

# Integrální laserové anemometrie na VUT v Brně

Pavel ZUBÍK

## Abstrakt

Particle Image Velocimetry (PIV) – Integrální laserová anemometrie je metoda schopná měřit rozložení rychlostí v dvourozměrném poli současně – v jediném okamžiku. PIV je obzvláště vhodná metoda pro sledování časového vývoje prostorových souvislostí v proudící tekutině, případně může poskytnout poměrně velmi rychle časově střední informaci o rychlostním poli.

## Příklady použití PIV na autorově pracovišti

Sledování proměnlivosti rychlostního pole při obtékání soustavy norných stěn na modelu vodního toku.

Bylo prokázáno, že časově střední pohled na toto rychlostní pole je příčinou mylných doporučení optimálních vzdáleností jednotlivých norných stěn.

Rovinná rozváděcí mříž.

Byly navrženy a úspěšně zhotoveny profilované lopatky se skleněným segmentem umožňující měřit i uvnitř mezilopátkových kanálů. Zůstaly pouze velmi omezené oblasti na přední a zadní hraně lopatky které, z důvodu ohybu světelného paprsku na rozhraní prostředí s různým indexem lomu, není možno osvětlit. Byly získány velmi zajímavé nové informace o charakteru obtékání lopatky při velkém úhlu nátoku.

Trojrozměrné obtékání kostky ležící na pevné stěně.

Srovnání s výsledkem výpočtového modelování prokázalo, obdobně jako u všech proudění s odtržením, že realita je o hodně složitější než bylo očekáváno. Proudění má nezanedbatelnou stochastickou složku jež způsobuje náhodné časově nepravidelné změny v rychlostním poli. Dále, přestože model byl symetrický proudové pole kolem něj nikdy.

Model vtokového objektu pod parogenerátorem jaderné elektrárny

Původní projektový návrh vycházel z určitých představ o proudění a separaci plovoucích a sedimentujících trosk poškozené tepelné izolace. Rychle zhotovený jednoduchý model a na něm provedená ukázková série měření přispěly k věcné diskusi o této problematice.

Časový vývoj rychlostního pole v okolí ostrohranné překážky - clony v potrubí, při změnách směru toku.

V rámci grantu GAČR 101/97/0826 „Hydroelastická interakce proudící tekutiny s pružnou stěnou kanálu a aplikace v biomechanice krevního oběhu“ byl prováděn vstupní a ověřovací experiment. Použití metody PIV v první fázi umožnilo, všem zúčastněným, relativně velmi rychle získat celkové subjektivní posouzení charakteru proudění a nasměrování dalšího podrobného měření metodou LDA

Rychlostní pole uvnitř příbojové vlny.

Opět v rámci ověřovacího experimentu pro výpočtové modelování byl provedeno zajímavé měření uvnitř postupující vlny. Dokonalé prostorové souvislosti v rychlostním poli a mezi kapalnou a plynnou fází při každém jednotlivém pokusu ukazují výhodu použití metody okamžitého snímání celého rychlostního pole, na obtížně opakovatelné děje. Ukázka jednoho stavu rychlostního pole je na obr. č. 1.

Proudění za válcovou překážkou.

Téměř každý zná Kármánovu vírovou dráhu. Ne každý ji však vyděl. Skutečnost je jako obvykle složitější a nepravidelnější než je předpokládáno. Viz. obr. č. 2.

Pevná mříž rozvaděče odstředivého čerpadla.

V roce 1999 bylo provedeno rozsáhlé měření v rámci grantu PZ-HZ/11/99 „Měření prostorového proudění reálné tekutiny laserovými anemometry“. Největší objem prací si vyžádalo měření na rotočerpadle a pro tento úkol byly také využity finanční prostředky z grantu PZ-HZ/09/99 „Odtržené proudění v hydraulických zdrojích a jeho vliv na pracovní charakteristiky čerpadel pro energetická zařízení“ jehož nositelem je SIGMA výzkumný a vývojový ústav, Lutín. Byl využit existující zkušební okruh rotočerpadla, s průhlednou čelní stěnou, v laboratoři Odboru hydraulických strojů Victora Kaplana, Energetického ústavu, Fakulty strojní, VUT v Brně. Rotočerpadlo bylo upraveno zhotovením optického vstupu pro laser v boční stěně spirály. Dále byl okruh upraven, aby bylo možno vyřadit zásobní tlakovou nádrž a co nejvíce zmenšit celkový objem trati. Také díky tomu že bylo získáno dostatečné množství levných částic (odpad z výroby Krastenu a Koplenu z Kaučuku Kralupy) nebyl již problém dosáhnout potřebné koncentrace sycení částicemi. Nakonec zůstalo neodstranitelné omezení maximální měřitelné rychlosti proudění vyplývající z vlastností dané měřicí soupravy PIV (řešením je pouze zakoupení pulzního laseru) a ne zcela zvládnutý problém s čistotou – nezakalením proudícího média. Přesto bylo získáno mnoho cenných informací.

