekutiny, která je mezi ní a světelnou rovinou, „vidět“ rozzářené částice právě procházející světelnou rovinou).
- Proudící médium musí obsahovat částice vhodné velikosti, měrné hmotnosti a četnosti. Specifická hmotnost částic by se měla co nejméně lišit od specifické hmotnosti měřené tekutiny aby pohyby částic odpovídaly pohybům tekutiny. O velikosti a četnosti částic lze stručně říci, že je třeba je volit tak, aby zaznamenaný snímek byl hustě posázen dobře zřetelnými tečkami obrazů částic.
- V případě vnitřního proudění je nutno vytvořit dva dostatečně velké optické vstupy ve dvou na sebe kolmých rovinách. Pro vstup laserové světelné roviny stačí poměrně úzká štěrba ale „okno“ přes které musí kamera vidět celou měrnou rovinu bývá již značně velké a mnohdy obtížně zhotovitelné (samostatnou problematikou je záležitost nerovinných zakřivených optických vstupů).

Z pohledu uživatele PIV lze ideální situaci pro měření popsat takto: Jsou splněny výše uvedené podmínky a) a b); proudění má jednorozměrný nebo dvourozměrný charakter (třetí rozměr je relativně nevýznamný); laserová světelná rovina je umístěna tak, že pohyb unášených částic napříč rovinou je téměř nulový; proudění se odehrává ve volném prostoru (vzdušniny), nebo ve velmi velké nádrži (kapaliny) a je k dispozici měřicí zařízení jež lze ponořit do kapaliny, nebo rozhraním mezi proudící tekutinou a okolím jsou velké rovinné průhledné plochy; poměr mezi nejvyššími a nejnižšími rychlostmi je menší než přibližně 20:1 (jestliže nejnižší rychlosti konvergují k nule, tak tento poměr samozřejmě vždy roste nade všechny meze – znamená to pouze, že nejnižší rychlosti budou vyhodnoceny s relativně velkou chybou). Za těchto podmínek jsou vynikající výsledky téměř zaručeny.

V běžné praxi je velmi často nutno měřit i při existenci třetího rozměru proudění – pohybu částic napříč světelnou rovinou. Při vhodné kombinaci tloušťky světelné roviny a rychlosti osvětlování je také možno získat kvalitní výsledky, vyhodnoceny ovšem budou pouze průměty vektorů rychlosti do měrné roviny. Problematiku jiných než rovinných optických vstupů je nutno posuzovat individuálně, případ od případu.

Aplikační oblast integrální laserové anemometrie je v měření okamžitých stavů rozložení rychlosti v dvourozměrných řezech proudící průhlednou tekutinou (kterou lze nasytit vhodnými stopovacími částicemi) ve volném prostoru nebo v uzavřených prostorách, u nichž lze vytvořit dostatečně velké optické vstupy.

Příklady autorem provedených aplikací integrální laserové anemometrie:

– Obtékání šikmé desky a profilované lopatky rozvaděcí mříže.

Nejvýznamnější výhodou integrální laserové anemometrie, oproti jiným měřicím metodám, je její schopnost zachytit rozložení rychlostí v měřeném poli naráz, v jediném okamžiku a zhotovením série, takovýchto okamžitých stavů, sledovat vývoj rychlostního pole v čase. Takovýto přístup k dané problematice umožňuje posoudit, zda dané proudění je stacionární (případně kvazistacionární) a nebo nestacionární. Typický příklad, publikovaný v lit. [24] a [25], je na obr. 3 - čtyři okamžité stavy detailu proudového pole v místě nátoku na šikmou desku, v časové posloupnosti 0,5 sekundy. Ukazují jak výrazně proměnlivý může být daný typ proudění. Časově střední obraz (je na obr. 4), bez další doplňkové informace, v tomto případě tedy poskytuje značně zkreslenou představu o charakteru tohoto proudění.

