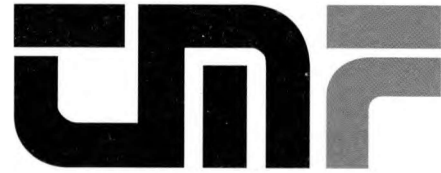


10-145774092



ДРУШТВО МЕТРОЛОГА



ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ
ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У
БЕОГРАДУ

КОНГРЕС МЕТРОЛОГА 2007

ЗБОРНИК РАДОВА

Златибор, 26-28. септембар 2007. године

КОНГРЕС МЕТРОЛОГА 2007

Зборник радова, 26-28. септембар 2007. године

ЗБОРНИК РАДОВА

*Штампање Зборника саопштења и одржавање Конгреса метролога 2007
подржало је Министарство науке Републике Србије*

Издавач:

Технолошко-металуршки факултет
Универзитета у Београду
Београд, Карнегијева 4



За издавача:

Проф. др Иванка Поповић, декан

Главни и одговорни уредник:

Проф. др Шћепан Ушћумлић

Приређивачи:

Др Иванка Поповић, ред. проф.
Др Ђорђе Јанаковић, ван. проф.
Мр Бојан Јокић, исцртаживач сарадник
Мр Ђорђе Вељовић, исцртаживач сарадник

Тираж: 100 примерака

Штампа: Развојно-истраживачки центар графичког инжењерства
Технолошко-металуршког факултета
Београд, Карнегијева 4

ISBN 978-86-7401-248-2

1263/08

<i>Ј. Марендић – Миљковић, С. Реновица, Д. Појовић, Ј. Цветковић</i> НАЦИОНАЛНИ ЕТАЛОН ВРЕМЕНА И ФРЕКВЕНЦИЈЕ	369
<i>Ј. Панићелић-Бабић, Ј. Сирешић, З. Шофранац</i> БИЛАТЕРАЛНО ПОРЕЂЕЊЕ ЕТАЛОНА ЈЕДНОСМЕРНОГ ЕЛЕКТРИЧНОГ НАПОНА	377
<i>Д. Наумовић-Вуковић, С. Шкундрић, Р. Деретић</i> МЕРНА НЕСИГУРНОСТ ЕТАЛОНИРАЊА СТРУЈНИХ МЕРНИХ ТРАНСФОРМАТОРА У ЛАБОРАТОРИЈИ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ИНСТИТУТА „НИКОЛА ТЕСЛА“	385
СЕКЦИЈА 8: МЕРЕЊА ПРОТОКА	395
<i>Б. Танасић, Љ. Мићић, П. Ђурић, Б. Рамач</i> НЕКА ИСКУСТВА ИЗ ЕУРОМЕТ ПРОЈЕКТА 865 ЗА БИЛАТЕРАЛНО ПОРЕЂЕЊЕ МИКРОПИПЕТЕ НАЗИВНЕ ЗАПРЕМИНЕ 500 μ L	397
<i>Б. Танасић, Н. Соверић, Н. Танасић</i> РЕАЛИЗАЦИЈА ЕТАЛОНСКЕ ИНСТАЛАЦИЈЕ СА УЛТРАЗВУЧНИМ МЛАЗНИЦАМА – СЕКУНДАРНИ ЕТАЛОН ЈЕДИНИЦЕ ЗАПРЕМИНЕ ПРИРОДНОГ ГАСА	405
<i>Ђ. Чанићрак, Ј. Илић, М. Бенишек, М. Неделковић</i> ПРИКАЗ ПИВ (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY) МЕРНЕ ТЕХНИКЕ НА ИНСТАЛАЦИЈИ ЗА МЕРЕЊЕ ТУБУЛЕНТНОГ ВИХОРНОГ СТРУЈАЊА У ПРАВИМ ЦЕВИМА	415
<i>О. Стаменић, Љ. Пешић, М. Томашевић, Б. Јелача</i> МОДЕРНИЗАЦИЈА БАЖДАРНИЦЕ ЗА ВОДОМЕРЕ У МЕТРОЛОШКОЈ ЛАБОРАТОРИЈИ БЕОГРАДСКИХ ЕЛЕКТРАНА	427
<i>Д. Продановић, Б. Танасић, Н. Соверић</i> ПРИКАЗ ПРЕДЛОГА НАРЕДБЕ О МЕРЕЊУ ВОДЕ	433
СЕКЦИЈА 10: МЕТРОЛОШКЕ ИНФРАСТРУКТУРЕ.....	441
<i>Б. Раданов, Д. Милановић</i> ПРАВЦИ РАЗВОЈА МЕТРОЛОШКЕ КОНТРОЛЕ НАД ПРЕТХОДНО УПАКОВАНИМ ПРОИЗВОДИМА У СРБИЈИ	443
СЕКЦИЈА 11: МЕРЕЊА ТЕМПЕРАТУРЕ И ТОПЛОТЕ	453
<i>С. Дамјановић, Б. Пајкић</i> УТИЦАЈ ПОЈЕДИНИХ ПАРАМЕТАРА РЕЗЕРВОАРА НА ПРОГРАМ ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ТАБЕЛА ЗАПРЕМИНЕ	455