Vizualizace proudění na výstupu z trysky

Poněkud výjimečná úloha, voda není kompaktním proudícím médiem ale rozpadá se ve vzduchu na jemné kapky. K vizualizaci proudění na výstupu z trysky bylo využito pouze dílčí části 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. č.3. 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. Další krok metody PIV - automatické zpracování obrazů korelačními metodami - nebylo možné použít z důvodu neustálé změny velikosti a tvaru jednotlivých kapek vody v průběhu i velmi krátkého časového úseku. Proto byla použita pracnější metoda subjektivního vyhledávání lokálních oblastí v zaznamenaných obrazech, které vyhovují nutným podmínkám pro další zpracování. Takto byla poskládáním dílčích detailů získána informace o celkovém rozložení rychlostí v poli. Střední dopředná rychlost kmitajícího paprsku v krajních polohách (úvratích) byla přibližně  $12 \text{ m s}^{-1}$  a ve střední oblasti přibližně  $10 \text{ m s}^{-1}$ . Frekvence překmitávání paprsku byla přibližně 170 Hz a je závislá na průtoku tryskou.

Stavidlo

V rámci výzkumu pro zahraničního zákazníka byla v první etapě ještě před stavbou velkého modelu provedena série ukázkových měření metodou PIV. Na řadě různých tvarů spodní hrany stavidla a dosedacího těsnění byly velmi názorně demonstrovány základní vlastnosti těchto uspořádání. Příklad snímku je na obr. č.4.

Rozbočnice

Na pracovišti Odboru hydraulických strojů Victora Kaplana, Fakulty strojního inženýrství, Energetického ústavu, VUT v Brně je v současnosti řešen grant č.: 101/99/P027 „Třírozměrné nestacionární proudění tekutiny v rozvětvení s aplikacemi v biomechanice krevního oběhu“. V jedné z prvních etap řešení daného úkolu byl zhotoven model rozbočení tvaru „T“ s jedním přítokem a dvěma regulovatelnými odtoky pro verifikaci výpočtového modelování. 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. Výrazné zkvalitnění výsledků tohoto experimentu přineslo použití fluorescentních částic a příslušného interferenčního filtru na kameře. Tím byl snížit negativní vliv rozzářeného materiálu stěn. Při měření byly všechny tři větve rozvětvení i osvětlovací laserová světelná rovina ve vodorovné poloze a záznamová kamera byla svisle zavěšena. Osvětlovací rovina může, do určité míry, procházet modelem i mimo rovinu v níž leží osy trubic. Ze získaných výsledků je zřejmé, že požadavek na získání celkového obrazu o proudění v rozbočnici je poměrně velmi dobře splněn zvolenou metodou měření. Jde sice o třírozměrný charakter proudění, obzvláště v boční větvi, ale vzhledem k relativně nízkým rychlostem je i tato situace dobře zvládnutá. Na obr. 5 je příklad jednoho okamžitého stavu rychlostního pole v odbočnici.

#### Vícenásobné stísněné impaktní proudy

V roce 2000 prováděli pracovníci Ústavu termomechaniky AVČR v Praze třetí závěrečný rok výzkumu, podporovaného Grantovou agenturou České republiky „Aerodynamika impaktních proudů z hlediska využití ve strojírenství“ 101/98/1041. Problematika narážejících proudových paprsků se vyskytuje v mnoha technických aplikacích, například při vnitřním chlazení lopatek spalovacích turbín nebo při sušících procesech v textilním a papírenském průmyslu. Ke studiu tohoto typu proudění bylo použito hlavně numerické modelování softwarem FLUENT. Pro nezbytný ověřovací experiment byl na pracovišti autora postaven fyzikální model a byla provedena rozsáhlá sada měření rychlostních polí metodou PIV.

