

# ЧЕТВРТИ КОНГРЕС МЕТРОЛОГА

– ЗБОРНИК РАДОВА –

*Уредници:*

др Бранислав Танасић  
др Мирослав Бенишек

Машински факултет Универзитета у Београду  
Друштво метролога Србије и Црне Горе

ТЕРЕНСКО ИСПИТИВАЊЕ КРАТКОРОЧНЕ СТАБИЛНОСТИ ОСЦИЛАТОРА ГЕОДЕТСКОГ ГПС ПРИЕМНИКА Mr Dragan Blagojević, dipl geod inž. PRACTICAL PROCEDURE FOR ESTIMATION OF THE SHORT TERM FREQUENCY STABILITY OF GEODETIC CLASS GPS RECEIVERS	281
ПРЕЦИЗНО ПОЗИЦИОНИРАЊЕ УПОТРЕБОМ ГПС ПРИЕМНИКА БАЗИРАНИХ НА SIRF LX1 ГПС ПРОЦЕСОРУ Vukan Ogrizović PRECISE POSITIONING WITH GPS RECEIVERS BASED ON SIRF LX1 GPS PROCESSOR	295
АНАЛИЗА УТИЦАЈА ГУСТИНА МАСА ЗЕМЉИНЕ КОРЕ У ПОСТУПКУ ОДРЕЂИВАЊА ФУНКЦИОНАЛА АНОМАЛНОСКОГ ПОТЕНЦИЈАЛА Oleg Odalović, Jelena Gučević ANALYSIS OF THE EFFECTS OF DENSITY MASS OF THE EARTH'S CORE ON THE FUNCTIONAL ANOMALY POTENTIAL	300
УПОРЕБЕЊЕ РАЗЛИЧНИХ МЕТОДА ИСПИТИВАЊА МЕТРОЛОШКИХ КАРАКТЕРИСТИКА ТЕОДОЛИТА ПОМОЋУ КОЛИМАТОРА И СПЕЦИЈАЛНИХ ВИЗУРНИХ МАРКИЦА Doc dr Siniša Delčev, dipl geod inž., Violeta Vasiljić, dipl geod inž. COMPARISON OF PROCEDURES FOR EXAMINATION OF METROLOGICAL FEATURES OF THEODOLITES BY COLLIMATOR AND SPECIAL FORM TARGETS	307
МЕТОДА ПРЕГЛЕДА ЕЛЕКТРООПТИЧКОГ ДАЉИНОМЕРА ПРИМЕНОМ КРАТКЕ БАЗЕ СА ТРИ ТАЧКЕ, ДУТАЧКЕ БАЗЕ И ФРЕКВЕНЦИЈЕТРА Zoran Milosavljević METHOD FOR CONTROL OF ELECTROOPTICAL RANGE FINDER BY UTILIZATION OF SHORT BASE WITH THREE POINTS, LONG BASE AND FREQUENCY METER	317
МЕТОДА ПРЕГЛЕДА ОПТИЧКИХ ДАЉИНОМЕРА УСКЛАЂЕНА СА DIN СТАНДАРДОМ Dušan Mitićević, Ljubomir Madžarac METHOD OF SUPERVISE OPTICAL DISTANCE MEASURING TO ADJUST WITH DIN STANDARD	325
<b>Општа метрологија</b>	
ПОСТУПАК ИЗРАЧУНАВАЊА МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ РАДНИХ ЕТАЛОНА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ Tatjana Činčar-Bujović PROCEDURE FOR EVALUATION OF THE MEASURING UNCERTAINTY OF WORKING STANDARDS WITH HOURMETERS	333
АНАЛИЗА МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ ЕТАЛОНИРАЊА ЕТАЛОН ВАТМЕТРА Nada Vučićak, Rađa Dereta UNCERTAINTY EVALUATION OF STANDARD WATTMETER CALIBRATION	341
НОВИ ТРЕНДОВИ У ОДРЕЂИВАЊУ МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ У ПОСТУПКУ КАЛИБРАЦИЈЕ МЕРИЛА Božidar Dimitrijević, Ivana Radelović, Vladan Đurić NEW APPROACH IN EVALUATING THE UNCERTAINTY OF MEASURING INSTRUMENTS CALIBRATION	348
АУТОМАТИЗАЦИЈА МЕРЕЊА У ЛАБОРАТОРИЈИ ЗА ВРЕМЕ И ФРЕКВЕНЦИЈУ Snežana Renovića, Jadranka Marendić-Miljković AUTOMATIZATION OF TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS	356
МЕТРОЛОШКА СЛЕДИВОСТ GPSDO – ЕТАЛОНА ВРЕМЕНА И ФРЕКВЕНЦИЈЕ Jadranka Marendić-Miljković, Snežana Renovića TRACEABILITY OF GPSDO – TIME AND FREQUENCY STANDARD	363
КОМПАРАЦИЈА ЕТАЛОНА ЗА АЦ НАПОН Zoran Knežević, Zoran Šofranac, Jasmina Lazarević AC VOLTAGE STANDARDS COMPARISON	369
МОГУЋНОСТ МЕТРОЛОШКОГ ПРЕГЛЕДА БРОДСКИХ НАВИГАЦИОНИХ РАДАРА Milovan Unković POSSIBILITY OF THE METROLOGICAL TESTING SHIPBORNE NAVIGATION RADARS	376

МЕРНЕ МОГУЋНОСТИ ЛАБОРАТОРИЈЕ ЗА ФОТОМЕТРИЈУ И РАДИОМЕТРИЈУ У БАЗИ ПОДАТАКА МЕЂУНАРОДНОГ БИРОА ЗА ТЕГОВЕ И МЕРЕ Предраг Вукадин, Владан Шкерковић, Вељко Зарубица METROLOGICAL ABILITIES OF THE LABORATORY FOR PHOTOMETRY AND RADIOMETRY IN THE DATABASE OF INTERNATIONAL BUREAU FOR WEIGHTS AND MEASURES	384
МЕТРОЛОШКО ОБЕЗБЕЂЕЊЕ АПСОРПЦИОНИХ СПЕКТРОФОТОМЕТРА ЗА ПРИМЕНУ У МЕДИЦИНИ Вељко Зарубица, Предраг Вукадин, Владан Шкерковић METROLOGICAL ASSURANCE OF ABSORPTION SPECTROPHOTOMETERS USED IN MEDICAL LABORATORIES	401
АНАЛИЗА КРИВЕ ИСИЈАВАЊА CaSO <sub>4</sub> :Dy M.B.Pavlović, Z.Vejnović и M.Davidović GLOW CURVE ANALYSIS OF CaSO <sub>4</sub> :Dy	408

