

# PIV MEASURING EXTREMELY SLOW VELOCITIES

## PIV MĚŘENÍ VELMI NÍZKÝCH RYCHLOSTÍ

Pavel ZUBÍK

### Abstrakt

Příklad použití bezkontaktní měřicí metody – rovinné laserové anemometrie (Particle Image Velocimetry - PIV) pro stanovení rozložení velmi nízkých rychlostí proudění vody ve válcové nádobě.

### 1. Úvod

V Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně byl proveden experiment na objednávku řešitele – Ing. Pavel Rudolf (Odbor fluidního inženýrství Victora Kaplana, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně) – výzkumných projektů podporovaných Grantovou agenturou České republiky „Tvarová optimalizace difuzoru se vstupní obvodovou složkou rychlosti“ reg. č.: 101/06/P190 a „Kavitující vírové struktury vyvolané rotací kapaliny“ reg. č.: 101/09/1715. Cílem experimentu bylo získat verifikační data pro výpočtové modelování rozpadajících se vírů ve válci s rotujícím diskem. Následující text stručně popisuje řešení daného úkolu.

K měření byla použita rovinná laserová anemometrie (Particle Image Velocimetry (PIV)) – posloužila k měření rozložení složek rychlostí promítnutých do měrné roviny a zjištění jejich proměnlivosti v čase.

### 2. Měřený model

Ve svise ustaveném průhledném nehybném válci (DN 190 mm) byl ve výšce 2 x DN nad pevným dnem umístěn rotující disk. Hladina vody ve válci mírně přesahovala polohu disku. Na obr. 1 je celkový pohled na pracoviště. Třením mezi pomalu rotujícím diskem a kapalinou došlo k uvedení kapaliny do pohybu a vytvoření různých vírových útvarů v závislosti na rychlosti rotace disku. Postupně bylo měřeno při 14-ti různých otáčkách disku. Svislá měrná rovina procházela kolmo přes boční stěnu válce – osa válce ležela v měrné rovině (měrná rovina „dělila“ válec na dva stejné půlválce).

Za základní parametr, definující jednotlivé režimy chodu modelu, bylo vzata hodnota Reynoldsova kriteria  $Re = \frac{R^2 \cdot \omega}{\nu}$ , kde R je poloměr válce,  $\omega$  je úhlová rychlost disku a  $\nu$  je kinematičká viskozita. K pohonu disku byly použity dva různé motorky a následně vznikly dvě skupiny zvolených hodnot Re. První skupina: 150 000, 120 000, 90 000, 60 000, 30 000, 15 000. Druhá skupina: 3 200, 3 080, 2 700, 2 300, 1 990, 1 750, 1 600, 1 500.

### 3. Odstranění optických vad

Vzhledem k válcovému rozhraní mezi modelem a okolním vzduchem bylo nutno se vypořádat s průvodními optickými vadami v zaznamenaných snímcích odrazných částic. Na obr. 2 je vidět několik svislých světlých čar (odlesky na válcové stěně) symetricky rozmístěných napravo a nalevo od osy válce. Těch nejvýraznějších jsme se zbavili relativně velmi snadno tím, že předmětem hlavního zájmu objednatele byla oblast v blízkosti osy válce a proto byla měřená zóna zúžena právě mezi výše zmíněné odlesky. Další významnou optickou vadou je deformace obrazu způsobená efektem válcové čočky. Na obr. 2 tato

deformace není subjektivně téměř rozeznatelná, ale použitý opravný proces její existenci prokázal. Byl využit nástroj který je standardní součástí měřicího zařízení PIV fy. Dantec. Do osy válce byl umístěn kalibrační terčík (pravidelně rozmístěné tečky), zaznamenán jeho obraz přes stěnu modelu, stanoven opravný matematický algoritmus a ten následně aplikován na vyhodnocená rychlostní pole.

#### **4. Nastavování parametrů měření**

Jak uvádí již název toho příspěvku jednalo se o velmi nízké rychlosti proudění. V první skupině (hodnoty  $Re$  v řádu desítek tisíc) se jednalo o střední rychlosti v poli mezi 1,2 a 9,5 mm/s (maxima rychlostí v poli byla mezi 11 a 32 mm/s). Intervaly mezi 1. a 2. snímkem jednoho měření byly 6 až 15 ms (běžně se používají jednotky až stovky  $\mu$ s).