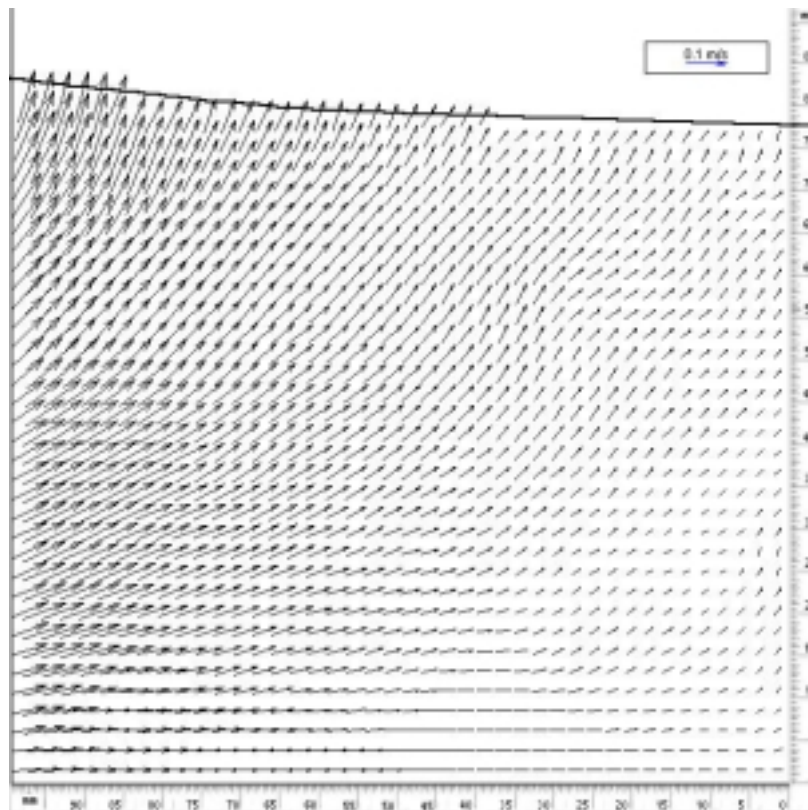
Výsledky měření byly objednavateli předány ve formě animovaných sérii okamžitých stavů vyhodnocených vektorových polí, animovaných sérii výchozích černobílých fotografií unášených částic (umožňují, byť pouze subjektivně, sledovat i ty nejjemnější koherentní struktury) a časově středovaných vektorových polí (získaných statistickým zpracováním 40-ti okamžitých stavů). Dále byl ke každé sérii měření pořízen krátký videozáznam pro prohloubení subjektivního dojmu. Všechny tyto podklady velmi významně posloužily k dotvoření celkové představy o charakteru daného proudění a výběru nejvhodnějšího matematického modelu. Obr. č. 6 je ukázkou časově středovaného obrazu změřeného rychlostního pole při jednom proudovém režimu (střední průřezová rychlost v dýzách  $0,446 \text{ ms}^{-1}$  a v hlavním kanálu  $0,082 \text{ ms}^{-1}$ ) v měrném řezu procházejícím osami všech tří vstupních trysek.