**Процесна техника**

ПОСТУПАК БАЖДАРЕЊА ЦИЛИНДРИЧНЕ СОНДЕ СА ТРИ ОТВОРА И НАЧИН МЕРЕЊА 2D-ПОЉА БРЗИНА И ПРТИЦСКА Miroslav Benšek, Branko Josić, Ivan Božić, Božje Čantrak THREE HOLE CYLINDRICAL PROBE CALIBRATION PROCEDURE AND THE MEASURING METHOD OF THE 2D-FLOW FIELD – VELOCITIES AND PRESSURES	417
ПЕРЕБЕЊЕ ОПТИЧКИХ МЕРНИХ ТЕХНИКА У ИСПИТИВАЊИМА ТОКОВА ФЛУИДА Jelena Ilić, Milica Srećković COMPARISON OF OPTICAL MEASUREMENT TECHNIQUES IN FLUID FLOW INVESTIGATION	424
ОДРЕЂИВАЊЕ КОЕФИЦИЈЕНТА ТОПЛОТНЕ ПРОВОДНОСТИ Чврстих МАТЕРИЈАЛА МОДИФИКОВАНОМ "ДИСК" МЕТОДОМ M. A. Zovnić, H. D. Milošević, K. D. Maglić REALIZATION OF THE INTERNATIONAL TEMPERATURE SCALE ITS-90 IN THE RANGE FROM 0,01°C TO 419,527°C	444
РЕАЛИЗАЦИЈА МЕЂУНАРОДНЕ ТЕМПЕРАТУРНЕ СКАЛЕ ITS-90 У ОПСЕГУ ТЕМПЕРАТУРА ОД 0,01°C ДО 419,527°C Vladan Stepanović, Slavica Simić, Nenad Petrović REALIZATION OF THE INTERNATIONAL TEMPERATURE SCALE ITS-90 IN THE RANGE FROM 0,01°C TO 419,527°C	444
МЕРЕЊЕ ХОРИЗОНТАЛНЕ КОМПОНЕНТЕ СИЛЕ НА ДЕЛУ КОНСТРУКЦИЈЕ ПРЕЛИВА НА ХИДРАУЛИЧКОМ МОДЕЛУ БРАНЕ "ГРЛИШТЕ" Radomir Kapor, Nenad Stefanović и Душан Продановић MEASUREMENT OF HORIZONTAL COMPONENT OF FORCE ON THE PART OF THE STRUCTURE IN SPILLWAY ON THE SCALE MODEL OF "GRLIŠTE" DAM	454
АКВИЗИЦИОНИ СИСТЕМ НА ИСПИТНОЈ СТАНИЦИ ЗА ТУРБО-МЛАЗНЕ МОТОРЕ Antić Mirko, Damjanović Srđan DATA ACQUISITION SYSTEM ON TURBO-JET ENGINE TEST CELL	461
ПРЕПОРУКЕ ЗА МЕРНУ ОПРЕМУ ЗА КВАЛИФИКАЦИЈУ, ВАЛИДАЦИЈУ И ФУНКЦИОНАЛНУ ДИЈАГНОСТИКУ КТХВ ИНСТАЛАЦИЈА Vladimir Koraћ RECOMMENDATION CONCERNING INSTRUMENTS FOR FIELD MEASURING USED FOR QUALIFICATION, VALIDATION AND COMMISSIONING OF HVAC BUILDING SERVICES	466
АНАЛИЗАТОРИ ЕФИКАСНОСТИ САГОРЕВАЊА – ПРЕДНОСТИ И МАНЕ Vladimir V. Jovanović, Dragoslava D. Stojiljković, Milan R. Radovanović COMBUSTION EFFICIENCY ANALYZERS – BENEFITS AND DRAWBACKS	479
МЕТОДЕ МЕРЕЊА У ЛОКАЛНОМ ПРИСТУПУ МЕХАНИЦИ ЛОМА Milorad Zrilić, Srećko Nikolić, Ljubica Milović, Marko Rakun MEASURING TECHNIQUES IN LOCAL APPROACH OF FRACTURE MECHANICS	485



## ПОРЕЂЕЊЕ ОПТИЧКИХ МЕРНИХ ТЕХНИКА У ИСПИТИВАЊИМА ТОКОВА ФЛУИДА

Јелена Илић, Милеса Срећковић

Кључне речи: оптичке мерне технике, физика флуида, PIV, Доплер технике LDA/PDA

### Кратак резиме

У раду су описане мерне технике које се данас најчешће користе у испитивањима токова флуида и неке које, у блиској будућности, то објашњавају. Међу техникама визуализације пажња је посвећена шлирен техници. Представљени су принципи и варијанте анемометрије снимањем честица (PIV) и холографске технике испитивања токова флуида. Затим су објашњене ласерске Доплер технике – ласер Доплер анемометрија (LDV), планарна Доплер анемометрија (PDV). За сваку од наведених техника су размотрене просторне и временске резолуције, извори мерних несигурности, фактори утицаја на осетљивост технике као и погодности примене у зависности од претпостављеног динамичког режима тока флуида.

### COMPARISON OF OPTICAL MEASUREMENT TECHNIQUES IN FLUID FLOW INVESTIGATION

Jelena Ilić, Milka Srećković

#### Abstract

The paper describes the measurement techniques that are, or supposedly soon will be, the most readily used in fluid flow research. Among the visualization techniques, the attention is paid to schlieren technique. The principles and the varieties of particle image velocimetry (PIV) and holographic fluid flow research techniques are presented. Then, Doppler techniques – laser Doppler velocimetry (LDV) and planar Doppler velocimetry (PDV) are explained. For each of the mentioned techniques, the spatial and temporal resolutions, the sources of measurement uncertainties, the influences on technique sensitivity as well as the suitability of its application with respect to the presupposed dynamic regime of fluid flow are considered.