V druhé skupině (hodnoty  $Re$  v řádu jednotek tisíc) se jednalo o střední rychlosti v poli mezi 0,1 a 0,3 mm/s (maxima rychlostí v poli byla mezi 0,9 a 1,1 mm/s). Interval mezi 1. a 2. snímkem jednoho měření však již nelze nastavit na větší hodnotu než 15 ms. Proto pro druhou skupinu hodnot  $Re$  bylo nutno použít jiný přístup. Bylo upuštěno od běžného záznamu dvou snímků pro jedno měření. Kamera byla přepnuta do režimu záznamu jednotlivých snímků a do korelačního vyhodnocovacího procesu byly brány snímky z 1. a 2., 3. a 4., 5. a 6. ... měření. Tím se z intervalu mezi měřeními stal interval mezi snímky a bylo možno ho dále „natahovat“ na 0,25 až 1 s. Aby se také přiměřeně prodloužila doba, po kterou je snímána jedna série měření (pro získání časově středního stavu rychlostního pole), byly jednotlivé série měření rozděleny na 20 bloků po 10-ti měřeních s přestávkami mezi bloky 7 až 10 s.

#### **5. Průběh měření**

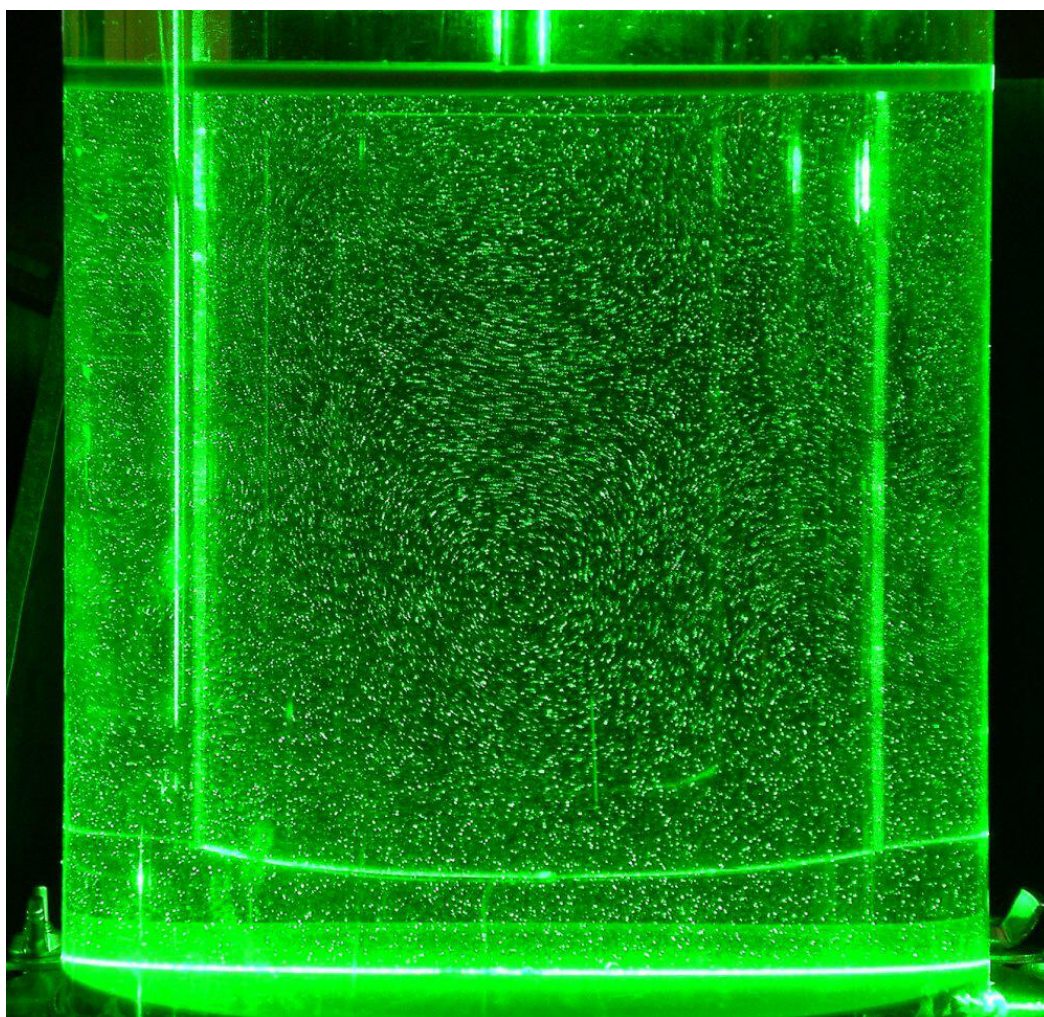
Měření začalo rozmícháním vhodného množství stopovacích částic (polyamidové kuličky se specifickou hmotností nepatrně větší než specifická hmotnost vody) a nastavením nejvyšších zvolených otáček. Postupně byly otáčky snižovány a před každým začátkem měření příslušné série byla ponechána prodleva aby se mohl vytvořit nový stav v rychlostním poli. Tyto prodlevy bylo nutno s klesajícími rychlostmi proudění prodlužovat až na přibližně  $\frac{3}{4}$  hodiny mezi nejpomalejšími režimy. To velmi prodlužovalo celý měřicí proces a při extrémně pomalých prouděních se značná část částic za tu dobu usadila na dně, přesto se domnívám, vzhledem k poměru sedimentačních rychlostí a sledovaných rychlostí, že sedimentace částic významně neovlivnila vyhodnocené rychlosti.

