

PRIMJENA LASERA U MJERENJU PROTJECANJA FLUIDA KROZ MLAZNICE DLIJETA ZA BUŠENJE

Radenko DRAKULIĆ¹, Ivo STEINER² i Zdenko KRIŠTAFOR²

¹ INA-Info, Avenija Vukovar 78, Zagreb, Hrvatska;

² Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 41000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Lasersko mjerenje, Protjecanje fluida, Mlaznice dlijeta za bušenje, Brzina mlaza, Vizualizacija protjecanja

Prikazane su dvije optičke metode za precizno mjerenje brzine protjecanja fluida: mjerenje brzine na temelju Dopplerovog efekta upotrebom lasera (LDV) i mjerenje brzine fotogramom čestica (PIV), uz postupke za digitalnu obradu signala i snimaka. Prikazana je primjena tih metoda u ispitivanju protjecanja kroz mlaznice dlijeta za bušenje. Uz kratki pregled uloge mlaznica u bušenju, navedeni su dosad primijenjivani postupci njihovog optimiranja. Prikazani su i uzorci rezultata mjerenja mlaznog protjecanja LDV i PIV metodom za mlaznicu krušnog presjeka. Ukratko je komentirana postava eksperimenta zajedno s tijekom ispitivanja. Uz potencijalna poboljšanja mjerne opreme, navedene su mogućnosti upotrebe LDV i PIV metoda u brojnim primjenama u naftnom inženjerstvu.

Key-words: Laser measurement, Fluid flow, Drilling bit nozzles, Jet velocity, Fluid visualization

Two optical methods based on laser and video technology and digital signal and image processing techniques – Laser Doppler velocimetry (LDV) and Particle image velocimetry (PIV) were applied in highly accurate fluid flow measurement. Their application in jet velocity measurement of flows through drilling bit nozzles is presented. The role of nozzles in drilling technology together with procedures and tests performed on their optimization are reviewed. In addition, some experimental results for circular nozzle obtained both with LDV and PIV are elaborated. The experimental set-up and the testing procedure are briefly discussed, as well as potential improvements in the design. Possible other applications of LDV and PIV in the domain of petroleum engineering are suggested.

Uvod

U nizu inženjerskih primjena važno je razumijevanje kompleksnog gibanja tekućina i plinova. Protjecanje je često nehomogeno, stohastičko i samim time neprikladno za sustavno praćenje i mjerenje. No, upotrebom kompjutoriziranih numeričkih metoda, upotpunjenih simulacijama u laboratorijima koji su opremljeni zračnim tunelima i vodenim bazenima, moguće je doći do zanimljivih i korisnih spoznaja o ponašanju tekućina i plinova.

U određivanju karakteristika protjecanja najvažnije je precizno mjerenje brzine, odnosno određivanje parametara njezinog vektora. Klasične mjerne metode, kao na primjer mjerenje vrućom žicom (*Hot-wire anemometry*) ili mjerenje pomoću Pitotove ili Venturijeve cijevi, iako relativno točne, ipak uzrokuju sistematsku pogrešku jer se prilikom mjerenja koriste sonde koje mijenjaju karakteristiku toka.

Optičke metode, zasnovane na upotrebi koherentnog svjetlosnog izvora (lasera), te kompjutorske opreme za dobivanje i obradu velikog broja podataka, u prednosti su pred klasičnim metodama jer su neinvazivne, tj. ne remete tok umetanjem mjerne sonde. Ovako dobiveni rezultati su vrlo pouzdani i osim toga moguća su mjerenja kompleksnog gibanja u različitim postavama eksperimenta ili zahtjevnijih praktičkih aplikacija.

Za uspješnu primjenu optičkih metoda i postupaka za dobivanje podataka o brzini protjecanja, potrebna je adekvatna vizualizacija toka. Postupak vizualizacije obuhvaća dvije radnje:

- osvjetljivanje toka jakim svjetlosnim izvorom,
- ubacivanje sitnih čestica koje imaju svojstvo da uspješno prate promjene toka tekućine ili plina, dakle da ne izazivaju nikakve poremećaje i da imaju sposobnost reflektiranja svjetla (da bi se omogućio fotografski zapis i daljnja obrada tako dobivenih podataka).

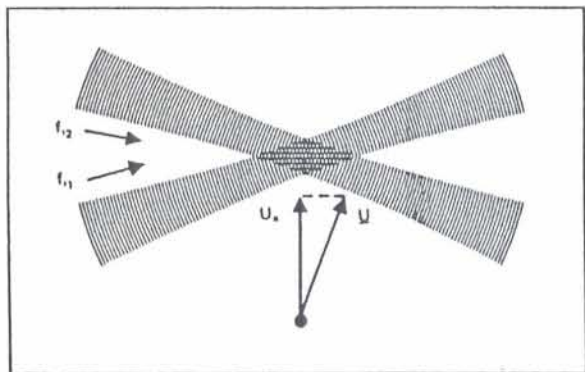
U ovom radu opisat ćemo dvije optičke metode: mjerenje brzine na temelju Dopplerovog efekta upotrebom lasera (Laser Doppler velocimetry – LDV) i mjerenje brzine čestica na fotogramu (Particle image velocimetry – PIV).

Mjerenje brzine na temelju Dopplerovog efekta upotrebom lasera – LDV

LDV je metoda razvijena tijekom 70-tih godina. Kao i kod mjerenja vrućom žicom, brzina se mjeri u jednoj točki (*single-point measurement*). Metoda se zasniva na Dopplerovom efektu koji se u optici manifestira kao promjena valne frekvencije svjetlosne zrake u ovisnosti o međusobnom relativnom gibanju izvora koherentne svjetlosne zrake i fotografskog aparata.

Laser se u LDV koristi kao izvor koherentne svjetlosne zrake koja se sustavom zrcala razdjeljuje na dvije zrake jednakih optičkih svojstava. Važna pretpostavka je da svjetlosni valovi u obje zrake imaju identične karakteristike (fazu i amplitudu). Zatim se uz pomoć leća zrake kolidiraju i u točki njihova presjecišta nastaje područje interferencije svjetlosnih valova. Ono se može vidjeti kao područje

naizmjenično tamnih ili svjetlih pruga jer u presjecištu zraka dolazi do superponiranja valnih bregova i dolova što se manifestira nastankom intenzivno svjetlih odnosno tamnih područja (sl. 1). Područje interferencije predstavlja mjerni obujam i obično je veličine oko 1 mm³.