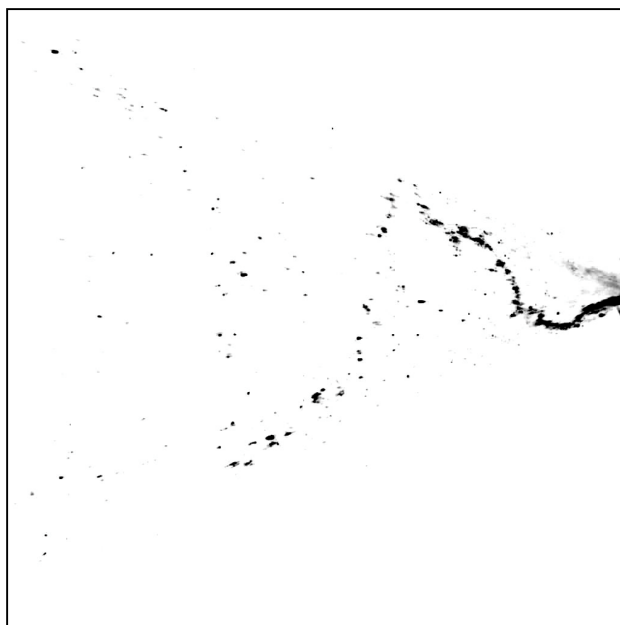
Jak je zřejmé z obr. 3, jedním z praktických problémů použití PIV je neosvětlení (a následně zcela chybné vyhodnocení) části měřeného prostoru ve stínu za obtékaným modelem. Proto autor navrhl (a našel dodavatele, který úspěšně zhotovil) profilované lopatky se skleněným segmentem umožňující měřit i uvnitř mezilopatkových kanálů.

– Proudění ohraničená zakřivenými plochami.

Přes různá rozhraní nemusí procházet pouze laserová světelná rovina. Někdy je nezbytné, aby i světlo odražené od unášených částic a vstupující do objektivu kamery procházelo nejen kvalitním kolmo postaveným planparalelním sklem, ale také zakřivenou stěnou modelu. V lit. [24] a [25] je publikován příklad umístění celého modelu do obdélníkovém žlabu a zatopení prostoru uvnitř i vně zakřivených stěn kapalinou. Pro obzvláště komplikované tvary modelů je někdy nutno použít kapalinu s indexem lomu méně se lišícím od indexu lomu materiálu stěn než při použití běžné vody. Autor dospěl po mnoha pokusech k doporučení použití terpentýnového oleje případně vodního roztoku jodidu sodného.

– Vizualizace proudění na výstupu z oscilační trysky

Z hlediska problematiky optických vstupů je nejjednodušší proudění ve volném prostoru, například obtékání modelu v aerodynamickém tunelu nebo také vodní paprsek ve vzduchu. Rozpadání vodního paprsku na jednotlivé kapky bylo z výhodou využito místo přidávání stopovacích částic. K vizualizaci proudění na výstupu z trysky byla využita pouze dílčí část z celé měřicí metody PIV - fotografování unášených částic. V zatemněné místnosti bylo pomocí velmi krátkých a rychle po sobě jdoucích záblesků laseru osvětleno proudění v blízkosti výstupu z trysky. Tímto bylo dosaženo obdobného efektu jako stroboskopem a umožněno vizuální pozorování tohoto rychlého nestacionárního jevu. Ukázka jednoho snímku je na obr. 6. Pomocí digitální kamery byly zaznamenány série jednotlivých okamžitých stavů proudového pole, z kterých byly následně vytvořeny krátké animované filmy, umožňující subjektivní pozorování zpomaleného vývoje tohoto nestacionárního proudění.



Obr. 6. Kapky vody za oscilační tryskou.

– Obtékání norných stěn

Předmětem zkoumání byla vzdálenost dvou norných stěn z hlediska jejich schopnosti zadržet plovoucí ropné látky. Z časově středovaného obrazu proudění

před druhou nornou stěnou, v určité relativně malé vzdálenosti za první nornou stěnou, je možno usuzovat, že ty ropné látky, jež byly strženy pod první nornou stěnou by mohly být v již uklidněném a zpomaleném proudění před druhou nornou stěnou zadrženy. Praxe je však s touto teorií v rozporu a sledování okamžitých stavů proudění ukázalo příčinu – náhodně, na krátkou dobu, se v poli objevují místní zrychlené proudy, které dokáží strhnout plovoucí látky i pod druhou nornou stěnu. Výsledkem bylo nalezení takové vzdálenosti dvojice norných stěn kdy i okamžité stavy proudového pole mají požadovaný tvar zaručující správnou funkci soustavy norných stěn.