#### Proudění chladící kapaliny v hlavě a bloku spalovacího motoru

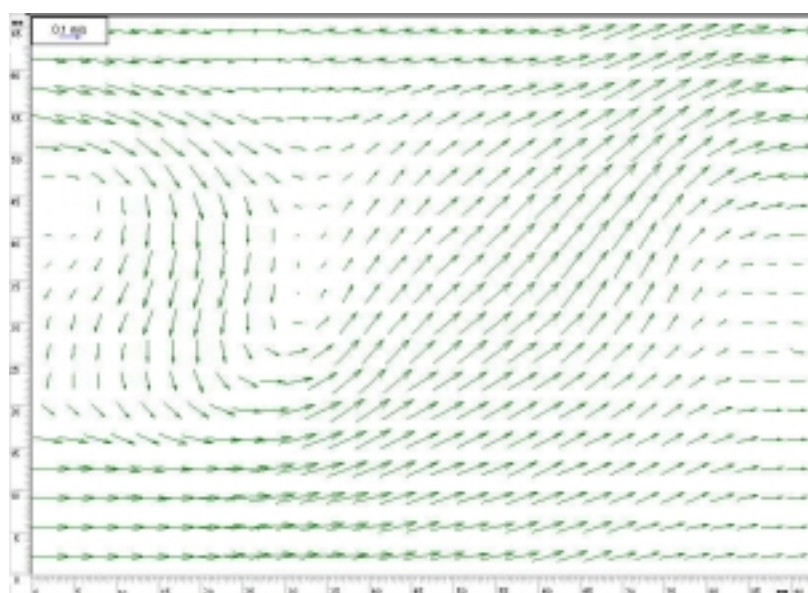
V současnosti probíhá rozsáhlé měření pro účely optimalizace daného děje. Objednavatel - Škoda Auto a. s. Mladá Boleslav se rozhodl pro urychlení a zkvalitnění vývoje nového motoru využít také nejmodernější měřicí techniku. Pro účely aplikace Integrální laserové anemometrie byl hliníkový blok motoru vybaven mnoho optickými vstupy a hlava motoru byla celá odlita z průhledné hmoty. Extrémní komplikovanost tvarů vnitřních dutin, kterými protéká chladící kapalina motorem, nedovoluje zatím vytvoření matematického modelu a proto v tomto vyjimečném případě neslouží výsledky měření k verifikaci výpočtových postupů ale k urychlení náročného empirického výzkumu.

## Závěr

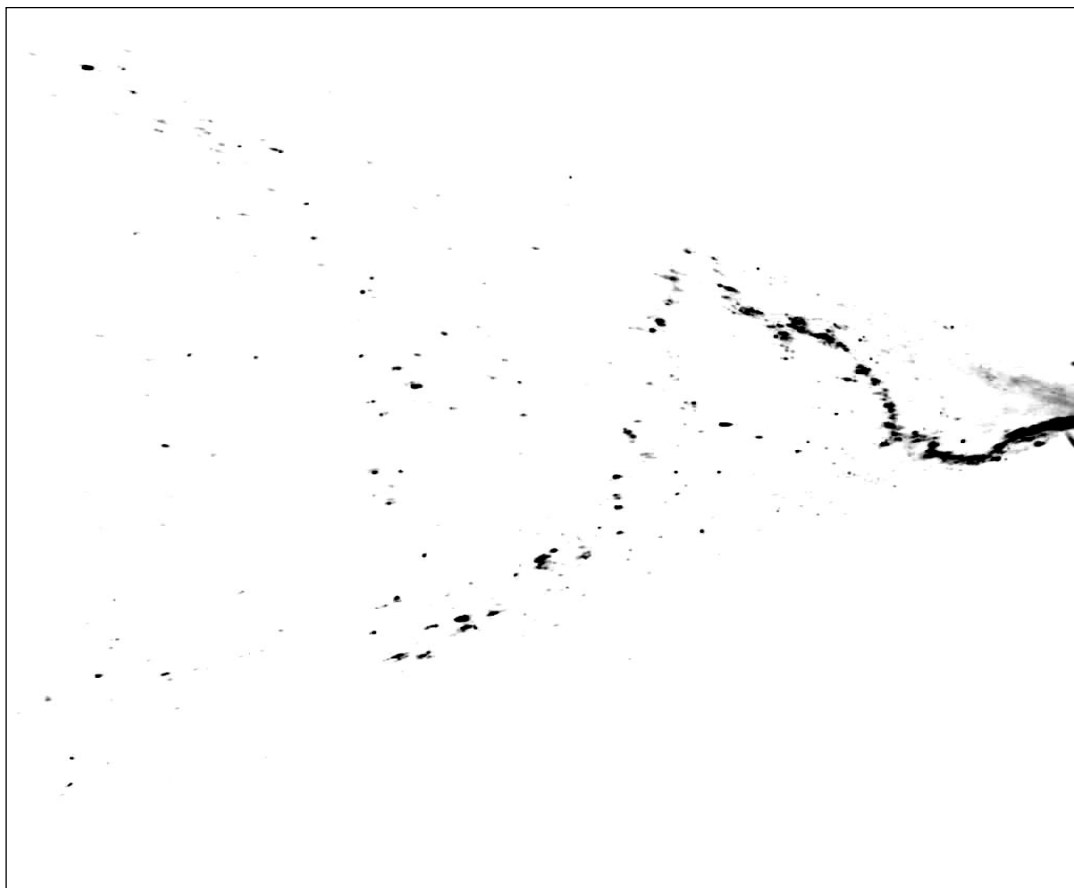
Porovnání LDA a PIV ukazuje možnost získávání rychlejšího celkového přehledu pomocí PIV oproti přesnějšímu a detailnějšímu měření pomocí LDA, ale za cenu mnohem větší pracnosti. Ovšem hlavní přednost PIV je možnost sledování vývoje rychlostního pole při nestacionárním ději, což při podrobnějším pohledu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