ПРИКАЗ PIV МЕРНЕ ТЕХНИКЕ НА ИНСТАЛАЦИЈИ ЗА МЕРЕЊЕ ТУРБУЛЕНТОГ ВИХОРНОГ СТРУЈАЊА

Ђорђе Чантрак, Јелена Шлић, Мирослав Бенишек, Милош Недељковић

Кључне речи: PIV, турбуленција, вихорно струјање, права цев

КРАТАК САДРЖАЈ

Рад приказује резултате мерења брзине PIV (Particle Image Velocimetry) техником у турбулентном вихорном струјању у правим цевима на надпритисној инсталацији са аксијалним вентилатором. Мерни пресек са носачем пулсирајућег, импулсног Nd:Yag ласера, је постављен на растојању од 5,08 m од почетка инсталације, односно усненог левка (уводника). Користићена је само једна мерна деоница од тврде пластике дужине 4 m и једна провидна од клирита, дужине 1,38m, обе средњег пречника 0,4 m. У испитивањима су мењани проток ваздуха (регулацијом учестаности обртања једномерног мотора аксијалног вентилатора, генератора вихора), као и позиција камера у односу на мерни пресек (обасјавање светлосног ласера). Варииран је и интензитет просејавања флуидног тока. Уочене су сложене структуре различитих размера у струјном пољу. У овом раду се дају само неки од добијених резултата.

PRESENTATION OF THE PIV STUDY OF TURBULENT SWIRLING FLOW IN A STRAIGHT PIPE

Keywords: PIV, turbulence, swirl flow, straight pipe

ABSTRACT

The swirling flow of air in a straight pipe with an axial fan at the pipe inlet, as a swirl generator, was experimentally investigated by use of a double-pulsed PIV (particle image velocimetry) system. Test rig is consisted of one hard plastic tube 4 m long and an acrylic one 1.38 m long, both having average inner diameter of 0.4 m. Measuring section with Nd:YAG laser sheet is positioned $L/D=12.7$ from the pipe inlet. Camera positions and parameters, as well as flow seeding intensity have been varied. Volumetric flow rate has been changed by use of fan speed control. Complex vortex structures have been observed, what is presented here in short.

УВОД

Изучавање турбулентних струјања и данас представља, како велики изазов, тако и приличну свигму за истраживаче. Ограничењем на њутновске флуиде, добија се значајно упрошћење, свводећи Кошијеве једначине на Навије-Стоксове. Применом Рејнолдсове статистике, у случају турбулентних струјања, се добијају Рејнолдсове једначине. Тензор Рејнолдсових напона описује сложене механизме турбулентног преноса у струјном пољу. Данас постоји читав дијапазон мерних техника, које се користе у изучавању турбулентних струјања. Такве су класичне сонде, које мере притисак, сонде са усипјаним влакнима или филмом, оптичке методе ласер Доплер анемометрије и њене модификације, као и методе квалитативно-квантитативне визуализације струјног тока велике временско-просторне резолуције. Према [1] разликују се три експерименталне технике визуализације. Прва је метода са додавањем страног материјала струјном пољу, где разликујемо анемометрију снимањем честица PIV (particle image velocimetry), PTV (particle tracking velocimetry), LSV (laser speckle velocimetry), и других модификација PIV технике или коришћењем електролитичких техника генерисања мехурова водоника или фотохемијских поступака са додавањем боја струјном току и других варијанти. Овој групи техника се може придружити и холографска интерферометрија (ИИ) [2]. Друга група мерних метода су чисто оптичке неинвазивне методе које користе појаву рефлексије на месту велике разлике густина у флуидном току (ударни таласи у гасодинамици) и интерферометрија. У оквиру ових техника чисте визуализације струјања спадају бројне технике, међу којима су снимање тока анилинским бојама, техника сенки, шпирен техника,...[2]. Трећа група техника користи метод довођења енергије флуидном току, нпр. загревањем, што резултира променом густине, када се за визуализацију користи претходна група мерних техника. Једна од варијанти ове технике је и метод побуђивања ласером молекула гаса, који потом флуоресценцијом визуализују флуидни ток (таква је LIF – laser induced fluorescence).