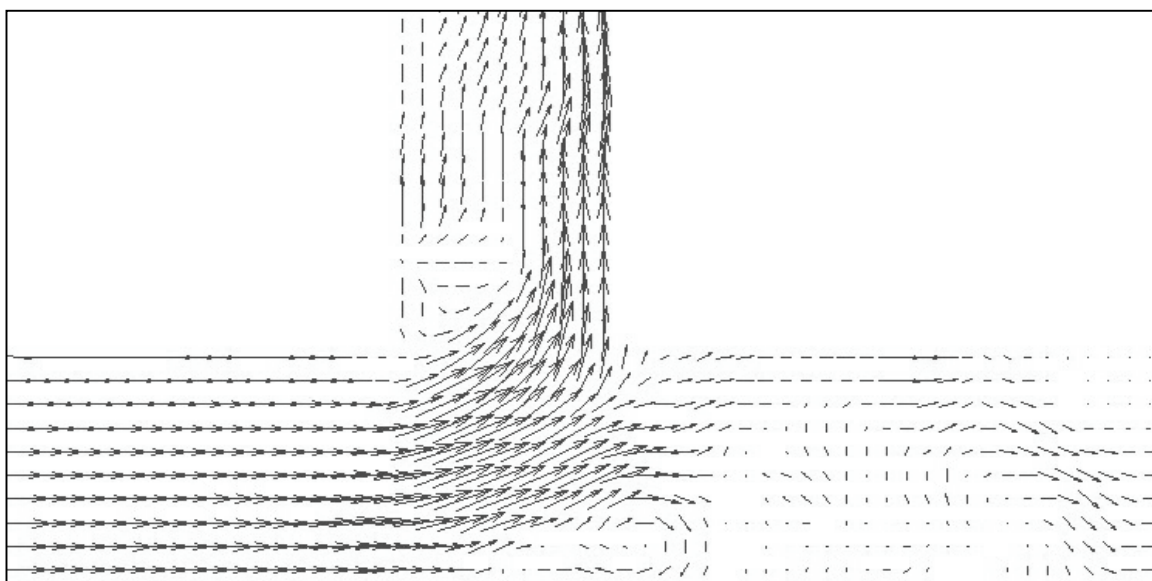
– Proudění v rozvaděči odstředivého čerpadla

Pro měření byl využit existující zkušební okruh rotočerpadla v laboratoři Odboru hydraulických strojů Victora Kaplana, Energetického ústavu, Fakulty strojní, VUT v Brně. Rotočerpadlo bylo upraveno zhotovením, autorem navrženého, optického vstupu pro laser v boční stěně spirály v dílnách SIGMA, výzkumný a vývojový ústav, Lutín.

V souvislosti s touto úlohou bylo nutno vyřešit především počáteční nemožnost nasytit proudící medium (vodu) stopovacímí částicemi. Úpravami zkušební okruhu a nalezením zdroje levných částic byly problémy překonány. Publikováno v [32] a [22].

– Rozbočnice kruhového potrubí tvaru „T“

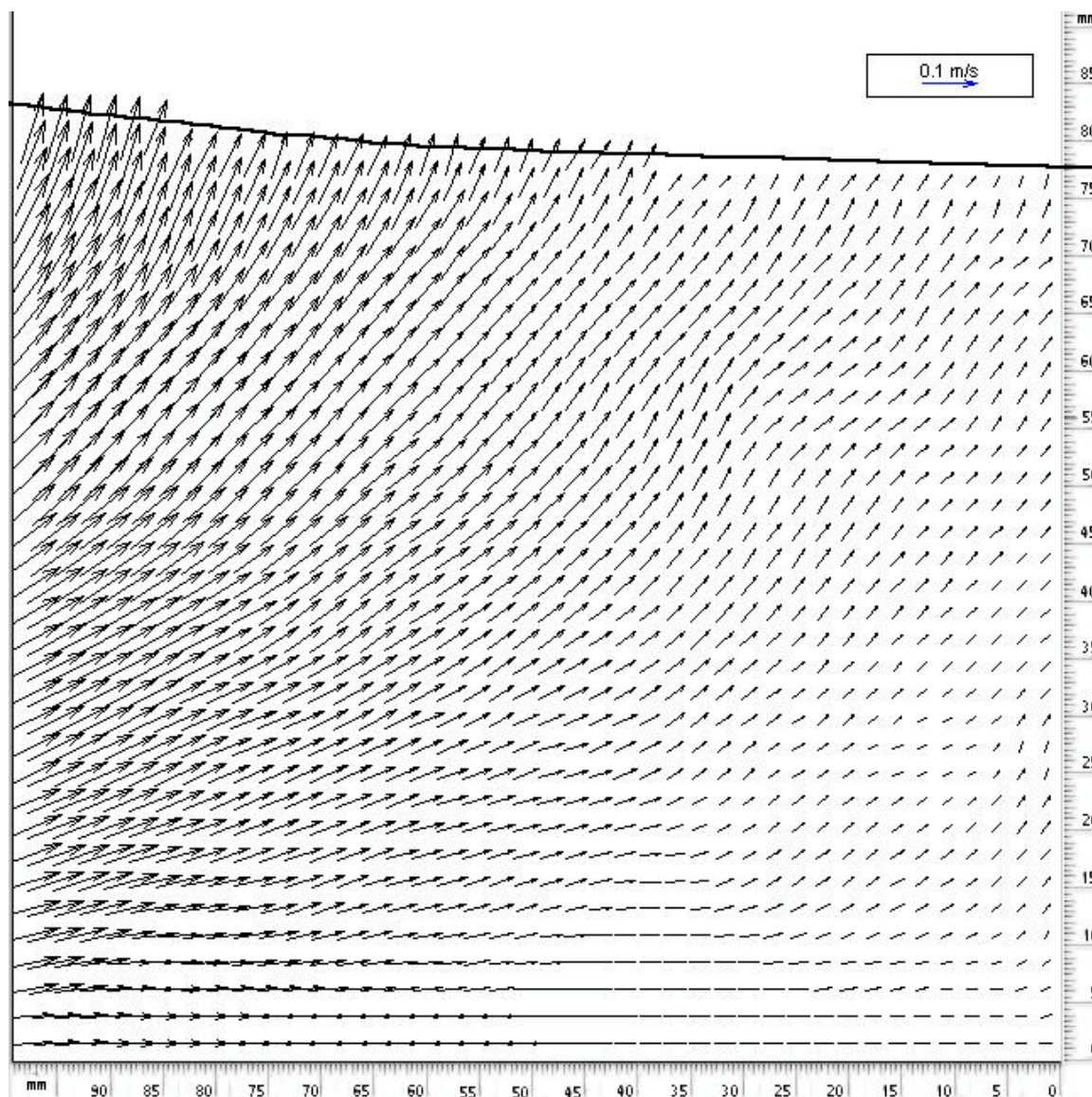
Pro nutnou verifikaci matematického modelu bylo navrženo a zhotoveno experimentální zařízení umožňující provádět měření rychlostních polí metodou PIV spolu s měřením průtoků a tlaků. Model byl proveden z plexisklové trubky o světlosti 18 mm a byl celý ponořen do stojící čisté vody. Přes velké úsilí o dosažení dokonale průhledného modelu zůstávala v obraze zřetelná stopa místa přilepení boční větve. Podstatné zkvalitnění vstupní obrazové informace poté přineslo použití fluoreskujících částic a příslušného interferenčního filtru na kameře. Osvětlovací rovina procházela osou trubky. Vnější zatopení modelu umožňovalo do určité míry měřit i v rovinách mimo rovinu v níž leží osy trubic. Z příkladu výstupu z měření (obr. 7) je zřejmé, že požadavek na získání celkového obrazu o proudění v rozbočnici byl velmi dobře splněn zvolenou metodou měření.