#### **6. Závěr**

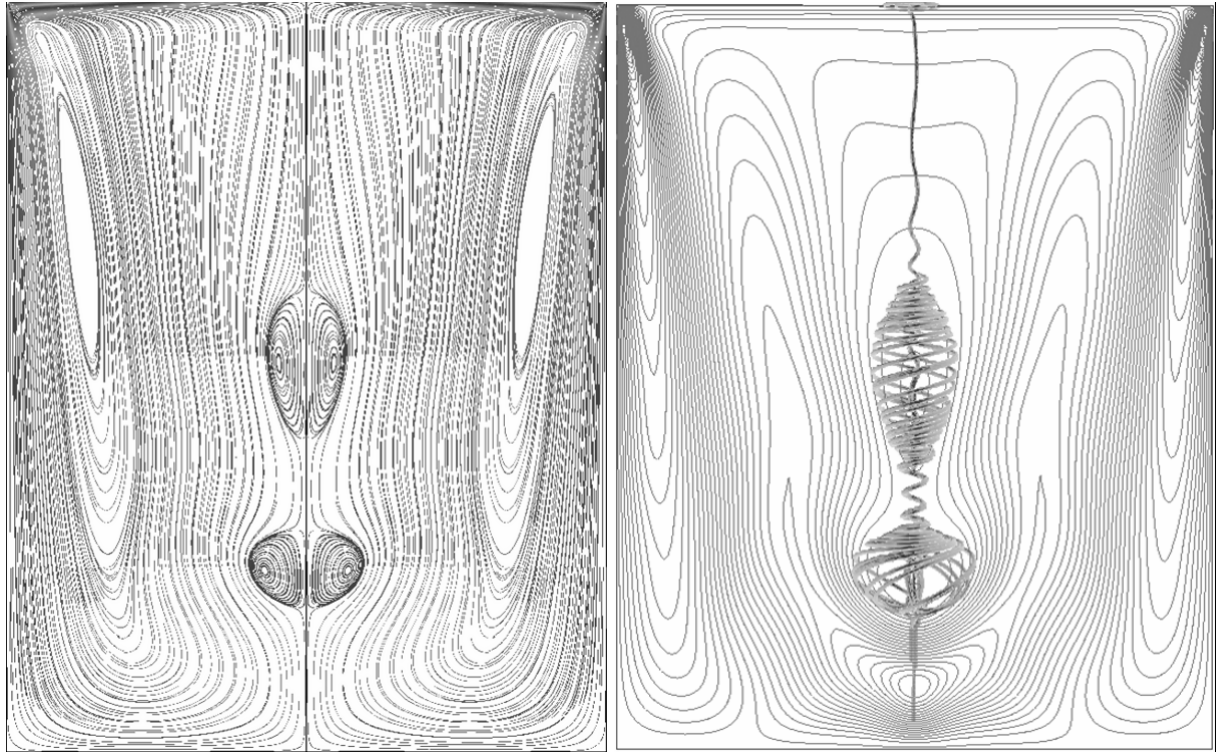
Přes značné obtíže s postupným snižováním četnosti odrazných částic (nakonec zůstala ve vznosu jen část těch nejmenších částic) se podařilo uskutečnit PIV měření i extrémně nízkých rychlostí proudění. Vhodnou kombinací možných režimů chodu měřicího zařízení bylo dosaženo toho, že limitujícím faktorem se nestaly technické parametry PIV soupravy, ale vlastnosti směsi měřené vody a stopovacích částic.