#### Увод

Да би се схватила динамика турбулентних токова потребно је нумерички решити Навије-Стоуксове једначине или експериментално одредити карактеристике тока. Због ограничене брзине рачунара, директна симулација Навије-Стоуксових једначина је и данас ограничена на једноставније токове са нижим Рејнолдсовим бројем. Ради спровођења индиректних симулација Навије-Стоуксових једначина, потребно је

Јелена Илић, асистент, Машински факултет, 27. марта 80, Београд, jilic@mas.bg.ac.yu

Милеса Срећковић, ред. професор, Електротехнички факултет, Бул. Краља Александра 73, Београд.

моделовати токове помоћу емпиријских релација заснованих на експерименталним подацима у које спада и поље брзина. Недостаци мерних техника које користе механичке сонде, као што су усижано влакно или филм, или сонде које мере притисак, су ниска резолуција и ремећење тока. То је подстакло развој много мање инвазивних мерних и дијагностичких техника од којих су најбројније оптичке.

Једну грану оптичких дијагностичких техника чине технике визуализације тока флуида. Међу њима је једна од најзаступљенијих шлирен техника. Шлирен инструментима се бележи расподела градијента индекса преламања у провидним срединама као што су токови гасова. Захваљујући рачунарским програмима који омогућавају обраду слике, расподела градијента индекса преламања се може повезати са расподелама густине, притиска и температуре у току.

Методе оптичких техника мерења брзине флуида се могу поделити у две групе. У прву спадају анемометрије снимањем честица – particle image velocimetry (PIV) и њене варијанте. Код традиционалне варијанте ове технике, двоструком експозицијом холографског филма у кратком временском интервалу, снимају се помераји честица у флуиду или обележених молекула. На основу њих, знајући дужину временског интервала између два снимљена положаја, одређују се брзине снимљених честица, тачније пројекције брзине на осветљену раван. Развијена је и дигитална анемометрија снимањем честица (DPIV), код које се специјално развијеним алгоритмима обрађују и упоређују дигиталне слике тока снимљене у два блиска временска тренутка. Налажењем функције корелације између два одговарајућа сегмента слике добија се средња брзина у области сликаног тим сегментом. Снимање у два канала под различитим угловима, даје могућност процене компоненте брзине ван равни осветљавања и то је стереоскопска анемометрија снимањем честица (SPIV). Овој групи техника би могла да се придружи и холографска интерферометрија (HI) са двојном експозицијом. Тренутно се ради на развоју холографске интерферометрије у реалном времену помоћу које ће моћи да се испитују крајње брзи токови.

У другу велику групу оптичких анемометрија спадају оне код којих се брзина мери на основу Доплеровог ефекта. Код њих се на одређени начин мери промена фреквенције ласерске светлости услед расејања на покретним честицама или молекулима у испитиваном току флуида. Тако је добро позната ласер Доплер анемометрија (LDV) имала изузетан утицај на истраживања и развој аеро- и хидро-динамике у протеклих тридесетак година. Техника има добру резолуцију зато што има малу мерну запремину – пресек области укритања два кохерентна ласерска снопа и области видног поља фотодетектора. Због тога, као и због неупоредиво мање инвазивности у односу на пре ње коришћене анемометрије, ова техника је унела револуцију у испитивањима широк спектра токова флуида. Међутим, суштинско ограничење ове методе је што се њоме мери брзина у једној тачки (тачкасто мерење), тако да снимање расподеле брзине у простору, тј. мерење брзине у великом броју тачака, захтева исти толики број померања пресека ласерских снопова и детекторске компоненте мерног система. Што је сложенији ток који се испитује, утолико су потребни сложенији и осетљивији системи за траверзирање оптичких компоненти мерног система. Тако, иако је ласер Доплер анемометрија (LDV) омогућавала једноставније мерење брзине у великом броју тачака у односу на технике са механичким сондама, и то практично без ремећења тока, јавила се жеља за још бржим снимањем брзинског поља на основу Доплеровог ефекта (у том погледу раних деведесетих PIV је почела да великом брзином превазилази LDV). Као резултат те жеље, половином деведесетих развијена је техника тренутног снимања тродимензионалног вектора брзине у равни – планарна Доплер анемометрија (PDA). Код ње се CCD камером снима филтрирана и нефилтрирана светлост расејана на честицама или молекулима у току флуида. Нормирање првог снимка другим добија се слика чија расподела интензитета осветљености је једнака расподели интанзитета



компоненте брзине у одређеној равни. И ова техника омогућује испитивање крајње брзих токова.

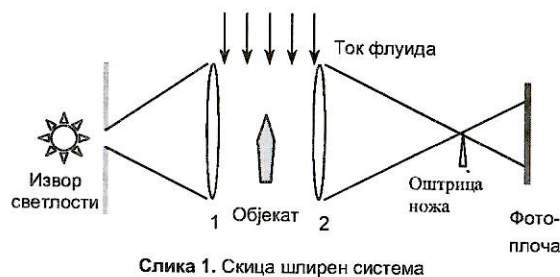
У раду су описани принципи рада најчешће коришћених оптичких техника за испитивање токова флуида, као и извори мерних несигурности и резолуције сваке од њих. Посебна пажња је посвећена оптичким компонентама тих система – ласеру и маркерима. На крају су изведени закључци о погодности примене ових техника код испитивања тока флуида с обзиром на брзину у току, турбулентност, величину и затвореност/отвореност тока.

### ТЕХНИКЕ ВИЗУАЛИЗАЦИЈЕ

У технике визуализације струјања, код којих се, у принципу, снима расподела густине флуида, спадају бројне технике, као што су снимање тока обележеног анилинским бојама, техника сенки (shadowgraph) и многе друге. Код једне од новијих метода струјање око модела се визуализира помоћу напонски осетљиве превлаке од течног кристала којом је превучен модел. У овом раду је описана шлирен техника која спада у корисније и популарније међу техникама визуализације.