Obr. 7. Rychlostní pole v rozbočnici.

– Rychlostní pole uvnitř příbojové vlny.

Opět v rámci ověřovacího experimentu pro výpočtové modelování bylo provedeno zajímavé měření uvnitř postupující vlny. Tento příklad obtížně opakovatelného děje obzvláště vyzdvihuje výjimečnou vlastnost Integrální laserové anemometrie – možnost zaznamenání a vyhodnocení stavu celého dvourozměrného řezu rychlostním polem naráz, v jediném okamžiku. Ukázka jednoho stavu rychlostního pole je na obr. 8.



Obr. 8. Vektorový obraz rychlostního pole uvnitř postupující vlny.

7 ZÁVĚR

Autor práce se anemometrií – měřením rychlosti proudění – zabývá od třetího ročníku studia na vysoké škole. Napsal tři práce studentské vědecké činnosti zabývající se měřením proudění uvnitř válce spalovacího motoru tlakovými sondami. Ve své diplomové práci navrhl nový typ tlakové sondy a s tím související originální metodický postup. Po nástupu na vodohospodářské výzkumné pracoviště Fakulty stavební se stal v týmu spolupracovníků specialistou na provádění experimentů. Postupně zvládl obsluhu tlakových snímačů, traverzačních zařízení, hyrometrických vrtulí, jednotvorových a vícevrtulových tlakových sond, jednodrátkových a dvoudrátkových žárových sond, jednokanálové a dvoukanálové LDA a od roku 1996 se tvůrčím způsobem věnuje, v ČR unikátní, integrální laserové anemometrii.

Poskytuje konzultace o možnostech a podmínkách anemometrických experimentů (a v mnoha případech je také provádí) pro zájemce z velmi široké škály oborů. Tito zájemci jsou například z několika ústavů Fakulty stavební a Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, ČKD Blansko, Sigmury Lutín, Škody Plzeň, Škody Mladá Boleslav, Ústavu termomechaniky AVČR a VŠB Ostrava.

Při výuce předmětu Hydraulika pro druhý ročník Fakulty stavební poskytuje studentům možnost seznámení s různými anemometrickými metodami včetně nejmodernější laserové anemometrie. V rámci exkurzních návštěv seznamuje mnoho studentů z Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a z Masarykovy univerzity s unikátním měřicím zařízením.