Sl. 1 Interferencija dvije zrake
Fig. 1 Beam interference

Kada čestica, sadržana u mjerenom toku, prolazi kroz ovakav mjerni obujam, ona naizmjenično reflektira ili ne reflektira svjetlost. Svjetlost odbijena od čestice se registrira u foto-multiplikatoru koji, ovisno o načinu mjerenja, može biti smješten ispred ili iza mjernog obujma (*forward scatter – back scatter mode*). Fotografam s informacijom o brzini toka je Dopplerova frekvencija promjene intenziteta reflektirane svjetlosti, a to je vrijeme. Iz geometrijske se optike, poznavanjem valne dužine i kuta presijecanja zraka, može odrediti udaljenost među susjednim interferencijskim prugama u mjernom obujmu. Brzina čestice, odnosno protjecanja u toj točki, može se izračunati prema slijedećoj relaciji:

$$U_x = f_D \cdot d_f = f_D \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}$$

gdje su:

U_x – brzina protjecanja u ravnini interferencijskog područja okomita na interferencijske pruge

f_D – Dopplerova frekvencija

d_f – razmak interferencijskih pruga

λ – valna dužina laserske zrake

θ – kut presijecanja laserskih zraka.

LDV metoda daje vrlo točan podatak o brzini (srednja pogreška mjerenja je od 0,1 do 1%). Uz to, ima dodatnu prednost što daje kontinuirani signal, tj. predstavlja mjerenje brzine u stvarnom vremenu.

Nedostaci metode su teškoće vezane za postavljanje eksperimenta uz upotrebu klasičnih optičkih elemenata (leća) zbog relativno velike žarišne daljine koja povećava osjetljivost sustava na pomake mjernog obujma prouzrokovane vibracijama, mogućnost mjerenja tek jedne komponente brzine, te pokrivanje malog mjernog obujma.

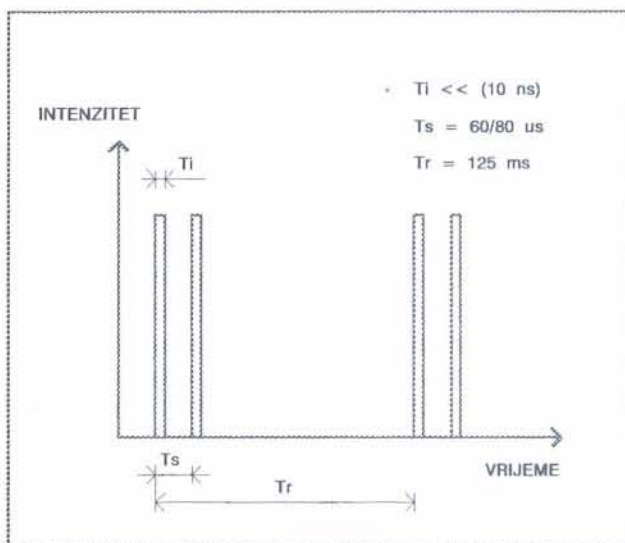
Mjerenje brzine fotografom čestica – PIV

PIV je novija metoda, razvijena sredinom 80-ih godina i na neki način je svojim komplementarnim

svojevremeno nadomjestak za uočene slabosti LDV metode. U PIV laser nema jednaku ulogu kao kod LDV. Naime, laser se ne koristi nužno kao izvor koherentne svjetlosti (jer se može raditi i s jakom bijelom svjetlošću), već kao vremenski kontrolirani izvor snažnih svjetlosnih impulsa. PIV metodom je omogućeno planarno (dvodimenzionalno) ili čak prostorno (trodimenzionalno) mjerenje brzine istovremeno u više točaka (*multi-point measurement*). Laserom se pulsno osvjetljava tok u koji su ubačene čestice mikronske veličine koje odlično odbijaju svjetlost. Fotografiranjem položaja čestica dobiva se zapis o putanji čestice, a daljim metodama digitalne obrade snimaka takav fotografski zapis se kompjuterski obrađuje i iz njega se određuje pomak, a posredno i brzina čestice, odnosno protjecanja.

Laserska zraka se pomoću sustava leća oblikuje u tanki snop konstantne debljine oko 1 mm kojim se planarno osvjetljava tok. Pri mjerenju, laserska zraka se prekida električnim ili mehaničkim putem (ovisno o tipu lasera, te potrebnoj učestalosti prekidanja). S time se dobiva niz jakih svjetlosnih impulsa kojima se osvjetljava tok u namjeri postizanja stroboskopskog efekta. Fotografskim aparatom, postavljenim okomito i na smjer protjecanja i na smjer laserskog snopa, snima se tok. Na negativu ostaje zapisan prvobitni položaj čestice, te njen pomaknuti položaj u toku (ili položaji, ovisno o broju svjetlosnih impulsa unutar jedne ekspozicije).

Karakteristične vrijednosti impulsa su slijedeće (sl. 2): trajanje laserskog impulsa je nekoliko desetaka nanosekundi, frekvencija impulsa (odnosno impulsnih paketa), ovisno o mogućnostima fotografskog pribora, je desetak herza, a razmak pojedinih impulsa u paketu je stotinjak mikrosekundi (što odgovara mjerenju brzine do 10 m/s).



Sl. 2 Raspored svjetlosnih impulsa
Fig. 2 Illuminating pulse distribution

Interpretacija fotografskog zapisa, odnosno analiza toka, ovisno o uvjetima snimanja može biti kvalitativna ili kvantitativna. U slučaju kvalitativne interpretacije, za vizualizaciju se koriste veće čestice, obično mješurici plina, dim ili sitne raspršene kap-

ljice vode ili ulja (Adrian, 1986). Odgovarajućom ekspozicijom na negativu se dobiva zapis čitave putanje, a ne samo početnih ili krajnjih položaja (*streak photography*).

Za kvantitativnu interpretaciju, prikladnija je upotreba male koncentracije vrlo sitnih čestica za označavanje toka. Dobiveni negativ (fotogram), koji se sastoji od velikog broja snimaka čestica, pod optičkim povećanjem se ispituje videokamerom dio po dio (cijeli negativ se vodoravno i uspravno razdjeli u nekoliko desetaka »prozora«). Izlazna snimka se digitalizira i promatrani prozor negativa se pretvara u polje sivih tonova (Liu, 1990). Takav zapis se obično sastoji od 256×256 elemenata (pixela), a u hardverski moćnijoj obradi, 512×512 ili čak 1024×1024 elemenata.