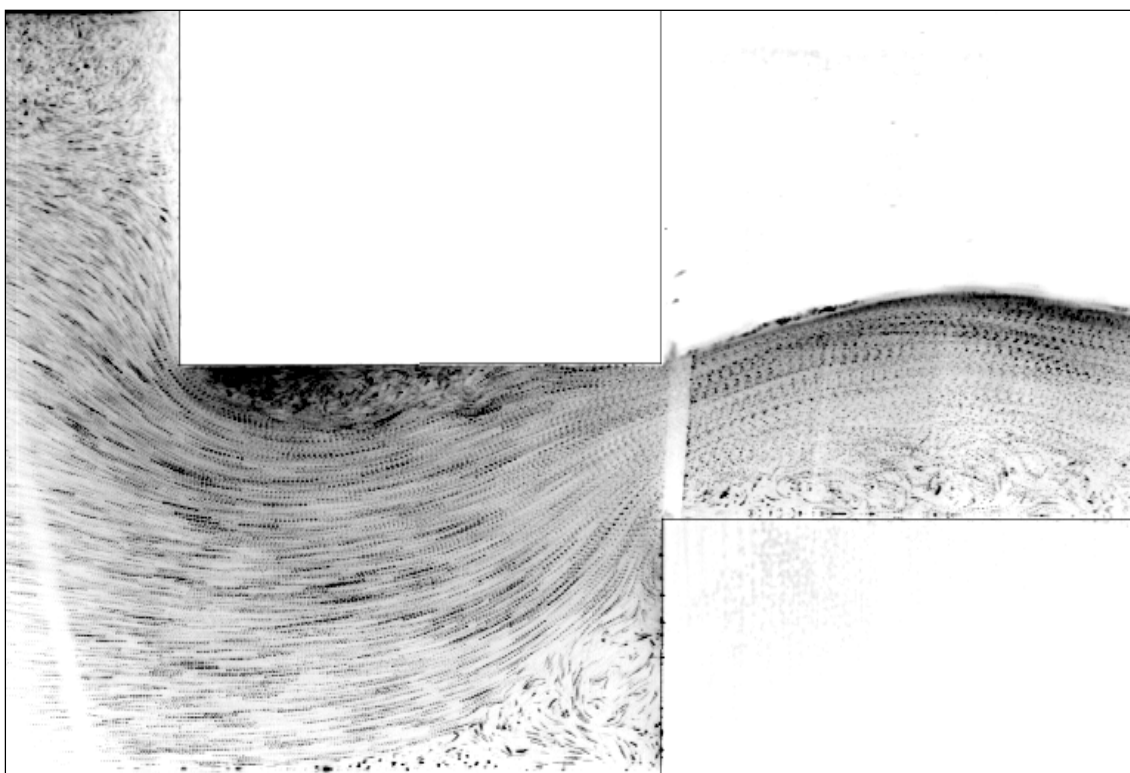
Obr.1 Rozložení rychlostí uvnitř postupující vlny.