Autorův osobní přínos k rozvoji integrální laserové anemometrie spočívá:

- a) ve výrazném zvýšení povědomí v odborné veřejnosti a uvedení PIV do výzkumné praxe v ČR,
- b) v nalezení řešení mnoha detailních problémů při aplikaci PIV, jako například provedení optických vstupů do modelů, průchod laserové světelné roviny mezi pevné stěny složitých modelů, výběr druhu, množství a způsobu vkládání částic,
- c) v nalezení nových a levných částic,
- d) v navržení a provedení nového způsobu osvětlování pro speciální případy,
- e) v navržení a realizaci nových způsobů zpracování a prezentace naměřených hodnot – časově střední rychlostní pole, animace prvotní obrazové informace a animace vektorových polí (všechny tyto postupy inspirovaly zástupce firmy Dantec natolik, že se postupně staly součástí jimi nabízeného softwaru k tomuto měřicímu zařízení).

Integrální laserová anemometrie se za poslední čtyři roky stala v příslušné odborné veřejnosti mnohem známější, mimo jiné také díky mnoha vystoupením autora na konferencích. Odezvou je velmi výrazný nárůst zájmu v posledním roce o ověřovací a vstupní experimenty k matematickému modelování proudění tekutin pro základní a aplikovaný výzkum. Autor je přesvědčen o pozitivním, byť pouze

dílčím vlivu tohoto procesu na kvalitu průmyslové výroby v ČR a cítí velké uspokojení, že se na tom podílí.

8 SUMMARY

The work on the thesis was based on demands from the industry and research laboratories to increase the scope, precision and readability of results of anemometric experiments.

The thesis describes the theoretical and experimental approaches and methods applied in the development and exploitation of a laboratory concentrated on experimental investigation of flow. The laboratory is a part of the Institute of Water Structures (Faculty of Civil Engineering, University of Technology, Brno, Czech Republic). The greatest attention is paid to the theoretical basis of the method from which the approaches to applied research and special measurements are deduced.

The progress in mathematical modelling of flow led to demands for an increase of the quality of measurement. The development of mathematical models calls for experiments leading first to the recognition and later to the quantification of the problem and finally to the calibration of all empirically gained coefficients used in the computation scheme. Greater precision, better coverage of the domain and wider range of application (types of flow and fluids) are typical demands on the development of new measurement systems.

Particle Image Velocimetry (PIV) is a measurement technique gathering information on the instantaneous state of velocity vectors in a flow field. Currently available systems enable measurements of velocity components in one plane cross-section of flow and create a two-dimensional image.

To find the velocity components the distance-time correlation of positions of many particles suspended in flow is made within a plane of pulsating light. Optically well distinguishable particles must be seeded into the flow. Distance measurement is based on analysis of particle positions registered at several ensuing time moments. Successive positions of each particle must be identified on the images. Time intervals between positions correspond to the setting of the light pulsating (“flashing”) system.

In contemporary systems CCD cameras are used to register the image of successive instantaneous particle positions. High performance lasers provide sources of flashing light. The PIV method has thus become a member of the family of laser anemometry methods and is generally known under the name of Integral Laser Anemometry.

High speed/capacity computers equipped with special software are used to analyze the complicated images in reasonable time. The image is cut into many

(usually rectangular) elements. In each of them the distance-time correlation of particle positions defines the local velocity vector. A rough vector map of the whole velocity field results. This is further statistically treated to eliminate faulty or suspicious results in some of the elements and to arrive at a final continuous field of velocity vectors. Various graphs for velocity field presentation and assessment may be made using the classic methods of vector field analysis: streamlines, contour lines of constant velocity, velocity gradients, swirl and divergence values etc.

The thesis critically analyses the theory presented by the manufacturers of the PIV systems [1] to [8] and by other authors [9] to [19] and confronts this theoretical basis with the experience gained by the author of the thesis in many years of research work using the method.

PIV FIELD OF APPLICATION

In general the PIV method may be applied to investigate all types of fluid flow, i.e. stationary or in-stationary, laminar or turbulent, one-, two-, or three-dimensional. On the other hand the principle of the method involves a set of conditions that must be met to make the experiment feasible. This may prove to be very difficult or even impossible in some real cases.

Feasibility conditions for PIV application:

- The space between the camera and the plane of measurement within the flow must be optically transparent (the camera must “see” the moving particles).
- The fluid must carry particles of suitable size, density and number. The density of the particles should not substantially differ from the density of the fluid. The size and number of particles in a given volume of fluid must create a clear picture seeded with a sufficient number of well defined dots.
- When internal flow is being investigated suitable windows must be provided for the camera and for the laser ray creating the plane of light which must be perpendicular to camera axis. The window for the laser ray may take the form of a relatively narrow slot but the window for the camera must have a sufficient size to register the desired field of vision (not to speak of optical distortion problems when complicated flow boundary shapes are encountered).