#### Шлирен техника

Шлирен (schlieren) је немачка реч за пругастост, а техника је добила име по изгледу слика које се њоме снимају. Светлост од извора (обично беле светлости) после колимације, обасјава флуид који струји преко одређеног објекта (Сл. 1). После проласка кроз испитивани флуид светлост се сочивом 2 фокусира. У случају униформног тока, слика извора, што значи сва светлост која је прошла кроз флуид, налази се у тачки жиже. Код свих осталих токова слика извора је аберирана. Код шлирен технике, у тачки жиже сочива 2 се постави оштрица ножа тако да блокира половину светлости.



Када је униформан ток слика која се формира иза жиже је равномерно светла. Међутим, ако у току постоје просторне варијације индекса преламања, које су практично последица просторне варијације густине флуида, доћи ће до тога да иза оштрице ножа прође светлост која би њоме била блокирана да је ток униформан и обрнуто

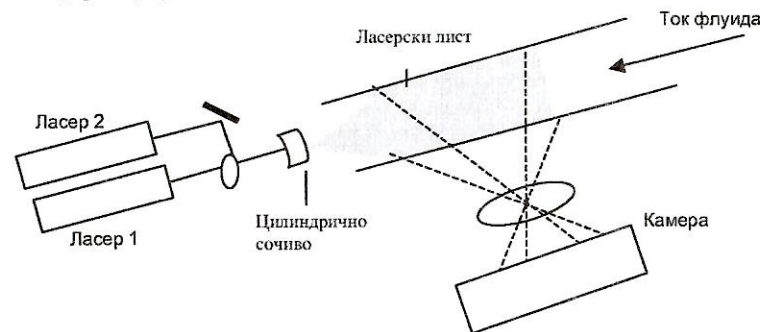
– светлост која би прошла преко оштрице у случају униформног тока бива блокирана услед закривљења њене путање. Све то доводи до појаве светлијих и тамнијих зона иза оштрице ножа, у зависности од просторне расподеле индекса преламања у испитиваном флуиду. То се може регистровати помоћу фотографске плоче или неког другог фотодетектора.

Дакле, шлирен техником се, на неинвазиван начин, добија добро дефинисана слика расподеле градијента индекса преламања у провидним срединама, најчешће су то токови гасова. Расподела индекса преламања се, затим, може повезати са расподелама густине, притиска или температуре у току флуида и на тај начин шлирен снимак илуструје и њих. Зато је техника корисна и код испитивања преноса топлоте.

Унапређење ове технике је такозвана дуга – шлирен, код које се уместо оштрице ножа поставља филтер типа "волово око" са сегментима различитих боја, чиме се појачава видљивост резултата преламања. Скала сиве боје је замењена скалом боја у дугином спектру. Тиме је појачана видљивост детаља снимљене просторне расподеле. Применом решетке, које се постављају преко извора светлости и преко објектива фотодетектора (grid type шлирен) [1], повећава се видно поље на чак  $2 \cdot 3m$ , без коришћења скуних сочива и огледала великих димензија који су код конвенционалне шлирен технике били неопходни при снимању објеката већих димензија.

### АНЕМОМЕТРИЈА СНИМАЊЕМ ЧЕСТИЦА (PIV)

Основни чиниоци PIV система (Сл.2) су: импулсни ласер, оптички систем за развлачење ласерског снопа у ласерски лист (од кога је на Сл.2 приказано само цилиндрично сочиво), честице у флуиду довољно мале да би верно пратиле ток, и камера. Помоћу импулсног ласерског листа, чија је раван обично паралелна са правцем главног тока, осветљавају се честице у флуиду. Светлост расејана на тим честицама у правцу нормалном на ласерски лист се прихвата помоћу сочива објектива и региструје помоћу фотографске плоче или CCD камере.



Слика 2. Скица PIV система

Снимање камере је синхронизовано са ласерским импулсима, тако да се положаји честица се снимају кад год бљесне ласерски лист. Сlike распореда честица се снимају у два (или више) блиска временска тренутка на истом или на посебним снимцима и обрађују се одговарајућим алгоритмом. Циљ обраде слике је да се одреди померај једне честице или просечан померај честица на једном сегменту слике, остварен у временском интервалу између два ласерска импулса. Знајући тај интервал, брзина се одређује према изразу

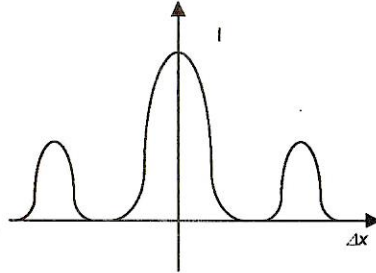
$$v = \frac{\Delta x}{M \Delta t} \quad (1)$$

где је  $\Delta x$  померај,  $M$  увећање оптичког система и  $t$  временски интервал између импулса. Код ове технике најчешће се примењује  $Nd^{3+}:YAG$  ласер зато што испуњава већину њених захтева. Њиме могу врло прецизно да се темпирају импулси (са несигурношћу реда ns). Пошто се обично сваки од два суседна ласерска импулса емитује из посебног ласера (Сл.2), временски интервал између два импулса може да буде врло мали – до

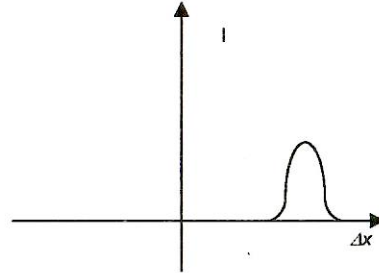


дужине једног импулса, која је код Nd<sup>3+</sup>:YAG ласера испод 10ns. Што краћи интервал између два импулса је значајан код испитивања брзо променљивих токова. Код њих је такође врло битно да је импулс кратак како би слика била оштра.