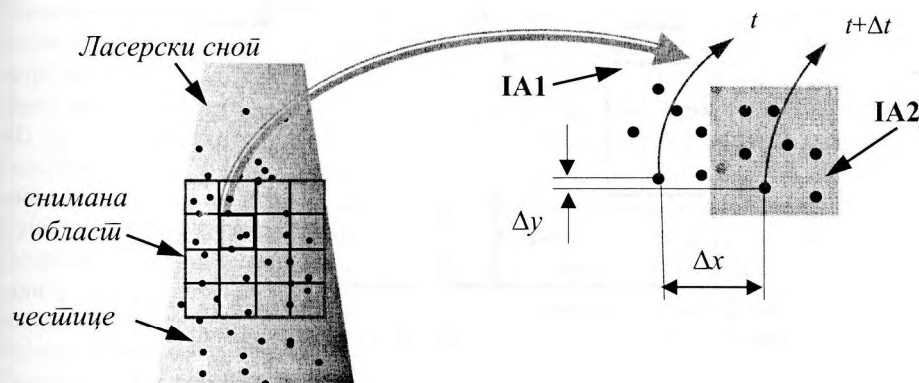
PIV мерна техника припада анемометрији заснованој на пулсирајућој светлости ласера PLV (Pulsed-Light Velocimetry) [3]. Поред стандардног, PIV метода, користи се, Micro Particle Image Velocimetry (microPIV) за мерења у микро каналима и Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) за мерења брзина у рекама и другим „великим“ токовима [4]. У раду је дат принцип рада стандардног PIV мерног система у кратким цртама, његове компоненте и карактеристике, као и приказ неких мерних резултата на инсталацији за испитивање турбулентног вихорног струјања у правим цевима.

PIV – ОСНОВЕ

PIV је анемометрија заснована на мерењу брзине микронских честица просејаних у флуидној струји. Ова техника обезбеђује мерење тренутних вектора брзине у одговарајућим равнима флуидног тока. Техника је неинвазивна, изузев увођења маркера, односно просејавања флуида. Применљива је и за течности и

гасове, у распону од 0, односно пар mm/s, до суперсоничних брзина. У првом случају се могу користити постојеће "нечистоће" као посматране честице, тако да је неинвазивност методе тада потпуна.

На инсталацији је неопходно обезбедити одговарајући оптички приступ у најмање две равни за ласер и камеру. Ласером јаког интензитета, помоћу пропратне оптике, формира се танак ласерски лист, који осветљава раван струјања. Ласер ради импулсно, просветљава флуидну струју два пута sukcesивно, са тачно дефинисаним временским размаком (зависно од мерене брзине). Струјно поље се слика, камерама са CCD (charged-coupled device) сензором, синхронизовано са импулсима ласера. Следи дигитална обрада слика како би се добило дводимензионо поље брзина. На слици 1. су дати основни појмови за објашњење базичног принципа рада PIV система. Главни принцип ове мерне технике је одређивање ΔX и ΔY , величина које се констатују у равни слике, и које су у корелацији са стварним померањем Δx и Δy честице у одговарајућим правцима, преко коефицијента увећања оптичког система - M , помоћу релација: $\Delta X = M \cdot \Delta x$ и $\Delta Y = M \cdot \Delta y$. Локална брзина је: $u_x = \Delta x / \Delta t$ и $u_y = \Delta y / \Delta t$, односно $u_x = \Delta X / (M \Delta t)$ и $u_y = \Delta Y / (M \Delta t)$ за $\Delta t \rightarrow 0$.



Слика 1. Приказ основних појмова за рад PIV система, где су: IA1, IA2 - прорачунска подсеквенца (interrogation area) после првог, односно другог импулса ласера; Δt - време између два ласерска импулса [5]

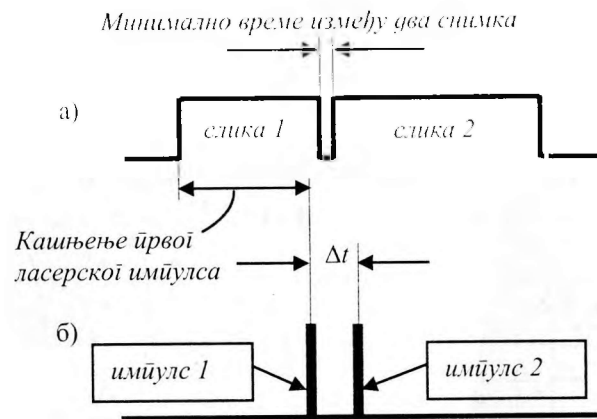
PIV метода не прати кретање сваке честице, већ се базира на статистичкој обради унутар прорачунске подобласти (IA - interrogation area). Мерна техника праћења честица PTV (particle tracking velocimetry) се заснива на праћењу сваког појединог делића.

Значи, параметри, који се подешавају су увећање M , дефинисано одабиром одговарајућег сочива, као и време Δt између два ласерска импулса.