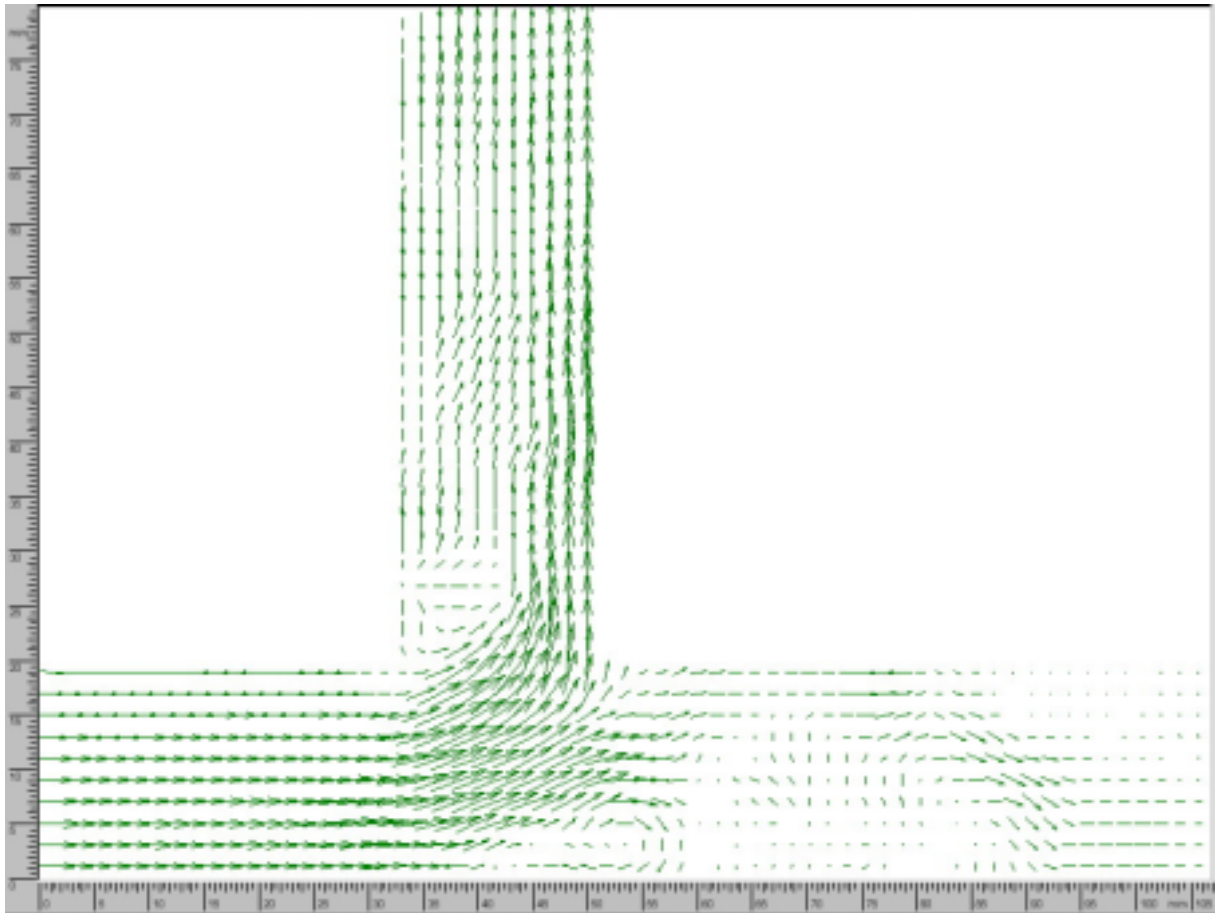
Obr.2 Rozložení rychlostí za válcovou překážkou.



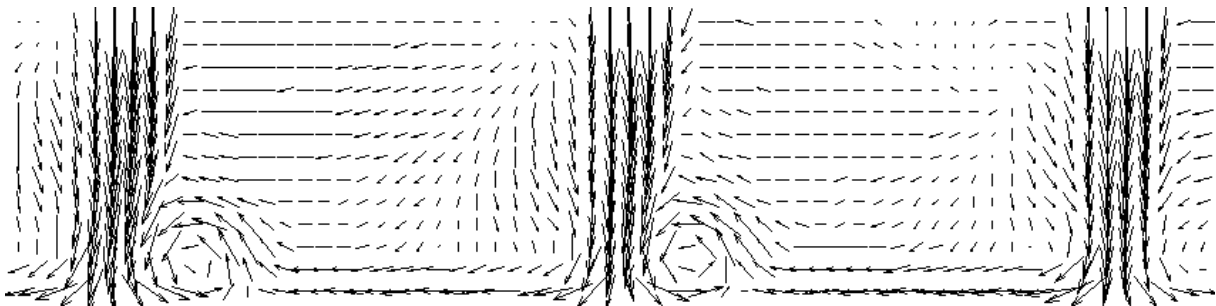
*Obr.3 Kapky vody za oscilační tryskou.*



*Obr.4 Obrázek unášených částic při obtékání spodní hrany stavidla.*



*Obr.5 Okamžité rychlostní pole v odbočnici.*



*Obr.6 Časově středované rychlostní pole v měrném řezu procházejícím osami všech tří vstupních trysek.*