Технике обраде снимка се могу да буду корелационе и оне засноване на праћењу појединачних честица. Код првих се снимци поделе на сегменте, на којима се налазе ликови бар десет честица, и помоћу корелационе функције се одреди средња брзина за сваки од сегмената [2]. Код спорих фотодетектора узастопни снимци се снимају на једном те истом филму. У том случају се за сваки од сегмената налази ауто-корелациона функција, по целој површини сегмента која и, у том случају, у правцу брзине честице има облик приказан на Сл.3а.:  $\delta$ с максимум у координатном почетку и два пратећа максимума удаљена од централног за растојање једнако средњем померају ликова честица на сегменту. Види се да ова техника не разликује смер брзине што код турбулентних токова доводи до грешке у мерењу. Померањем филма између два импулса постиже се да се  $\delta$ с максимум у ауто-корелационој функцији удвоји и удаљи од координатног почетка онолико колико је померен филм, али зато је сваки од тих максимума праћен по једним мањим максимумом удаљеним од претходног за средњи померај ликова честица на сегменту. Уз познат смер помераја филма, положај мањег максимума у односу  $\delta$ с максимум је једнозначан показатељ смера брзине.



Слика 3а. Ауто-корелациона функција једног сегмента у правцу средњег помераја ликова честица у њему.



Слика 3б. Крос-корелациона функција једног сегмента у правцу средњег помераја ликова честица у њему.

Новији фотодетектори омогућују снимање две узастопне слике на различитим филмовима. Тада за два сегмента са различитих слика, који одговарају истој области у осветљеној равни, треба наћи крос-корелациону функцију. Њен облик је приказан на Сл.3б. са које се види да средњи померај показује положај јединог максимума и да је смер средњег помераја јасно одређен. За разлику од ауто-корелационе функције код које се померај не може одредити уколико је пратећи максимум превише близу централног, код крос-корелационе функције померај је одредив, практично, ма колико мали био, што овој методи даје већи динамички опсег мерења брзине. Резолуција обе ове технике је, због неопходног минимума броја честица на сегменту, одређена концентрацијом честица (маркера) у флуиду [3].

Другом групом техника обраде слике одређује се померај сваке честице појединачно. Због тога се као резултат добијају брзине у случајно распоређеним тачкама, за разлику од корелационих техника које дају вредности брзине у правилно распоређеним тачкама. Пошто се прате трагови појединачних честица ова техника има и посебан назив – анемометрија снимањем трага честица (particle tracking velocimetry – PTV) [4]. Некада је померај одређиван мерењем трага честице на вишеструко или чак континуално експонираној фотографској плочи. Данас се помераји одређују тзв. fuzzy логиком или неуралним мрежама. И код ове групе техника резолуција је одређена концентрацијом

маркера, али, за исту резолуцију, она захтева за ред величине мању концентрацију у односу на корелационе технике. Постоје и принципијелни предлози комбиновања корелационе и "трагачке" технике, што би довело до "супер" резолуције [5].

Код првих PIV система, за снимање честица су се користиле класичне фотографске плоче. Сlike са њих се скоро увек морају обрађивати ауто-корелационом функцијом (само код врло спорих токова се померај може одредити директно или је могућа једнострука експозиција два филма). Данас се све више користе електронски и то дигитални системи за снимање и обраду слике, који су сада већ толико брзи да омогућују мерење у скоро реалном времену, што дозвољава налажење оптималних параметара мерног система у току самог експеримента. Због брзине дигиталних електронских система могуће је снимање парова једноструко експонираних слика тока, због чега се обрада слике врши крос-корелационом функцијом. Овај начин мерења брзине флуида се често и посебно означава као дигитална анемометрија снимањем честица – digital particle image velocimetry (DPIV). Крајем осамдесетих DPIV је примењивана са скепсом због слабије резолуције у односу на фотографске PIV технике, која се сматра бољим избором готову за крајње брзе токове. Сматрало се да је прецизност процене помераја половина пиксела. Међутим субпикселска интерполација је поправила осетљивост дигиталне PIV до једне десетине пиксела (чак недавно и до пар стотих делова пиксела) [6].

Потреба за брзим снимањем несиметричних тродимензионих брзинских поља подстакла је развој и троккомпонентне 3С PIV, или стереоскопске PIV (SPIV), која се остварује на више начина: 1) технике са осветљавањем флуида, не ласерским листом, него максимално запремински проширеним ласерским снопом у које спада холографска PIV, 2) осветљавање флуида брзо скенирајућим ласерским листом и 3) постављањем више фото-детектора под различитим угловима. Под стереоскопском PIV се обично подразумева начин 3) при чему је дебелина ласерског листа повећана у односу на стандардну код 2D PIV, која износи око 0,1mm. Али постоје и друге варијанте, које са мањим или већим успехом процењују компоненте брзине ван осветљене равни [7].

Поменуто је већ да резолуција мерења зависи од избора технике обраде слике – корелационе технике имају мању резолуцију од "трагачких"/tracking техника за исту концентрацију маркера, а у оквиру сваке од тих техника резолуција је боља при већој концентрацији маркера. Међутим, код корелационих техника повећање резолуције доводи до повећања мерне несигурности. Наиме, извори мерне несигурности код PIV су несигурност у темпирању ласерског импулса и несигурност у процени помераја честица. Темпирање ласерског импулса је данас углавном врло прецизно тако да занемарљиво доприноси грешци процене брзине. Несигурност процене помераја, код корелационих техника је одређена односом површине корелационог максимума и површине сегмента. Корелациони максимум је ужи уколико је број ликова честица у сегменту већи, тако да, за исту концентрацију честица, за бољу процену помераја, треба повећати површину сегмента, чиме се смањује број сегмената а тиме и резолуција и обрнуто – ако се повећа резолуција повећањем броја и смањењем површине сегмента, смањује се број ликова честица у сегменту а тиме и тачност процене помераја честица. Тако се, према једном извору, тачност мерења креће од 2,5% од пуног опсега брзине при резолуцији 128×128 до 0,3% при резолуцији 16×16.

Минимални интервал између два снимка (ограничен могућностима камере) је реда  $\mu$ s, па је за брзине реда Mach-а потребно регистровати померај честица реда mm, што је лако оствариво, са расположивим резолуцијама CCD камера (1000×1000 до 2000×3000) и величинама површине токова, које се са PIV техникама испитују.