Пошто је снимљена секвенца од две временски блиске слике, оне се деле на мале сегменте (IA), чија се величина може софтверски подешавати. За сваки пар сегмената IA којима је снимљен исти део видног поља у два блиска тренутка, израчунава се крос-корелациона функција. Положај максимума ове функције у односу на центар сегмента представља средњи померај честица снимљених тим

сегментом. Висока тачност мерења помераја, а тиме и одређивање брзине, постиже се субпикселском интерполацијом. Знајући време између два ласерска импулса (Δt), добијају се вектори брзине који се придружују сваком од сегмената IA, а они чине векторско брзинско поље флуида.

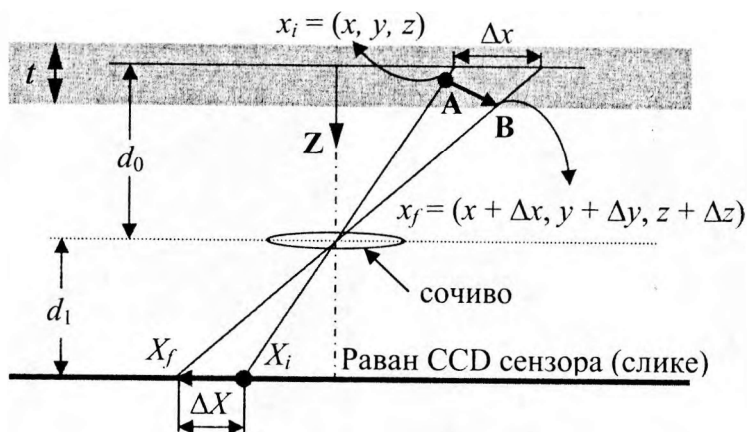
У оквиру овог система користе се камере са CCD сензорима, које памте први снимак унутар своје интерне меморије (буфера), а не врше моментални трансфер према рачунару. Резултат је низ од две слике снимљене са учестаношћу једнакој могућности узорковања саме камере (refresh rate). Најпогоднији облик снимања струјања флуида је, с обзиром на карактеристике камере, приказан на Слици 2. На овај начин, с обзиром да се може подесити да Δt буде јако мало, могу се снимати велике брзине. Ласерске импулсе производи систем који се састоји из два ласера, при чему се за сваки од њих софтверски подешава тренутак почетка цумпања (F – flash switch) и тренутак окидања (Q – quality switch).



Слика 2. Метод снимања "frame-straddling". Приказ дуж временске осе. а) експозиција камера, б) ласерски импулси.

Снимање тродимензионалнoг поља брзина (стерео PIV)

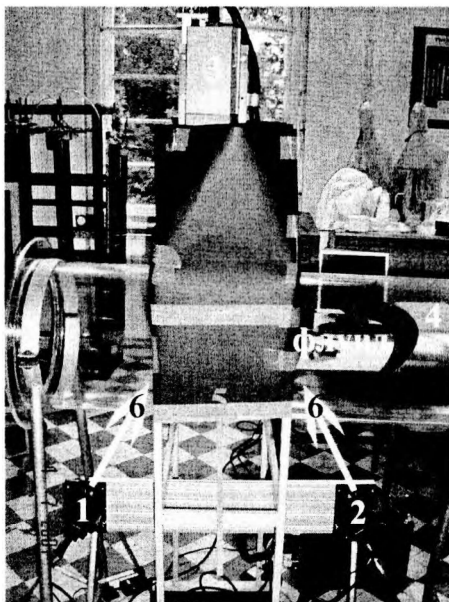
У оквиру уобичајеног 2D PIV система (са једном камером), трећа компонента брзине је невидљива. Употребом друге камере у стерео аранжману (као што се види на сл. 4. и 5.), долази се до непознате компоненте. Тродимензионално померање се добија комбинацијом слика снимљених из различитих углова/праваца. Најчешћи приступ мерењу просторног поља брзина помоћу PIV-а се заснива на коришћењу коначне дебљине ласерског листа (l), што је приказано на слици 3.



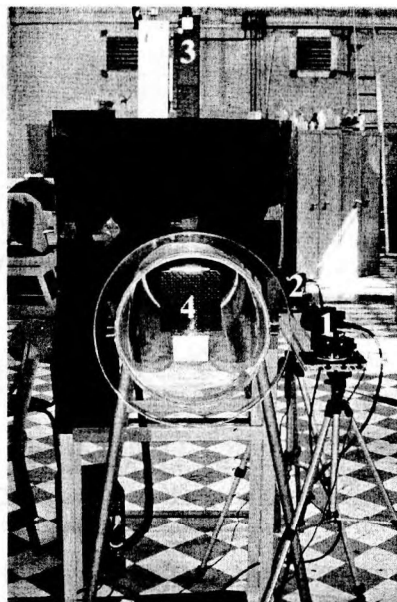
Слика 3. Вектор брзине AB у оквиру ласерског листа и његова пројекција на раван CCD сензора (сlike) једне од камера [5].