Daljom obradom treba pronaći »originalne« čestice i njihove partnere, odnosno sliku originala u pomaknutom položaju. S obzirom da je razmak impulsa (vrijeme) poznat, a udaljenost među česticama se odredi algoritmom digitalne obrade snimaka, brzina se izračuna kao

$$\bar{v} = \frac{M \bar{d}}{t}$$

gdje su:

\bar{v} – vektor brzine

M – optičko povećanje

\bar{d} – vektor pomaka slike čestica

t – vrijeme između laserskih impulsa.

Za obradu snimaka upotrebljavaju se metoda Youngovih interferencijskih pruga, prostorna korelacija, te postupak direktne ekstrakcije slike (Dudar, Maynard i Simpkins, 1987, Adrian, 1986. i Liu, 1990). Detaljnija objašnjenja metoda nalaze se u navedenoj literaturi.

LDV i PIV metoda u mjerenju mlaznog protjecanja

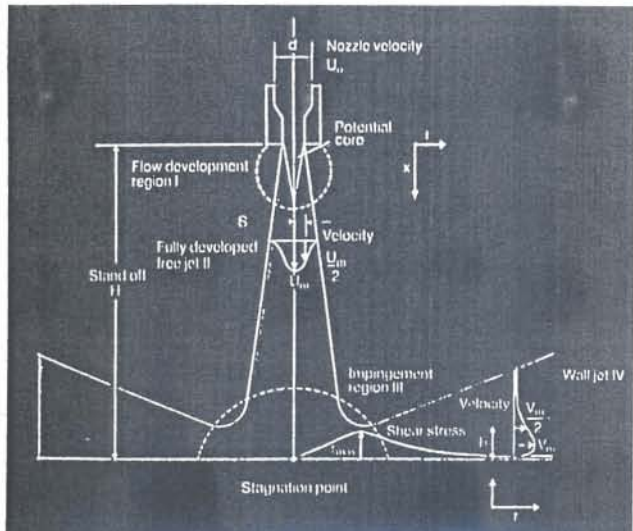
Predstavljanjem LDV i PIV metode, te usporedbom dobivenih rezultata, pokazana su njihova međusobna komplementarna svojstva s tehničkog gledišta te su ocijenjene mogućnosti u nizu primjena u naftnom rudarstvu.

Primjena mlaznica u bušenju

Navedenim metodama ispitivane su mlaznice različitog profila otvora: kružnog, kvadratnog, pravokutnog i eliptičnog. Promatranjem i ustanovljivanjem područja potencijalne jezgre za pojedini tip mlaznice (slika 3), omogućen je odabir mlaznice, odnosno optimalne konfiguracije dlijeta za bušenje.

Uloga mlaznica u dlijetima za bušenje je višestruka i njihovom je optimiranju posvećeno mnogo znanstvenih radova u posljednja četiri desetljeća. Temeljni razlozi za upotrebu mlaznica u bušenju su slijedeći:

- djelotvorno odstranjivanje krhotina nastalih ispod dlijeta, odnosno čišćenje dna bušotine,
- smanjivanje zadržavanja krhotina na dnu uslijed razlike u tlaku tekućine u bušotini i tlaka na dubini bušenja (zbog negativnog utjecaja na čišćenje dna i brzinu prodiranja),



LEGENDA:

Nozzle velocity - Brzina mlaza

Potential core - Potencijalna jezgra

Stand off - Udaljenost od dna

Stagnation point - Točka stagnacije mlaza

Shear stress - Smično naprezanje

Flow development region - Područje razvoja mlaza

Fully developed free jet - Potpuno razvijeni slobodni mlaz

Impingement region - Područje udara mlaza

Wall jet - Rubno područje mlaza

Sl. 3 Struktura turbulentnog mlaza koji udara o ravnu površinu
Fig. 3 Structure of a turbulent jet impinging on a flat surface

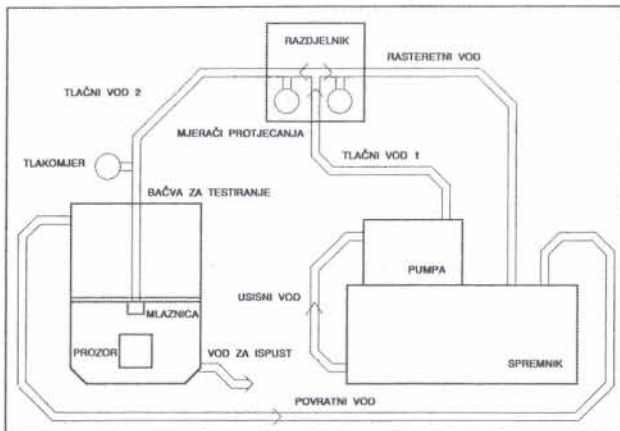
– erozija dna bušotine u mekanijim geološkim formacijama.

Ovisno o mjerenim hidrauličkim pokazateljima, varira i pristup njihovom optimiranju. Osim brzine mlaza, najvažniji mjerni pokazatelji su udarna sila, kinetička energija i hidraulička snaga. Na navedene pokazatelje, osim oblika mlaznice utječe i udaljenost mlaznice od dna bušotine, broj, veličina i smještaj mlaznica u dlijetu.

Većina do sada primijenjenih postupaka zasniva se na raznim mjerenjima udarnog tlaka (Eckel i Bielstein, 1951, Sutko i Myers, 1971, Warren i Winters, 1982, Wells, 1987.). Također je dosta korišten postupak mjerenja vrućom žicom (Davis i Winarto, 1980, Gavignet, Bradbury i Quetier, 1985.), a provedena su i istraživanja s označavanjem i kvalitativnim snimanjem toka (Feuerstein i Woods, 1973, Glowka, 1981.). Od neinvazivnih mjernih metoda zasnovanih na upotrebi lasera, provedena su istraživanja s LDV (Wells, 1984.), dok PIV nije do sada bila primijenjivana. Mlaznice s različitim oblikom otvora (trodimenzionalne mlaznice), ispitivali su i Rajaratnam i Pani, (1974.) te Knowlton i Huang, (1982.).