Величина испитиване површине тока је одређена енергијом ласерског импулса и осетљивошћу фотографске плоче или CCD камере. Под условом да осветљеност



честица буде довољна за добијање задовољавајуће слике на фотодетектору, ласерски снопови се данас тешко могу развући у листове веће од 50×50cm. То ограничава примену PIV техника на токове мањих димензија.

*Холографске анемометрије*

Суштинско проширење анемометрије на тродимензионалну област омогућује једино холографско снимање флуида. Двојном експозицијом се снимају холограми провидних или дифузионих флуида у два временски блиска стања на истој плочи. Парови холографских снимака флуида, снимака тродимензионалног простора, могу се регистровати било истоветним референтним снопом или референтним сноповима који падају под различитим угловима. Налажење брзинског поља анализом помераја холографских ликова честица представља холографску анемометрију снимањем честица (HPIV) [8]. Њоме је могуће тродимензионално снимање са високом резолуцијом. Али баш тако велики број тачака слике чини њену обраду дуготрајном, што ће бити превазиђено тек новим рачунарима виших перформанси. Осим тога, на холографском снимку су слабо дефинисане честице пречника реда микрометра и мање, због чега ова техника није довољно поуздана код крајње брзих и врло променљивих токова, које могу верно да прате само ситније честице. Преласком са снимања холограма на фотографске плоче, које карактерише изузетно висока резолуција (5000 линија по милиметру) на снимање електронским камерама, којима се не региструју појединачне честице већ "пегасте" структуре, које су последица расејања колективна честица, настала је електронска спекл интерферометрија (ESPI) или дигитална спекл интерферометрија (DSPI). Њоме се избегавају приметни процеси у фотолабораторији и сва се обрада врши на рачунару.

Холографија такође омогућује испитивање тока флуида без убацивања честица техником званом холографска интерферометрија (HI) [9]. Ова техника има исту оптичку поставку као и PIV технике. Помоћу монохроматске или беле светлости се генерише серија интерферограма на основу чијих се пруга реконструише брзинско поље. Интерферограми се анализирају аутоматски помоћу програма за обраду слике. Монохроматска холографска интерферометрија би давала само релативне податке погодне за визуализацију тока, док код интерферометрије белом светлошћу (у боји) имамо ахроматске пруге на основу којих се могу добити апсолутни подаци по целом посматраном пољу. Предност ове методе је што не тражи убацивање маркера у флуид, што је чини још неинвазивнијом од осталих оптичких метода. Код ње се не поставља питање верности праћења тока, што ће, уз недавни развој холографске интерферометрије у реалном времену [10], препоручити ову методу за испитивање крајње брзих токова.

**ОПТИЧКЕ ДОПЛЕР ТЕХНИКЕ**

Основа оптичких Доплер техника за испитивање тока флуида је детектовање и мерење промене фреквенције светлости услед расејања на честицама у флуиду [11]. На основу теорије Доплеровог ефекта, та промена фреквенције је линеарна функција одређене компоненте вектора брзине честице  $\vec{v}$  и дата је изразом

$$\Delta f_D = \frac{1}{\lambda} (\vec{u}_n - \vec{u}_r) \cdot \vec{v} \tag{2}$$

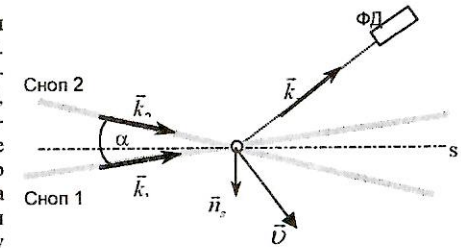
где је  $\lambda$  таласна дужина примењене светлости,  $\vec{u}_n$  је јединични вектор у правцу упада светлости на честицу (правац ласерског снопа), а  $\vec{u}_r$  јединични вектор у правцу светло-

сти коју честица расејава према фотодетектору. Промена фреквенције светлости услед Доплеровог ефекта је занемарљиво мала у односу на фреквенцију светлости (реда  $10^6$  пута је мања), тако да директно мерење промене фреквенције светлости није могуће.

*Ласер Доплер Анемометрија (LDV)*

У току развоја ласер Доплер анемометрије коришћене су различите конфигурације за детектовање Доплеровог фреквентног помераја. Међутим, ustalila се, и данас се под LDV системом подразумева диференцијална метода, тј. конфигурација са дуалним снопом, чији је принцип скициран на Сл. 4.

Мерна запремина се формира у области пресека два кохерентна ласерска снопа. Честица која пролази кроз мерну запремину расејава у свим правцима светлост, која је фреквентно модулисана фреквенцијом Доплеровог помераја, који је независан од правца расејања односно положаја фото-детектора. Тако се на излазу фото-детектора, чији је излазни сигнал пропорционалан интензитету светлости која пада на њега, добија периодично променљив сигнал фреквенције



Слика 4. Скица принципа LDV система са дуалним снопом

$$f_D = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda} \vec{v} \cdot \vec{n}, \tag{3}$$

где је  $\alpha$  – угао под којим се секу снопови,  $\lambda$  – таласна дужина упадне светлости,  $\vec{n}$  је јединични вектор у правцу нормале на симетралу угла под којим се секу снопови и  $\vec{v}$  – вектор брзине честице.

Просторна резолуција је одређена величином мерне запремине, која се јаким фокусирањем снопова и оптичким закљонима на фото-детектору може свести на величину 60 · 60µm. Опсег брзина се креће од mm/s до неколико стотина m/s. Динамички опсег мерења зависи од параметара мерача фреквенције сигнала фото-детектора али се они, пошто је мерење on line, лако подешавају у току експеримента. Осетљивост мерења је одређена углом под којим се секу снопови  $\alpha$ , таласном дужином ласерских снопова  $\lambda$  (Једн. (3)), и осетљивошћу самог мерача фреквенције. За тачност мерења је најзначајније поуздано мерење фреквенције сигнала, где критичну улогу има стабилизација, или познавање вредности угла пресека два ласерска снопа. Он може да се мења услед преламања ласерских снопова, које, поврх тога, доводи и до дислокације мерне запремине. Ове грешке се могу избећи правилном поставком LDA система и обрадом резултата мерења [12].