Разматра се мерна запремина, која је једнака производу сликане површине (видног поља) и дебљине ласерског снопа (t). Пројекција вектора AB , из мерне запремине, на раван сlike се види преко компоненти ΔX и ΔY . Слично је и за другу камеру. Просторно поље брзина се добија комбинујући пројекције вектора AB на две различите равни. Битно је адекватно подесити време између две експозиције, које би требало да је довољно мало, како би били већи изгледи да просејане честице (маркери) остану у оквиру коначне дебљине ласерског листа. Функција пресликавања фиксних тачака у оквиру струјног поља, осветљеног ласерским снопом, и њихових сliка (пиксела) на камерама представља процес калибрације. Калибрациона мрежа (мета) са маркерима на дефинисаним позицијама дефинише позиције у оквиру струјног поља.

Најпожељнија конфигурација камера у односу на ласерски снап је, с обзиром на Лоренц-Миову теорију расејавања [6,7], позиција расејавања унапред, која је постављена и приликом мерења, што се може видети на слици 4. Попречни пресек цеви је осветљен ласерском светлошћу (слика 4., позиција 5).



Слика 4. Конфигурација за стерео снимање са расејањем светлости унапред. 1-лева камера, 2-десна камера, 3-ласер, 4-синхронизатор, 5-ласерски лист, 6-поглед ка ласером осветљеној равни.



Слика 5. Конфигурација за стерео снимање са бочним расејањем светлости. 1-лева камера, 2-десна камера, 3-ласер, 4-баждарна мета.

За било које снимање, па и за равански и просторни PIV је битан добар фокус. Код стереоскопске PIV, испуњење Scheimpflug-овог услова омогућава постизање најбољег фокуса у равни слике. Према овом услову раван објекта (ласерског снопа), раван сочива и раван CCD сензора (раван слике) би требало за сваку камеру посебно, да се секу у истој правој. Носачи, који су саставни део овог PIV система, омогућавају овакво позиционирање. Камере би требало да буду на истој висини, што је постигнуто, као што се види на обе претходне слике, постављањем камера и њихових носача на заједнички, нивелисани носач.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИНСТАЛАЦИЈА

Турбулентно вихорно струјање, веома присутно у техничким системима и природи, привлачи пажњу многобројних истраживача. У оквиру Катедре за хидрауличне машине и енергетске системе и Катедре за механику флуида на Машинском факултету Универзитета у Београду, постоји вишегодишња традиција изучавања ове класе струјања [8-14]. У оквиру овог рада биће објављени само неки од резултата добијених мерењем у попречном пресеку праве кружне цеве.

Компоненте PIV мерног система

Мерни PIV систем, произвођача TSI (USA) коришћен у оквиру истраживања структуре турбулентног вихорног струјања у правим цевима се састоји од двоструко-пулсирајућег Nd:YAG ласера, одговарајуће пропратне оптике (сферних сочива жижне даљине 500 и 1000 mm и цилиндричних сочива жижне даљине -25, -15 mm, што је еквивалентно углу развлачења ласерског снопа од 14° и 25° редом), камере са CCD сензорима, синхронизатора (TSI Model 610034), аквизицијске карте, распршивача са шест млазника (Six-jet atomizer, TSI Model 9306), софтвера за аквизицију и обраду слика (INSIGHT3G), као и остале пропратне опреме.

Двоструко пулсирајући ласер (YAG30-15) представља пар Nd:YAG ласера, од којих сваки има енергију по пулсу од 30 mJ/pulse и максималну радну учестаност од 15 Hz, дужину трајања импулса од 4-20 ns, како би “замрзнуо” маркере у флуиду. Таласна дужина светлости, коју зрачи спада у видљив спектар од 532 nm. Дебљина осветљене ласерске равни је, при изведеним експериментима била 53 μ m. Растојање последњег цилиндричног, монтираног сочива је тачно 500 mm од центра мерног места, што је подешавано линеарном вођицом, произвођача IseI корисног хода 430 mm [13]. Колица на којима је монтиран ласер су везана за покретну специјалну навртку и покрећу се окретањем навојног вретена. Корак навојног вретена је 5 mm, са грешком позиционирања од $\pm 0,01$ mm.

Коришћене су две CCD камере (PowerView Plus 2MP, TSI Model 630057) резолуције 1660 \times 1200 пиксела, радне учестаности 30 Hz, са минималним временом (refresh rate) од 200 ns, између два снимка. Поседују интерну меморију, тако да су оптимизирани за PIV. Снимање камера је, како је раније наведено, синхронизовано са ласерским импулсима.