Postava eksperimenta

Prema slici 4, eksperimentalni sustav se sastoji od električne triplex pumpe stalne dobave od približno $60 \text{ dm}^3/\text{min}$, tlačnih i povratnih vodova, razdjelnika,



Sl. 4 Postava eksperimenta
Fig. 4 Experimental apparatus

te bačve za testiranje s prozorima za promatranje. Povratni vod umjetno regulira količinu protjecanja. Glavni tlačni vod učvršćen je unutar bačve za testiranje na poprečno postavljenoj stalku koji se može podešavati po visini. Stalak ima otvor za smještaj izmjenjivih mlaznica. Sama bačva ima dva otvora – jedan je većeg presjeka i služi kao preljev kojim se zatvara optičaj tekućine, dok je drugi pomoćni, s ventilom, i služi za otjecanje tekućine prilikom čišćenja bačve ili regulacije koncentracije čestica.

Tijekom mjerenja količina tekućine i koncentracija reflektirajućih čestica u optjecanju je konstantna. Preko tlakomjera smještenog na izlazu glavnog tlačnog voda i mjerača količine protjecanja u razdjelniku, kontroliraju se i računaju karakteristični hidraulički pokazatelji prema slijedećim relacijama (Bourgoyne et al. 1986):

$$v_n = C_d \sqrt{\frac{2000 P_b}{\rho}}$$

$$F_i = C_d Q \sqrt{2000 P_b \rho}$$

$$N_H = P_b Q$$

$$Re = \frac{D v_n \rho}{\mu}$$

gdje su:

- v_n – brzina mlaza, m/s
- C_d – koeficijent pražnjenja
- P_b – smanjenje tlaka u mlaznici, kPa
- ρ – gustoća, kg/m³
- F_i – udarna sila, N
- Q – protjecanje, m³/s
- N_H – hidraulička snaga, W
- D – promjer mlaznice, m
- μ – viskoznost fluida, kg/ms.

Bačva za testiranje ima i tri prozora smještena na istoj visini. Dva su smještena jedan nasuprot drugom, dok je treći postavljen okomito na njih. Nasuprotno postavljene prozori služe za upad laserskog snopa kod PIV mjerenja, a treći za snimanje fotografskim aparatom.

Rezultati mjerenja s LDV metodom

Uz opisanu mehaničku postavu eksperimenta, za mjerenje je upotrijebljen DANTEC-ov LDA2D

optoelektronički sustav za mjerenje i obradu podataka s argonskim laserom male snage (500 mW) kao kontinuiranim izvorom svjetlosti. S obzirom da je upotrijebljen sustav s optičkim vlaknima umjesto standardne postave sa sustavom leća, značajno je olakšano postavljanje mjerne sonde. Optička mjerna sonda je bila uronjena u bačvu za testiranje i 50 mm udaljena od mjernog obujma. Sonda je istovremeno bila i izvor i prijemnik signala, a postavljena je tako da je mlaz, prolazeći ravninom određenom dvjema kolimiranim zrakama, bio okomit na smjer nastalih interferencijskih pruga.

Upotrijebljene su reflektirajuće čestice sfernog oblika, promjera 30 μm i obujamske mase 1020 kg/m³ što je zadovoljavalo kriterij o adekvatnom slijedenju karakteristika protjecanja (Adrian, 1986.).

Tijekom mjerenja, uz mjerače protjecanja, kontrolirana je i vrijednost tlaka na izlazu tlačnog voda. Također, promatrani su i drugi pokazatelji na pripadajućoj elektroničkoj opremi, vezani uz digitalnu obradu foto-signalu. Ispitivana je kružna mlaznica promjera 4.0 mm (površina presjeka 12.57 mm²), pri tlaku od približno 6 bara (Drakulić, 1992). U tablici 1 navedene su vrijednosti karakterističnih hidrauličkih pokazatelja.

Maksimalna brzina, m/s <i>Maximal velocity, m/s</i>	31,53
Tlak, kPa <i>Pressure, kPa</i>	550,70
Udarana sila, N <i>Impact force, N</i>	12,49
Hidraulička snaga, W <i>Hydraulic horsepower, W</i>	218,25
Reynoldsov broj, $Re \times 10^5$ <i>Reynolds number, $Re \times 10^5$</i>	1,11

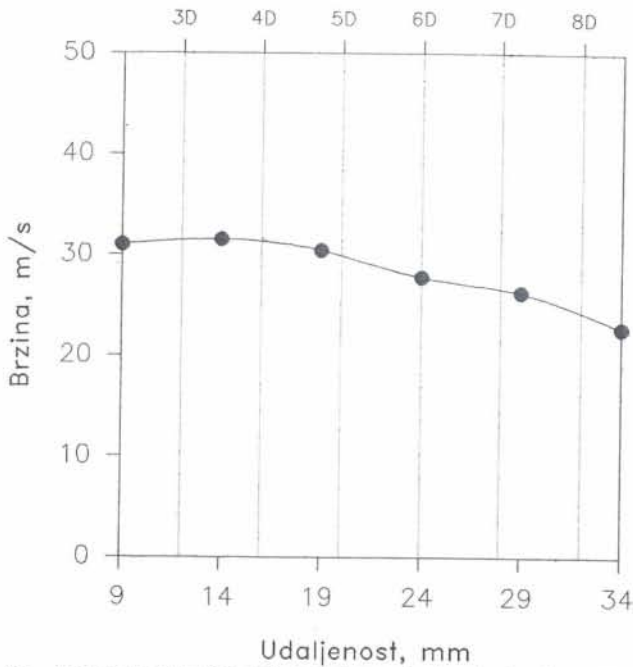
Tablica 1 Hidraulički pokazatelji za mlaznicu kružnog presjeka pri 6 bara – LDV

Table 1 Hydraulic parameters for circular nozzle at 6 bars – LDV

Upotrebom posebno dizajniranog mehanizma, mlaz je ispitivan u šest točaka na osi mlaznice. Slika 5 prikazuje raspored izmjerenih brzina u tim točkama, te je moguće donijeti zaključak o duljini potencijalne jezgre. Na slici 6 još je prikazan tipičan raspored brzina u Dopplerovom signalu. Usrednjavanjem brzina svih uzoraka određena je i brzina mlaza u mjerenoj točki.