Временска резолуција технике је врло висока: пропорционална је концентрацији честица у флуиду а обрнуто је пропорционална средњој брзини честица. Добра временска резолуција пружа могућност мерења убрзања честица у флуиду и самог флуида (ако честице верно прате његов ток) [13]. LDV је једина од овде разматраних оптичких метода која омогућује праћење брзине током произвољно дугог временског интервала.

Увођењем једног или два нова пара снопова, овом техником се мере и две односно три компоненте брзине честица. Најсигурније је поједине компоненте брзине раздвајати на

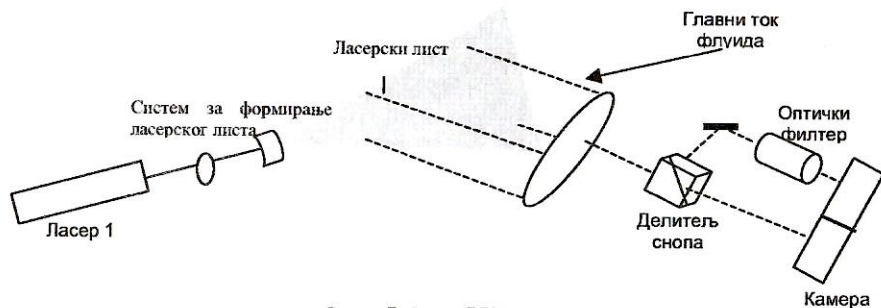


основу боје снопова којима се одређују. Дискриминација на бази поларизације се није показала поузданом због елиптичне поларизације расејане светлости [14].

На жалост, проширење ове технике, којом се тако поуздано и релативно једноставно мери Доплеров померај, са мерења у тачки на мерење у равни није изводљиво. Зато је развијена нова класа техника која мери брзину честица у равни, на основу Доплеровог фреквентног помераја измереног применом молекулског филтера – планарна Доплер анемометрија.

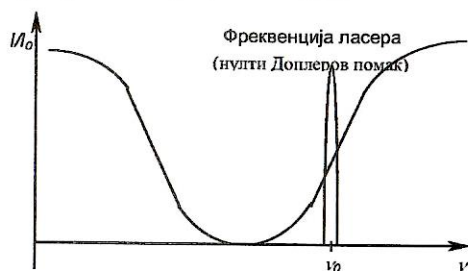
**Планарна Доплер анемометрија (PDV)**

Ласерски снап раширен у ласерски лист осветљава честице у флуиду (Сл. 5). Светлост, која је, у одређеном правцу, расејана на честицама у осветљеној равни, делитељем снопа се дели на једнаке интензитете од којих један део пада директно на камеру, док други пре тога пролази кроз оптички филтер.



Слика 5. Скица PDV система

Оптички филтер је одабран тако да се фреквенција примењеног ласера налази на половини нагиба на граници апсорпционе области у његовој трансмисионој спектралној карактеристици (Сл. 6). На тај начин је постигнуто да интензитет светлости пропуштене кроз филтер буде пропорционалан њеној фреквенцији која је, услед Доплеровог ефекта, померена у односу на фреквенцију упадне светлости и пропорционална је брзини честица.



Слика 6. Скица трансмисионе спектралне карактеристике оптичког филтера код PDV система уопредо са линијом примењеног ласерског снопа

Слика интензитета филтриране расејане светлости се нормализује према слици нефилтриране расејане светлости како би се елиминисале варијације интензитета које нису последица Доплеровог ефекта, већ су последица различите величине и бројне

концентрације честица у флуиду, као и временске и просторне флукуације интензитета светлости. Расподела интензитета осветљености на једној, тако обрађеној, слици филтриране расејане светлости одговара расподелу интензитета компоненте вектора брзине у правцу разлике јединичног вектора упадног правца ласерске светлости и јединичног вектора у правцу расејања ка камери (Једн. (2)).

Применом континуалног ласера добијају се временски усредњене компоненте брзине, док се применом импулсног ласера добијају тренутне вредности брзине (тачније у интервалу реда ns па чак и fs, колике су ширине импулса данашњих ласера).

Као оптички филтер је најчешће стаклена хелија испуњена парама јода. Такав оптички филтер, у околини таласне дужине  $\lambda = 532\text{nm}$  (други хармоник Nd<sup>3+</sup>:YAG ласера), има нагиб спектралне карактеристике који дозвољава мерење брзине до око 30m/s [15]. Температуром гаса у оптичком филтру подешава се интензитет максималне трансмисије, а тиме и нагиб трансмисионе спектралне карактеристике. При већем нагибу спектралне карактеристике, за исте Доплерове помаке у фреквенцији расејане светлости, већи је промена њеног интензитета а тиме и осетљивост мерног система. Убацавањем инертног гаса, нпр. азота, и повећањем укупног притиска гаса, бројнији судари између молекула азота и јода учиниће да нагиб спектралне карактеристике буде блажи. На тај начин проширује се фреквентни опсег нагиба што повећава опсег мерљивих брзина. Дакле, подешавањем укупног притиска гаса, нагиб спектралне карактеристике се може проширити тако да одговара динамичком опсегу очекиваних брзина у току. Међутим, смањење нагиба доводи до смањења осетљивости мерног система. Због тога, узимајући у обзир очекиване вредности брзине флуида, треба наћи компромис између повећања осетљивости система онтријим нагибом и повећања опсега мерења ублажавањем нагиба спектралне карактеристике. Кад је профил спектралне карактеристике подешен на жељени начин, најважније је притисак и температуру гаса одржавати константним да не би дошло до промене облика профила а тиме и грешке у мерењу.