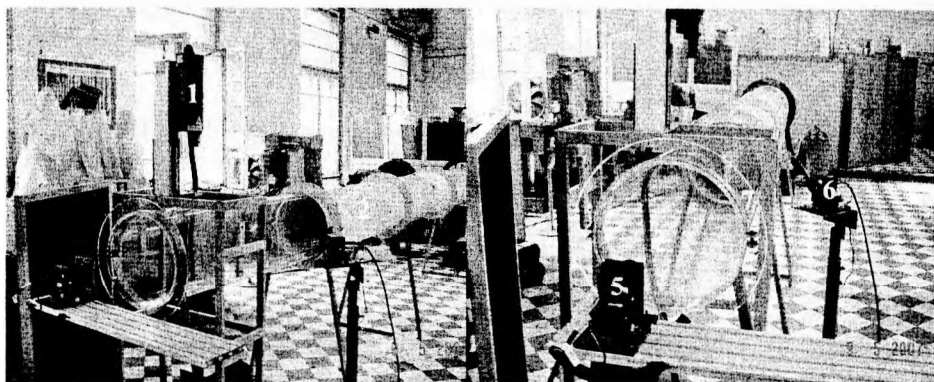
Флуидни ток се просејава капицама маслиновог уља средњег полупречника 0,6 μ m и коефицијента рефлекције $n = 1,47$, помоћу распршивача који је постављен на самом улазу у инсталацију, испред усисног левка (слика 6.).

Приказ мерне инсталације и мерења

За поставку експеримента треба анализирати следеће: оптички приступ мерном пресеку, просејавање, област мерења, просторну резолуцију и мерну несигурност. Пре почетка мерења се врши провера задовољавајуће просејаности флуидне струје, која се обезбеђује, грубо речено, ако постоји најмање 10 честица у оквиру сваке IА. Битно је да величина честица буде већа од величине пиксела, како би се избегло блокирање пиксела. Важно је и да се камера добро фокусира и провери време између ласерских импулса, зависно од брзине неинтитуваног флуидног тока [5].

Експериментална истраживања вихорних струјања, у оквиру овог рада, су изведена на надограђеној, већ постојећој инсталацији у Лабораторији за хидрауличне машине и енергетске системе [8], [9], [12], [13]. Главни елемент ове надпритисне инсталације је цевовод састављен од једне цеви од тврде пластике дужине 4 m и једне провидне од клирита дужине 1,38 m. Обе су средњег

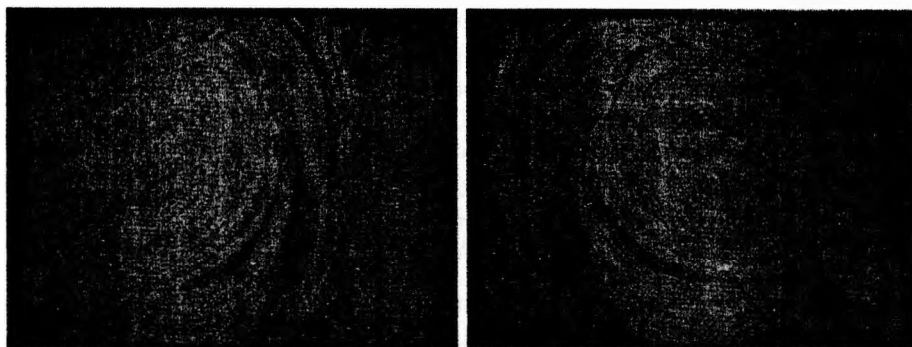
унутрашњег пречника 0,4 m и дебљине зида 6 mm (слика 6.). На улазу у цевовод, непосредно иза уводника, улазног левка, постављено је радно коло аксијалног вентилатора-извор испитиваног вихора. Обртно коло има 7 закретних лопатица и погоњено је једносмерним мотором снаге 5 kW, са регулацијом брзине обртања. Могуће је остварити различите протоке. Попречни мерни пресек цеви се налази на растојању $L/D = 12,7$ од усуса, са центром на висини осе цеви, измештен 15 mm у десно, у равни дејства ласера.