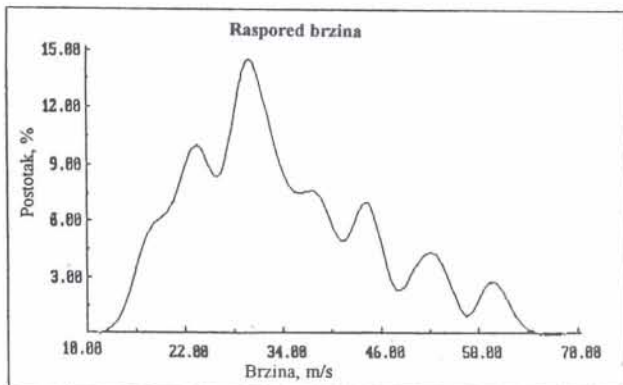
Rezultati mjerenja s PIV metodom

Primijenjen je pulsni Nd-YAG laser koji emitira svjetlost valne dužine 532 nm. Ova valna dužina pogodna je za mjerenja u vodi zbog minimalne atenuacije intenziteta svjetlosti. Prilikom rada s laserom, posebnu pažnju je potrebno posvetiti zaštiti od laserskog zračenja. Naime, totalna energija sadržana u dva proizvedena laserska impulsa je 125 mJ, a trajanje impulsa je desetak nanosekundi, što daje



Sl. 5 Raspored brzina duž centralne osi mlaznice kružnog presjeka pri 6 bara (LDV)

Fig. 5 Jet velocity distribution along the central axis of the circular nozzle at 6 bars (LDV)



Sl. 6 Raspored brzina u Dopplerovom signalu za mlaznicu kružnog presjeka pri 6 bara (LDV)

Fig. 6 Jet velocity distribution in the Doppler burst for the circular nozzle at 6 bars (LDV)

snagu impulsa reda veličine 1 MW. Razmak impulsa u dubletu je, ovisno o mjerenoj brzini, od 60 do 80 μ s s frekvencijom dubleta od 8 Hz (slika 1). To je uz ekspoziciju snimanja od 1/8 sekundi osiguravalo da negativ sadrži samo jednu snimku originalnog položaja čestice i njen korespondirajući pomaknuti položaj.

Upotrijebljene su jednake reflektirajuće čestice kao pri mjerenju LDV metodom. Od fotografskog pribora korišten je fotoapararat Nikon 35 mm s Micro-Nikkor objektivom od 55 mm. Otvor objektiva postavljen je na zaslon $f = 2,8$ a korišten je Kodak T-max film, osjetljivosti 400 ASA. Tijekom mjerenja praćeni su standardni mjerni uređaji na mehaničkoj opremi (mjeraci protjecanja, te vrijednost tlaka na izlazu tlačnog voda). Oblik, trajanje i repeticija laserskih impulsa kontrolirani su na ekranu osciloskopa.

Negativ je obrađivan u posebno dizajniranom sustavu za ekstrakciju slike, postavljanjem u kompu-

Maksimalna brzina, m/s <i>Maximal velocity, m/s</i>	28,47
Tlak, kPa <i>Pressure, kPa</i>	449,05
Udarna sila, N <i>Impact force, N</i>	10,19
Hidraulička snaga, W <i>Hydraulic horsepower, W</i>	160,70
Reynoldsov broj, $Re \times 10^5$ <i>Reynolds number, $Re \times 10^6$</i>	1,00

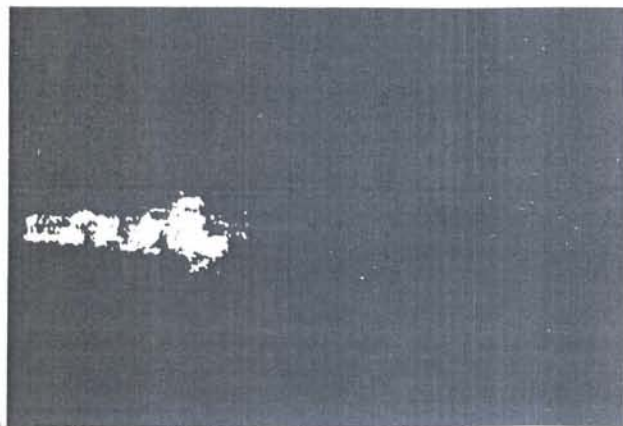
Tablica 2 Hidraulički pokazatelji za mlaznicu kružnog presjeka pri 6 bara – PIV

Table 2 Hydraulic parameters for circular nozzle at 6 bars – PIV

torski upravljani sustav za uspravno i vodoravno pomicanje. Negativ je zatim presniman CCD crno-bijelom tehnikom pomoću video-kamere pod različitim optičkim povećanjem. Izlazni signal je digitaliziran pomoću DT 2862 digitalizatora koji je svaku ispitivanu sliku podijelio u 512×512 elemenata. Za daljnje procesiranje digitalnog podatka metodom digitalne ekstrakcije slika (Liu, 1990.) korišten je sustav s osobnim računalom i opremom za paralelno procesiranje.

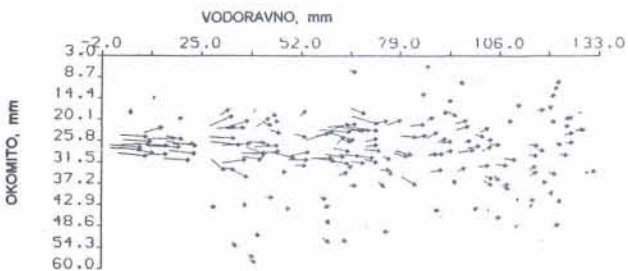
PIV metodom je ispitivana ista kružna mlaznica. U tablici 2 navedene su vrijednosti karakterističnih hidrauličkih pokazatelja.

Na sl. 7 prikazana je fotografija protjecanja, dok slika 8 predstavlja vektore brzina u mlazu dobivene



Sl. 7 Mlaz iz mlaznice kružnog presjeka pri 6 bara (PIV)

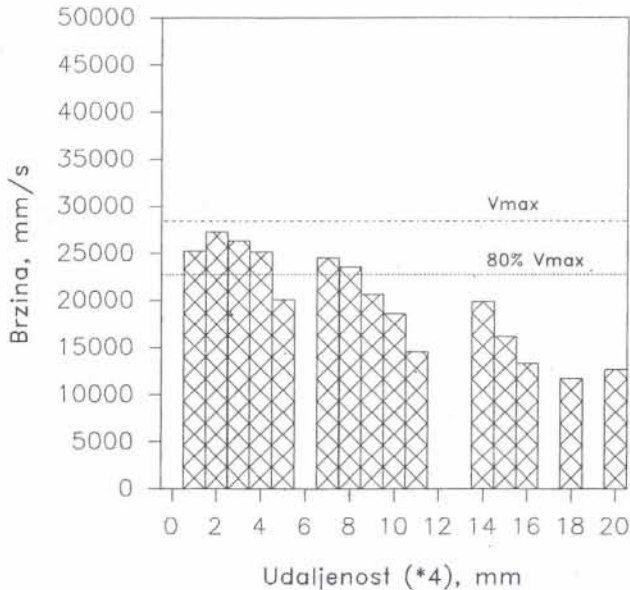
Fig. 7 Jet from the circular nozzle at 6 bars (PIV)