The ideal situation for PIV application may be described as follows:

- Nearly one- or two-dimensional flow, the plane of light is placed so that perpendicular velocity components are negligible.
- Good optical access to measuring plane (e.g. air flow in free space or liquid flow in big space with all components of the measuring system in submerged containers or flow in transparent straight walled flumes/pipes).
- Ratio of maximum to minimum velocities less than 20 (if near zero velocities are met in an otherwise fast velocity field the relative error of measurement may be very high).

In such conditions good results are guaranteed.

If three-dimensional flow with substantial velocity components perpendicular to the plane of light is investigated, reasonably good results can be achieved when a suitable combination of thickness of light plane and particle illumination time is chosen. Velocity components tangential to the light plane can be found in this way.

The typical application field of the PIV method is in the measurement of instantaneous velocity flow pattern in two-dimensional sections of flow in free spaces or in closed spaces with good optical access. Transparent fluid well seeded with particles is a must.

Examples of PIV applications performed by the author:

– The flow around profile and profile cascade.

The ability of PIV method to distinguish between steady and unsteady flows was shown during the examination of flow around a straight (not thin) profile set to a relatively large angle of attack. Four instantaneous states of flow around the leading edge registered in time intervals of 5 second are shown in Fig. 3. The time mean flow pattern in the same region is shown in Fig. 4 which may be misleading if presented as the only information on the subject.

Very similar results were obtained for a set of typical curved profiles arranged in the form of a profile cascade. One of the problems associated with this experiment was the deflection of laser rays when passing through the profile body made of acrylic glass. The author proposed (and found a supplier firm that could make it) blades made of optical glass which made measurements in the channel between the blades possible.

– The flow around curved surfaces.

A model with walls of complicated forms made of thin transparent elastic foil was placed in a rectangular transparent flume. Both the inner space of the model and the space outside of the model but inside the flume were filled with the same liquid. This eliminated the effect of ray deflection on thin curved model walls. In the case of thick-walled models of very complicated shapes and varying wall thickness it is sometimes necessary to use a liquid with an optical index identical or near to the index of the material of model walls. After many experiments the author arrived at a recommendation to use turpentine oil or a water solution of sodium iodide.

– Visualisation of a rapidly oscillating thin water jet.

The problem was not to measure the flow within the jet but to analyse the complicated periodic jet movements in atmosphere. It was found that the quality of the jet surface and its later transition into a line of droplets enabled controlled registration of instantaneous jet positions by using periodic flashes of laser light and taking digital camera pictures at the same or harmonically related frequencies (Fig. 6). A series of ensuing pictures forms a short “film” by means of which the rapid jet movements become visible to the human eye.

– Flow around vertical separation walls.

The problem was to find the optimum protection against oil pollution of water surface using two vertical separation walls (impermeable screens reaching to a predestined depth). The distance between the walls was the parameter to be optimised. It was found that the relatively short distance recommended by the screen manufacturers caused some of the oil to pass under both screens due to stream turbulence. The capacity of PIV method to analyse unsteady flow helped to understand the nature of the phenomenon and to find the solution to the problem.

– The flow in the stator cascade of a centrifugal pump.

The existing test stand in the laboratory of the Mechanical Engineering Faculty was used for the purpose. An optical access window designed by the author was mounted into the side wall of the pump volute. Insufficient water saturation by particles made measurement nearly impossible in the early phase of research. The author solved the problem by modification of the hydraulic circuit and finding a cheap source of optically suitable particles.

– Flow in a T-shaped fitting in a piping system of circular cross-section.

To verify a mathematical model of flow an experimental stand was designed for simultaneous measurements of velocity fields, rate of flow and pressure distribution. The model made of acrylic glass tubes (inner diameter 18 millimetres) was sunk into a tank filled by clean water. This was not sufficient to achieve clear pictures at the junction point where the sticking surfaces interfered. A substantial improvement of the pictures was brought about by using fluorescent particles in the flow and a corresponding interference filter on the camera. The light plane was set to include the pipe axis. The external water cushion enabled also reasonable measurements in planes offset from the pipe axis. Graphs in Fig 7 show that a satisfactory amount of information was gained to verify the mathematical model.

– Measurements of velocity fields in surging surface wave.

The velocity field inside a moving surface wave was registered as a part of programme to verify a mathematical model. It is difficult to repeatedly achieve such a special case of unsteady flow let alone to measure its internal structure. One of the measured velocity fields is shown in Fig. 8. These results bring forward the unique capacity of the PIV method to register and analyse the instantaneous state of complicated coherent flow structures.