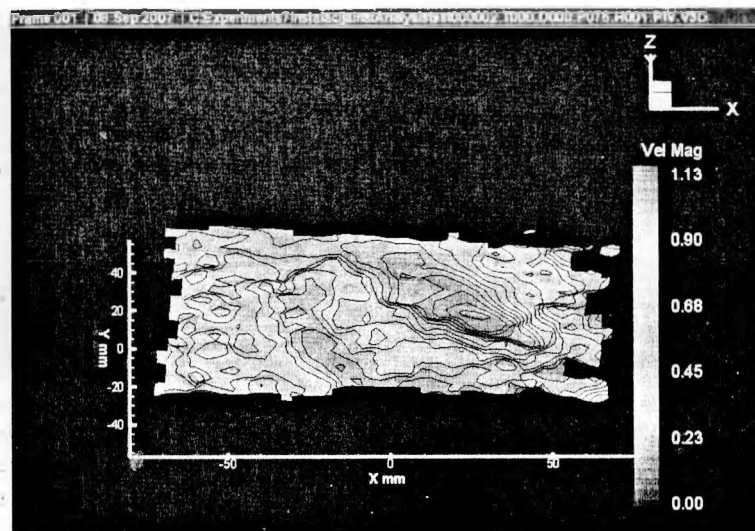
Слика 6. Експериментална инсталација. 1-ласер, 2-цев од тврде пластике дужине 4 m, 3-распршивач, 4-уводник са аксијалним вентилатором, 5-десна камера која слика у основној равни (управо на раван дејства ласера), 6-лева камера, 7-цев од клирита дужине 1,38 m.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На мерној конфигурацији приказаној на слици 6., обављена су мерења при броју обртаја вентилатора од 60 min^{-1} . Направљен је секвенца од 20 снимака у стерео поставци експеримента. Овде ће се, због обима рада, приказати само друга слика у оквиру секвенце, која довољно добро приказује мерне резултате.



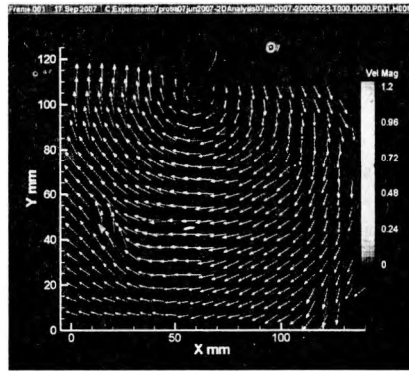
Слика 7. Слике са двоструком експозицијом начињене при експерименту са $n = 60 \text{ min}^{-1}$. Снимак леве и десне камере (у основној равни), редом.



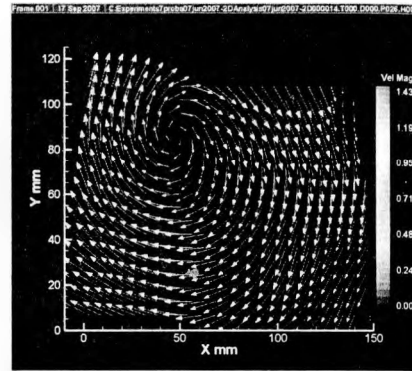
Слика 8. Тродимензионално поље брзина при броју обртаја вентилатора $n = 60 \text{ min}^{-1}$.

Коришћењем софтвера INSIGHT3G обрађени су снимци приказани на слици 7. Центар посматраног пресека се, како је већ раније речено, поклапа са центром попречног пресека цеви. Сагласно резултатима добијеним у оквиру истраживања [8-14], у почетној деоници цевовода, којој припада и ова мерна секција, развија се вихорно струјање, при чему се ствара стабилан вихор. Мерни резултати из наведених истраживања упоређени су са овде наведеним и дошло се до закључка да је квантификација брзинског поља задовољавајућа. (слика 8.).

У наставку истраживања мењан је број обртаја вентилатора, али су мерења обављана сликањем само у основној равни са секвенцом од пет снимака. Позиција посматране равни се и сада поклапа са равни дејства ласера и вертикалном осом попречног пресека цеви, али је измештена 16 mm, испод осе цеви. Приказан је само по један од пет репрезентативних снимака. Може се приметити да је центар вртложног језгра добро изолован и да са променом броја обртаја, мења свој положај, указујући на карактеристичну динамику и проблеме стабилности вртложног језгра.



Слика 9. Вектори брзине у основној равни за број обртаја вентилатора $n = 195 \text{ min}^{-1}$.



Слика 10. Вектори брзине у основној равни за број обртаја вентилатора $n = 270 \text{ min}^{-1}$.

ЗАКЉУЧАК

У оквиру овог рада приказан је део обимних истраживања карактера турбулентног вихорног струјања, које припада класи најсложенијих струјања. Примењена PIV метода омогућава одличну структуралну анализу овог сложеног феномена, дајући и могућности анализе турбулентних карактеристика, вртложности и статистичких својстава. Енергија импулсног ласера Nd:YAG, омогућава снимање и у окружењу које није мрачна комора, мада је пожељно замрачити, макар мерну секцију. Свакако би требало бити опрезан при доношењу закључака само коришћењем резултата добијених овом мерном техником и ослањајући се само на један мерни пресек, између осталог и због положаја камере у односу на долазеће флуидне делиће. С обзиром да је ласер, због своје ограничене фреквенције узорковања, "уско грло" система, неопходна је већа секвенца снимака, као и комбиновање са мерним уређајем који има бољу временску резолуцију. То би се постигло мерењем помоћу сонде са усијаном жицом, која има јако добру временску резолуцију, али је инвазивног карактера и има веома малу мерну запремину, тако да је потребно много више времена за квантификацију струјног поља у целој равни. Постоји ограничење максималне величине снимане области флуидног тока, у зависности од величине честица. Може се закључити да су симултана мерења врућом жицом и PIV-ом компатибилна у прилично истом смислу као што је то случај са LDA-ом и PIV-ом. Коришћењем PIV-a су створене добре могућности за бољу интроспекцију феномена турбулентног вихорног струјања и проналажење адекватног одговора, јер *"И цијели ови беспоретници ка поретку некоме сљедеју."* (Горски вијенац, Петар II Петровић – Његош).