Sl. 8 Vektori brzina za mlaznicu kružnog presjeka pri 6 bara (PIV)

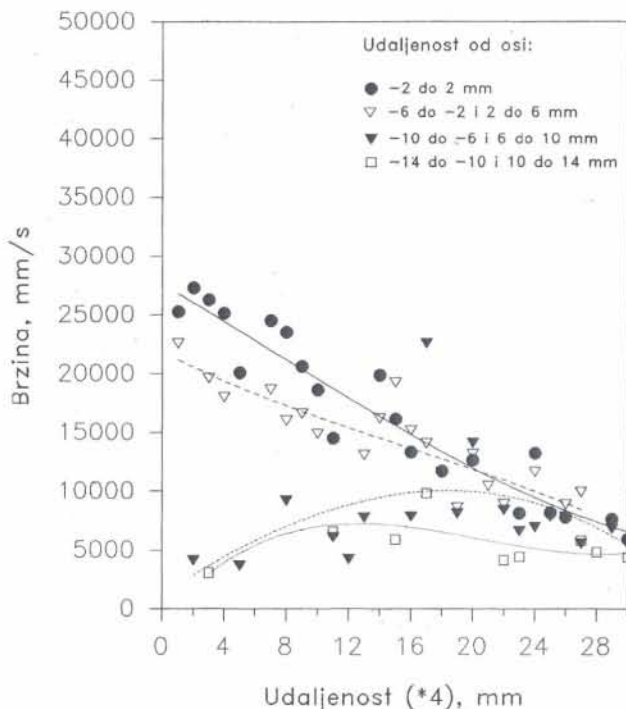
Fig. 8 Velocity vectors for the circular nozzle at 6 bars (PIV)

kao rezultat algoritma za digitalnu obradu negativa. Na sl. 9 je dijagram raspodjele brzina duž osi mlaznice i iz njega se može zaključiti o potencijalnoj jezgri mlaza. Na slici 10 prikazan je raspored brzina u 4 mm širokom pojasu iznad i ispod središnje osi mlaznice.



Sl. 9 Raspored brzina duž centralne osi mlaznice kružnog presjeka pri 6 bara (PIV)

Fig. 9 Jet velocity distribution along the central axis of the circular nozzle at 6 bars (PIV)



Sl. 10 Brzine u »prozorima« za mlaznicu kružnog presjeka pri 6 bara (PIV)

Fig. 10 Velocity in windows for the circular nozzle at 6 bars (PIV)

Diskusija i zaključak

Kao što je već napomenuto u uvodu PIV i LDV su međusobno komplementarne mjerne metode.

Rezultati dobiveni PIV metodom dali su općenitiju, dvodimenzionalnu sliku o brzini protjecanja, dok je LDV metodom slika o ponašanju mlaza dobivena iz određenog broja diskretnih mjerenja.

Mjerenja su pokazala da se rezultati dobiveni ovim dvjema metodama vrlo dobro poklapaju. Moguće razlike proizlaze iz slučajnih pogrešaka kod mjerenja tlaka i količine protjecanja koja služe za izračunavanje ostalih karakterističnih hidrauličkih pokazatelja. Također, istovjetni uvjeti za odvijanje PIV i LDV eksperimenata nisu mogli biti u potpunosti zadovoljeni jer su ovisili o točnosti mehaničkog sustava.

Preciznost optičkih metoda, iako vrlo velika, ipak ovisi o brojnim činiteljima, na primjer, o osjetljivosti filma, karakteristikama foto i video opreme, te rezoluciji digitalizatora snimaka. Kod LDV metode, uspješnost mjerenja ovisi o izboru veličine i koncentracije reflektirajućih čestica te adekvatnom podešavanju elektroničke opreme za obradu signala.

U postojećim uvjetima i s raspoloživom opremom, uspješno su izmjerene brzine visokoturbulentnih mlazeva do 50 m/s. Uz određene preinake postave eksperimenta, prvenstveno uz upotrebu pumpe boljih karakteristika (s manje pulzacija i s mogućnošću promjenjive dobave), te posebnih visokotlačnih komora u svrhu reduciranja pojave kavitacije, prikazanim optičkim metodama moguća su mjerenja brzine i do 100 m/s.

Osim primjene u optimiranju mlaznica dljetja za bušenje, navedene metode mogu imati i druge primjene u naftnom inženjerstvu, kao na primjer:

- točno mjerenje protjecanja plina neovisno o varijacijama količine protjecanja, kod iskušavanja i radova osvajanja proizvodnje, pri izlazu iz separatora u sabirnim stanicama, ili na ulaznim, odnosno završnim točkama magistralnih i distribucijskih plinovoda,
- nadzor svrsishodnog hidrodinamičkog dizajna postrojenja za bušenje, proizvodnju i transport na vodenim površinama (offshore),
- nadzor svrsishodnog aerodinamičkog dizajna tornjeva, jarbola, spremnika i drugih visokih struktura koje imaju primjenu u naftno-rudarskim djelatnostima.

Primljeno: 22. III. 1993.

Prihvaćeno: 27. V. 1993.

LITERATURA

- Adrian, R. J. (1986): Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow - a review. *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol. 7, No. 2, pp. 127-145.
- Bourgoyne, A. T., Chenevert, M. E., Millechem, K. K. and Young, F. S. (1986): *Applied Drilling Engineering*. SPE, Richardson, TX, pp. 128-131. i 156-162.
- Davis, M. R. and Winarto, H. (1980): Jet diffusion from a circular nozzle above a solid plane. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 101, part 1, pp. 201-221.
- Drakulić, R. (1992): The application of optical methods in jet flow measurement. M. Phil. thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, U. K.
- Dudderar, T. D., Meynart, R. and Simpkins, P. G. (1987): Full-field laser metrology for fluid velocity measurement. *Optics and Lasers in Engineering* 9, pp. 163-199.
- Eckel, J. R. and Bielstein, W. J. (1951): *Nozzle Design and its Effect on Drilling Rate and Pump Operation*. Drilling & Production Practice, API, pp. 28-46.