CONCLUSION:

The author of the thesis has a long experience in anemometry including the use of LDA. Since 1996 he has been using the latest PIV system in a configuration which is unique in the Czech Republic.

The author's personal role in the promotion and development of the PIV method:

- Introduction of the PIV method into the Czech research in many branches of fluid mechanics.
- Solution of many detailed problems in the application of the method.
- Discovery of new and cheap sorts of particles resulting in reliable measurements.

- Proposal and tests of new illumination methods in special cases.
- Development of new methods of analysis and presentation of results: Mean velocity field for longer periods of flow, animation of the primary image information and animation of the time dependent velocity fields.

The Integral Laser Anemometry has become well known to the professional public thanks to many contributions of the author presented at conferences, symposia and also in lectures to students. The response to this is an increase of interest in experiments destined for the development of mathematical models of flow serving both basic and applied research.

9 LITERATURA A AUTOROVY PUBLIKACE

1. DANTEC Newsletter 1997, svazek 4, č.1.
2. DANTEC: FlowMap - Installation & User's guide, 1997, s. 4-12 – 4-20.
3. DANTEC: FlowMap - Installation & User's guide, 1997, s. 4-27.
4. DANTEC: FlowMap - Installation & User's guide, 1997, s. 4-36.
5. DANTEC: FlowMap - Installation & User's guide, 1997, s. 4-45.
6. DANTEC: FlowMap - Installation & User's guide, 1997, s. 4-55 – 4-59.
7. DANTEC: FlowMap - Installation & User's guide, 1997, s. 4-63.
8. DANTEC: FlowMap - Installation & User's guide, 1997, s. 4-64.
9. Durst F., Melling A., Whitelaw J. H.: Principles and practice of laser-doppler anemometry. 2. ed. Academic Press 1981.
10. Gray C., Greated C. A., McCluskey D. R., Eason W. J.: An analysis of the scanning beam PIV illumination system. Meas. Sci, Technol., 1991, s. 717 – 724.
11. Host-Madsen A., Mengel F., McCluskey D. R.: On the accuracy and Reliability of PIV Measurements, 7th International Symposium on applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisabon 1994, s. 214 – 226.
12. <http://www.masdropperscientific.com>.
13. <http://www.new-wave.com>.
14. Keane R. D., Adrian R. J.: Monte Carlo simulations of PIV measurements. Applied Scientific Research, 1992, č. 51. s. 129 - 141.
15. Keane R. D., Adrian R. J.: Theory of cross-correlation analysis of PIV images. Applied Scientific Research, 1992, č. 49. s. 191 - 215.
16. Keane R. D.: Processing of PIV data. In: Optical Diagnostics for Flow Processes. RISØ 1993, s. 24 – 39.
17. Landau L. D., Lifshitz E. M.: Fluid Mechanics. 2. ed., Course of Theoretical Physics, č. 6, Pergamon Press, Oxford 1987.
18. van de Hulst H. C.: Light Scattering by Small Particles. Dover publications 1981.
19. Willert C. E., Gharib M.: Digital Particle Image Velocimetry. Experiments in Fluids 1991, č.10 s. 181 – 193.