ЗАХВАЛНОСТ

PIV мерни систем је набављен средствима Националног инвестиционог програма у науци за 2006/2007. годину, од стране Министарства науке и заштите

животне средине Републике Србије. Рад је потпомогнут и средствима пројекта ТР-6381 Министарства науке Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] F. Post, T. van Walsum, *Fluid flow visualization*, in H. Hagen, H. Müller, and G. Nielson, editors, *Focus on Scientific Visualization*, pp. 1-40., Springer, 1993.
- [2] J. Илић, М. Срећковић, *Поређење оптичких мерних техника у испитивањима тикова флуида*, Зборник радова четвртог конгреса метролога, стр. 424-436., 2003.
- [3] R. J. Adrian, *Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics*, Ann. Rev. Fluid Mech, pp. 261-304., 1991.
- [4] Н. Бранисављевић, Д. Продановић, *Large Scale Particle Image Velocimetry – Мерење урбане оптичаје*, Водопривреда 38, стр. 222-227., 2006.
- [5] М. Hyde, *Particle Image Velocimetry*, Presentation, Instalation and Training, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2007.
- [6] М. Срећковић, Ј. Мирчевић, С. Остојић, Н. Бундаески, *Evaluation of computer approaches for light scattering on the objects of different geometrical forms*, Proceedings of Lasers 98, Tusson, Proceedings, pp. 546-553., 1999.
- [7] М. Срећковић, С. Остојић, Ј. Мирчевић, Н. Бундаески, *Diffraction effects, scattering effects, analytical problems, numerical algorithms and programmes packages*, Optika 98, Proc. of SPIE, Vol. 3573, pp. 584-588., 1998.
- [8] М. Бенишек, *Испитивање хидродинамичке стабилности вихорних струјања у осно-симетричним ротацијским просторима*, Магистарски рад, Машински факултет, Београд, 1976.
- [9] М. Бенишек, *Испитивање вихорне струјања у правим цевима кружној пресека*. Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 1979.
- [10] S. Čantrak, *Experimentelle Untersuchungen statistischer Eigenschaften turbulenter drallbehafteter Rohr- und Diffusorströmungen*, Dr.-Ing. Dissertation, Karlsruhe, 1981.
- [11] S. Čantrak, K. O. Felsch, H. Jungbluth, *Über Turbulenzstruktur und Mechanismus der Transportprozesse in drallbehafteter Diffusorströmung*, ZAMM 65 (4), p. T189-T191., 1985.
- [12] Б. Вукашиновић, *Турбулентни пренос и проблеми његове моделирања у вихорном струјању*, Магистарска теза, Машински факултет, Београд, 1996.
- [13] М. Лечић, *Теоријска и експериментална испитивања турбулентних вихорних струјања*, Докторска дисертација, Београд, 2003.

- [14] А. Ђоћић, *Истраживање структуре нехомогене турбуленције применом инваријантне теорије*, Магистарски рад, Београд, 2007.

Подаци о ауторима:

1. асистент Ђорђе Чантрак, дипл.инж.маш., Машински факултет, Краљице Марије 16, 1120 Београд 35, тел.: +381-11-3302-363, факс: +381-11-3370-364, ел. пошта: djcantrak@mas.bg.ac.yu
2. др Јелена Илић, доцент, дипл.инж.ел., Машински факултет, Краљице Марије 16, 1120 Београд 35, факс: +381-11-3370-364, ел. пошта: jilic@mas.bg.ac.yu
3. проф. др Мирослав Бенишек, дипл.инж.маш., Шеф Катедре и Центра за хидрауличне машине и енергетске системе, Машински факултет, Краљице Марије 16, 1120 Београд 35, тел.: +381-11-3302-216, факс: +381-11-3370-364, ел. пошта: mbenisek@mas.bg.ac.yu
4. проф. др Милош Недељковић, дипл.инж.маш., Декан, Машински факултет, Краљице Марије 16, 1120 Београд 35, тел.: +381-11-3302-250, факс: +381-11-3370-364, ел. пошта: dekan@mas.bg.ac.yu, mnedeljkovic@mas.bg.ac.yu