- Feuerstein, I. A. and Woods, D. R. (1973): A Photographic Technique for Measuring Fluid Velocities with Tracer Particles. *Journal of Society of Motion Pictures and Television Engineers (SMPTE)*, Vol. 82, pp. 916–920.
- Gavignet, A. A., Bradbury, L. J. and Quetier, F. P. (1985): Flow Distribution in a Tricone Jet Bit Determined From Hot-Wire Anemometry Measurements. SPE 14216, Las Vegas, NE
- Glowka, D. (1981): Optimization of Bit Hydraulic Configurations. SPE 10240, San Antonio, TX
- Knowlton, R. H. and Huang, H. (1982): Polycrystalline Diamond Compact Bit Hydraulics. SPE 11063, New Orleans, LA
- Liu, A. (1990): The development of image processing techniques and their applications in PIV. Ph. D. thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, U. K.
- Rajaratnam, N. and Pani B. S. (1974): Three-Dimensional Turbulent Wall Jets. ASCE, *Journal of the Hydraulics Division, HY1*, pp. 69–83.
- Sutko, A. A. and Myers, G. M. (1971): The Effect of Nozzle Size, Number and Extension on the Pressure Distribution Under a Tricone Bit. *Journal of Petroleum Technology, 11*, pp. 1299–1304.
- Warren, T. M. and Winters, W. J. (1982): Effect of Nozzle Diameter on Jet Impact for a Tricone Bit. SPE 11059, New Orleans, LA
- Wells, M. R. (1984): Laser Doppler Anemometer Measurements of the Flow Beneath Impinging Non-Newtonian Jets. Amoco Production Co., Tulsa, OK
- Wells, M. R. (1987): Mean and Fluctuating Pressure Measurements Beneath Impinging Turbulent Jets. *ISA Transactions*, Vol. 26, No. 3, pp. 37–42.

The Application of Lasers in Measurement of Fluid Flow Through Drilling Bit Nozzles

R. Drakulić, I. Steiner and Z. Kristafor

Two optical methods based on laser and video technology and digital signal and image processing techniques – Laser Doppler Velocimetry (LDV) and Particle Image Velocimetry (PIV) were applied in highly accurate fluid flow measurement. Their application in jet velocity measurement of flows through drilling bit nozzles is presented. The role of nozzles in drilling technology together with procedures and tests performed on their optimization are reviewed. In addition, some experimental results for circular nozzle obtained both with LDV and PIV are elaborated. Moreover, possible other applications of LDV and PIV in the domain of petroleum engineering are suggested.

In scientific papers and textbooks published on the subject so far, results based on single-point measurements with Pitot tubes, Hot-wire anemometers and LDV were reported. In this paper, PIV as a multi-point measurement method that enables plane measurement of the velocity profiles was applied in combination with LDV technique. Employed techniques allow effective evaluation of nozzles, better understanding of the high velocity jet behaviour and may significantly contribute to the optimisation of drilling hydraulics.

Hydraulic parameters regularly monitored in drilling activities are jet velocity, hydraulic horsepower and impact force. Existing methods provide these parameters to be calculated only at the nozzle outlet. However, it is of an extreme importance to have these parameters calculated at the bottom of the hole where actual cleaning action has to be fulfilled. These parameters are assumed to retain the same value at the bottom as at the outlet, though certain deterioration of the potential core exists in the region of an expanding jet. The trend of optimisation is to extend the region of approximately constant parameters to the entire area between the nozzle and the bottom of the hole. PIV is a technique that enables velocity measurements to be carried out simultaneously over the entire profile of the flow, thus allowing hydraulic parameters to be studied at any point between the nozzle outlet and the hole bottom.

Laser Doppler Velocimetry – LDV

LDV method is based on the Doppler effect which is in optics characterised with a change of the frequency within the light beam as a result of the relative motion between the source of a coherent light and the photodetector. In the LDV method a low powered CW laser is used as a coherent source of light. Using optical prisms, incoming laser beam is split in two beams with identical optical properties (phase and amplitude) as the original one. Passing through a system of lenses two beams are collimated and in the intersection point they form an interference or fringe pattern. Fringes may be viewed as an area of alternating intensely dark and light lines. The interference pattern represents the measuring volume and it is usually of a magnitude of about 1 mm^3 .

When a particle, whose velocity is to be defined, is passing through this measuring volume, it alternatively reflects or does not reflect the light. Reflected (or scattered) light is detected by a photomultiplier and transformed into a current pulse which is then frequency demodulated in an electronic data processing

system. The parameter that yields the information about the particle velocity is contained in the Doppler frequency of scattered light.

LDV method enables highly accurate velocity measurements and possesses an advantage of a non-destructive testing. Moreover, it is a real time measurement procedure since the data signal is continuous. Disadvantages of the method are related to a small measuring volume, capability of only one velocity component to be measured and difficulties encountered in a vibration sensitive classical optics set-up.

Particle Image Velocimetry – PIV

Particle Image Velocimetry is a non-destructive optical multi-point measuring method developed in 80 s (Grant and Smith, 1988). Compared to LDV and other single-point measuring methods it has significant advantages regarding the size of the interrogating region and applicability in evaluating complex flows.

Usually a Nd-YAG pulsed laser is used as a powerful and controllable source of light for the flow visualisation. Actually, the light source need not necessarily be coherent so a strong source of white light may be used instead. For adequate flow visualisation two conditions are to be fulfilled:

- illumination of the flow with a light source,
- seeding of the flow, i. e. insertion of small particles or tracers able to follow sudden changes of the flow, not influencing flow characteristics by its size, shape or density; tracers are also required to successfully reflect light.

Once these conditions are met, laser beam is expanded into a thin sheet, usually 1 mm thick, so a planar interrogating region within the flow is illuminated. Electrically obtained light pulses are necessary for producing a stroboscopic effect, for the particle motion during the illumination may be assumed as stationary. With a photo-camera positioned perpendicularly both to the planar laser sheet region and the flow velocity direction, a sharp particle image is recorded. The number of light pulses varies. In the case of two pulses applied, with the camera exposure time set accordingly, the original and one shifted particle position are recorded on a negative.

The interpretation of a negative, or the flow analysis, can be quantitative and qualitative. In the case of qualitative interpretation, larger particles are used for marking the flow. Usually gas bubbles, smoke or small dispersed water or oil droplets are used. By the appropriate exposure of the photo-camera, not only that the original and shifted particle position are recorded, but also the entire trace in between them (Streak photography – Adrian, 1986).