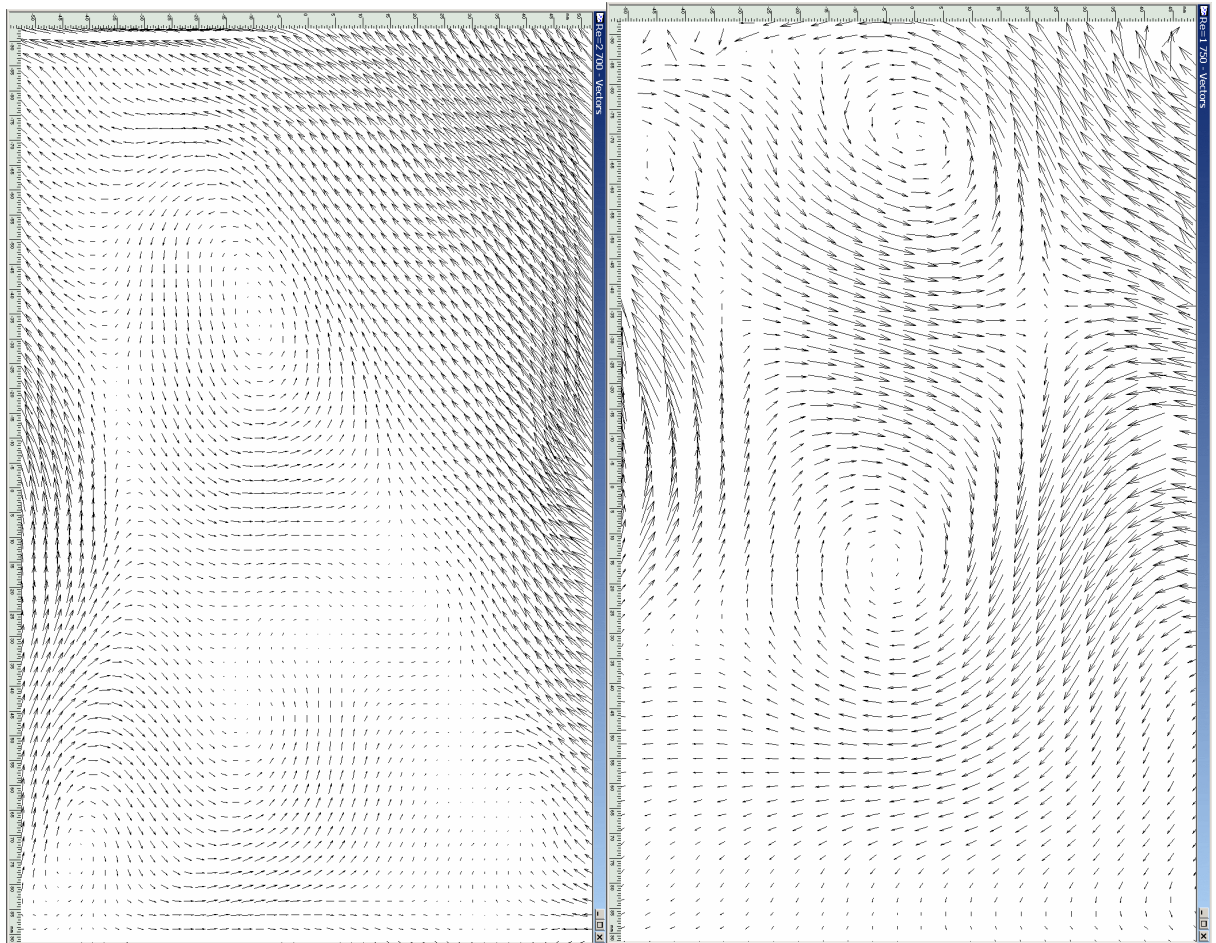
*Obr. 1 Celkový pohled na pracoviště*



*Obr. 2 Pohled na osvětlenou měrnou rovinu s částicemi*



**Obr. 3 Výstupy z matematického modelu**



**Obr. 4 Příklady naměřených rychlostních polí**