20. Zubík P., Haluza M., Pejchal V.: Změřené výkonové parametry turbín MVE vodního díla Šance. [Závěrečná zpráva]. Brno, VUT v Brně 1994.
21. Zubík P.: Aplikace měřicí metody PIV. In: 16. Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín, Žilinská univerzita, Žilina 2000, s. 246 – 251, ISBN: 80-7100-717-X.
22. Zubík P.: Aplikace měřicí metody PIV. In: 16. Symposium o anemometrii a měření průtoků, VUT v Brně 1999, 5 str.
23. Zubík P.: Automatizované měření pětiotvorovými tlakovými sondami. In: XIII. Symposium o anemometrii Holany 1994.
24. Zubík P.: Integrální laserová anemometrie v praxi. In: 15. Symposium o anemometrii, Úvaly 1998, s. 91-96. ISBN: 80-86020-23-1.
25. Zubík P.: Integrální laserová anemometrie. In: Inženýrská mechanika '98, Svratka 1998, s. 883-888. ISBN: 80-85918-40-4.
26. Zubík P.: K možnostem měření parametrů trojrozměrného proudění tlakovými sondami ve válcovém prostoru. In: Knižnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně, Brno 1994, s. 75-84. ISBN: 80-214-0536-8.
27. Zubík P.: Laserové metody měření rychlosti tekutin. In: Transfer '98, Praha 1998, s. 187-188.
28. Zubík P.: LDA měření nestacionárního proudění v dvourozměrném poli. In: 16. Symposium o anemometrii a měření průtoků, VUT v Brně 1999, 5 str.
29. Zubík P.: Měření nestacionárního proudění v savce Francisovy turbíny – 1998. [Závěrečná zpráva]. Brno, VUT v Brně 1998, 30 str.
30. Zubík P.: Měření nestacionárního proudění ve skleněné trubici – 1998. [Výzkumná zpráva]. Brno, VUT v Brně 1998, 40 str.
31. Zubík P.: Měření nestacionárního rychlostního pole za ostrohrannou překážkou. In: Interakce a zpětné vazby '97, Praha 1997, s. 151-156. ISBN: 80-85918-28-5.
32. Zubík P.: Měření okamžitých stavů rozložení rychlosti v rozvaděči „Rotočerpada“. [Výzkumná zpráva]. Brno, VUT v Brně 1999, 103 str.
33. Zubík P.: Měřicí metoda PIV a měřicí zařízení FlowMap. In: XIV. Symposium o anemometrii. Brno 1996.
34. Zubík P.: Měřicí metoda PIV. In: Transfer '99, VUT v Brně 1999, s. C-47 – C-48, ISBN: 80-214-1341-7.
35. Zubík P.: Možnosti měření a zhodnocení reálných proudění. [Teze disertační práce]. Brno 1997, s. 5.
36. Zubík P.: Možnosti měření a zhodnocení reálných proudění. [Teze disertační práce]. Brno, VUT v Brně 1997, 59 str.
37. Zubík P.: Praktická užití LDA. In: XIII. Symposium o anemometrii Holany 1994.
38. Zubík P.: Vessel bifurcation model flow measurement. In: Engineering mechanics 2000, Svratka 2000, s. 191 – 194, ISBN: 80-86246-07-8.
39. Zubík P.: Výzkum možností měření a zhodnocení složitých reálných proudění. [Závěrečná zpráva k projektu FR VŠ č. 0814]. Brno, VUT v Brně 1996. 32 s.

10 AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Ing. Pavel Zubík, narozen 5. května 1960.

Zaměstnavatel:

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav vodních staveb – Laboratoř vodohospodářského výzkumu

662 37 Brno, Veveří 95

Tel.: (05) 41147286, Fax: (05)41147288, E-mail: Zubik.P@fce.vutbr.cz

Délka odborné praxe:

– od 1.10.1987 do 31.8.1988 studijní pobyt VUT v Brně

– od 1.9.1988 do současnosti VUT v Brně

V současné době se především zabývá používáním laserových anemometrů v praxi a výzkumu. Vzhledem k již několikaletým praktickým zkušenostem s anemometrií je hlavním garantem dlouhodobého využití této měřicí techniky v Laboratoři vodohospodářského výzkumu. Je členem komise certifikačního orgánu pro metrologickou činnost č. 3034 při ČMI ČR.

Vzdělávací a tvůrčí činnost:

- f) 1. 10. 1993 zahájeno postgraduální studium v oboru "fyzikální a materiálové inženýrství" externí formou.
- g) vedení cvičení předmětu Hydraulika ve 2. ročníku FAST
- h) vedení cvičení předmětu Hydromechanika ve 2. ročníku FS
- i) spoluřešitelství interního grantu č. 51 "Volné víry ve vazké tekutině z hlediska, disipace energie, transportu a mísení" (1993)
- j) spoluřešitelství grantu č. 102 (interní na FS) "Řešení hydraulické problematiky mimotělního oběhu" (1991–1993)
- k) spoluřešitelství externího grantu č. 103/93/0335 "Aerace a ochrana povrchových vod bez nároků na energii využitím hydrodynamických vlastností stávajících zařízení" (1993–1995)
- l) spoluřešitelství grantu FR VŠ č. 0814 "Výzkum možností měření a zhodnocení složitých reálných proudění" (1996)
- m) spoluřešitelství externího grantu č. 103/96/1639 "Rozvoj a aplikace nových experimentálních metod měření a zhodnocení rychlostních polí tekutin technologií Particle Image Velocimetry - FlowMap" (1996–1998)
- n) spoluřešitelství externího grantu č. 101/97/0826 "Hydroelastická interakce proudící tekutiny s pružnou stěnou v biomechanice krevního oběhu" (1997–1998)
- o) spoluřešitelství externího grantu PZ - HZ/11/97 "Měření prostorového proudění reálné tekutiny laserovými anemometry" (1997–1998)
- p) odpovědné řešitelství a spoluřešitelství na mnoha úkolech aplikovaného výzkumu na základě hospodářské činnosti školy.