For a quantitative interpretation it is more appropriate to apply low concentration of very small tracers. In this case a negative consists of a large number of discernibly recorded particle positions. In the direct image extraction method, negative is horizontally and vertically divided into windows and scanned by a B/W video-camera. The video-camera output is digitized and stored in a framestore. Each particle image is represented with one of 256 «gray levels» and replaced with a co-ordinate (Grant and Liu, 1989). Digital image is usually divided into 256×256

pixels, or in a more powerful hardware system, 512×512 pixels or even 1024×1024 pixels.

The distance between partner spots (the original and shifted particle position) is to be determined by a computer algorithm based on correlation methods or a Fourier transform method. In common use are direct image extraction method, method of Young's interference fringes (where a low powered coherent laser light is passed through the negative and interference pattern is produced) and spatial image correlation techniques (Dudderar et al., 1988, Adrian, 1986, Liu, 1990).

Nozzles

Reasons for the application of nozzles in drilling bits are:

- effective removal of rock cuttings from the bottom of a hole,
- decrease of the chip hold-down effect present at the bottom of the hole due to the pressure difference between the pressure in the drilling fluid and the pore pressure in the drilled rock (this has a negative effect on the penetration rate),
- erosion of the hole bottom in soft formations.

According to published papers (Rajaratnam and Pani, 1974, Gavignet et al. 1985, Drakulic, 1992) there exists a potential core within the jet stream below the nozzle. It is conical and for the circular nozzle openings its length is between 3 and 9 diameters. In designing jet bits (drilling bits having nozzles as fluid outlets) there is an effort to situate nozzles as close to the hole bottom as technically possible in order to achieve optimal cleaning action.

Rajaratnam and Pani (1974) studied nozzles with openings different than circular (referred to as three-dimensional nozzles) with various shapes and lengths of potential cores produced. The length of potential core was established to be a function of the longer size of the nozzle opening. However, tests described were performed with low fluid velocities (7 m/s), so our intention was to prove this results with considerably higher velocities, similar to those applied in drilling procedures.

Design of the experimental equipment

An electric triplex pump was used, having a constant flow rate of approximately $60 \text{ dm}^3/\text{min}$. The fluid flow rate was adjustable by a bypass hose system. The distribution between the bypass hose and the feed hose was operated in a manifold. Feed hose led to a testing barrel and nozzles tested were attached at the end of it. Inside the testing barrel there was a transverse bar with an opening for fixing in the feed hose and exchangeable nozzles. On the bottom of the barrel a slanted plate was welded at the sharp angle relatively to the barrel bottom, thus simulating the angle of the nozzle axis in a drilling bit. The direction of the jet flow through the nozzle was perpendicular to the bottom of the barrel. The jet hitting the slanted plate was deflected so no significant interference with incoming jet occurred.

There were also three glass windows situated at the same height on the testing barrel, two placed one opposite to the other with third perpendicular to them. Windows were used for a photo-camera recording and passing of the laser beam in PIV measurements. The barrel had two drains - upper one was an overflow that led back to the tank closing the circulation, while the smaller one situated close to the bottom had a valve and was used for emptying the barrel or regulating the tracer concentration.

Results with LDV method

A LDV fibre optics system was used, thus facilitating the setup and data acquisition. The optical probe was submerged in the testing barrel close to the measuring volume. Fixed in a specially designed holder it was parallel to the transverse bar so the water jet was in the plane defined with two laser beams forming a fringe pattern. The direction of the jet was perpendicular to the probe itself.

Tracers (aluminum coating powder) seeded into the flow had a density of 1020 kg/m^3 and an average diameter of $30 \mu\text{m}$ what complied with the requirements for adequate flow tracking.

The jet was examined at six different points along the central axis. The initial point was 9 mm from the orifice and the others successively separated by 5 mm. The last examined point was 34 mm from the orifice.

Results presented for the circular nozzle show that velocity remained constant until about 8D. Also, velocity distribution in the Doppler signal is presented.

Results with PIV method

Tests with PIV were performed using pulsed Nd-YAG laser that produced double light pulses with repetition rate of 8 Hz, duration of 10 ns and pulse separation of $60/80 \mu\text{s}$, depending on the actual jet velocity measured. The same seeding particles and their concentration as in LDV tests were present in the flow.

Digital image extraction method was employed for the flow velocity measurement. Diagrams presented show the photograph of the jet region, velocity vectors within the examined flow area, and the velocity distribution along and around the central axis of the circular nozzle. The length of the potential core was up to 9D.

Conclusions

Compared to the existing single-point measuring methods, PIV demonstrates certain advantages when the spatial velocity information is concerned. Both PIV and LDV have an extremely high accuracy, influenced only by the quality of the setup. However, for the successful measurement essential prerequisite is to have fairly transparent fluid (gas or liquid). Therefore, in drilling bit nozzle testing instead of using real drilling fluids, water with certain additives controlling rheology should be used.

These experiments have shown excellent applicability of non-destructive optical methods in a study of the fluid flow below a nozzle. Flow pattern, velocity distribution, impact force, flow momentum and other parameters can be easily calculated for the whole area below and beside a drilling bit. It may also prove useful to employ these techniques in examining fluid flow behaviour in the annulus, using a model of drilling string.

Additionally, a number of petroleum engineering problems may be studied by the application of PIV and LDV methods. For example:

- precise measurement of gas flow through pipelines, not influenced with flow rate variations in drill stem tests; flow tests at the outlets of gathering station separators or at the entrance/exit points of main and distribution pipelines,
- control of the purposeful hydrodynamic design of drilling platforms, production and transport facilities used offshore,
- control of the purposeful aerodynamic design of derricks, masts, reservoirs and other high structures operating in petroleum engineering.

With described experimental apparatus and testing nozzles, technically it was possible to achieve nozzle velocities of near 100 m/s. However, measurements with velocities of over 50 m/s were not reliable since cavitation imposed severe limitations. Namely, with increasing jet velocity and consequently pressure difference between the liquid pressure in the nozzle and that in the jet expanding region, cavitation occurred. The presence of gas in the expanding jet generated a strong scattering effect in the region of interest for the volume and illuminance of the of gas bubbles were greater than those of the seeding particles. This hampered and in some cases even completely prevented the data collection. This problem has to be solved by placing nozzles in a pressure vessel where the high back pressure would reduce the effect of cavitation. Nevertheless, the results obtained with velocities considerably higher than in experiments reported earlier are encouraging for future tests.