Основни извори мерне несигурности су: нестабилност фреквенције ласера, шум CCD камере и грешке у налажењу одговарајућих парова пиксела са различитих слика. Један начин елиминисања грешке услед флукуације фреквенције ласера је да се врло мали део снопа одвоји ради непрестаног праћења вредности фреквенције мерењем интензитета његове апсорпције проласком кроз јодни филтер. Са друге стране флукуације фреквенције новопроизведених ласера су, из године у годину све мање, али су ласери стабилисане фреквенције скупи. Код CCD камера је најпроблематичнији шум и то "пегаста" (speckle). Неравномерна расподела честица у флуиду доводи до неравномерности фазе расејане светлости, чијом интерференцијом настају интерференционе зоне у виду пеге. Појаву ових интерференционих зона користи за мерење брзине флуида ласерска спекл анемометрија (LSV), која се заснива на PIV принципу. Ова појава је главни узрок несигурности код PDV мерења у турбулентним токовима. На трећи извор мерне несигурности се налази приликом нормирања филтриране слике флуида нефилтрираном. Потребно је што прецизније преклопити те слике тако да сваки пиксел филтриране слике, потпуно одговара оном истом делу флуида коме одговара и пиксел нефилтриране слике који се првим нормира.

Просторна резолуција технике је боља од просторних резолуција осталих оптичких анемометрија, а расте са повећањем резолуције CCD камере и повећањем концентрације честица у флуиду. Слаба временска резолуција, одређена временским интервалом између два суседна импулса, дуго је била највећи недостатак ове технике. Међутим, појава ласера који дају поворке снажних импулса фреквенције до 25MHz,



омогућава да се овом техником испитују крајње брзи токови и то практично у реалном времену (real time planar Doppler velocimetry – RTPDV).

Осетљивост PDV мерног система зависи од, већ поменутог нагиба профила трансмисионе спектралне карактеристике, затим од осетљивости CCD камере, као и спектралне ширине ласерске линије. Од последње зависи и минимална мерљива брзина, која може да се спусти до вредности од неколико m/s.

### Својства маркера и ласера

#### Маркери

И Доплер технике (LDV и PDV) и PIV мере брзину честица у флуиду. Дакле или користе већ постојеће честице у флуиду (нпр. мехурићи ваздуха су довољни за многе примене LDV), или траже да се у флуид убаце честице – маркери. За маркере се бирају лако доступне и еколошки безбавне супстанце, које се лако могу распршити у субмикрометарске честице, које треба да испуне три услова: 1) да верно прате ток струјања флуида, 2) да не ремете ток ни својства флуида и 3) да не интерагују међусобно. За гасовите флуиде се може користити атомизовано биљно или силиконско уље. Од чврстих супстанци, користе се алуминијумов и титанијумов оксид и стиропор за обележавање и течности и гасова. Потребна величина и бројна концентрација честица зависи од примењене технике. Код LDV и PIV честице треба да буду довољно велике да би и као појединачне биле детектоване. Док је сигнал детектован код PDV кумулативан – не детектују се појединачне честице, тако да ту не постоји доња границе величине честица.

Бројна концентрација честица је ограничена са горње стране код LDV и PIV. Истовремено присуство две честице у мерној запремини LDV система, даје тешко и углавном погрешно читљив сигнал фотодетектора. Превелика концентрација може отежати и онемогућити налажење корелације ликова са два PIV снимка. Код PDV бројна концентрација честица није на тај начин ограничена, напротив, пожељна је што већа концентрација честица. Поређењем оптималних концентрација ових техника, може се закључити да су оне код PIV за ред величине веће него код LDV, а за ред величине мање него код PDV.

Један од извора грешке ових метода може да буде инертност честица. Мерење је поуздано само ако честице довољно верно прате ток. Способност честица да прате ток се може окарактерисати Стоуксовим [2] бројем, који је једнак односу карактеристичног времена динамичког одговора честице  $\tau_c$  и карактеристичног времена испитиваног тока

$$\tau_f: St = \frac{\tau_c}{\tau_f} = \frac{\rho d^2}{18\eta\tau_f}$$

где је  $\rho$  густина материјала честице,  $d$  је пречник честице, а  $\eta$  динамички коефицијент вискозности флуида. Уколико је мањи Стоуксов број утолико верније честица прати ток. Према изразу за Стоуксов број види се да су пожељније честице мањих димензија и мање густине, због чега PDV има предност.

#### Избор ласера

LDA мерни системи не захтевају сложене ласерске системе – раде са континуалним ласерима ниске снаге (нпр. 15mW HeNe ласер или диодни ласери). Насупрот њима, за

PIV и PDV технике, Nd<sup>3+</sup>:YAG импулсни ласер је погоднији од других ласера (нпр. ни најјачи аргонски ласери не дају довољну светлосну снагу за добијање квалитетних снимака флуида). Његов скоро Гаусов профил снопа је погодан за развлачење у ласерски лист. Велика енергија импулса (до 700mJ) је значајна за испитивање токова већих димензија, нарочито код стереоскопске PIV, где ласерски лист треба да буде дебљи. Код холографске интерферометрије мање је битна снага ласера али је, за успех мерења врло важна кохерентност примењене светлости. Таласна дужина другог хармоника Nd<sup>3+</sup>:YAG ласера –  $\lambda=532\text{nm}$ , блиска је максимумима осетљивости типичних CCD камера и фотографских филмова. За PDV је значајно да може да се подеси да спектрална ширина линије ласера буде што ужа (испод 50MHz, да би могле да се мере и брзине испод 10m/s). Већ су поменути прецизност у темпирању импулса и кратко трајање импулса Nd<sup>3+</sup>:YAG ласера (до fs) што обезбеђује довољно оштре снимке и код крајње брзих токова. Остали импулсни и континуални ласери имају само неке од ових повољних могућности, па сразмерно томе и способности мерних система са њима су мање, али су зато јефтинији и мањих димензија [15].

### ЗАКЉУЧАК

Поређењем овде разматраних оптичких метода испитивања тока флуида, може се закључити да је ласер Доплер анемометрија – LDV, јефтинија техника, али код ње снимање расподеле интензитета захтева много времена. Са друге стране анемометрија снимањем честица – PIV, и планарна Доплер анемометрија – PDV, тренутно дају расподелу брзина у целој равни флуида, али захтевају сложеније апаратуре. Цени ових уређаја највиша доприносе наносекундни, импулсни ласери велике густине снаге и CCD камере. Због тога је ласер Доплер анемометрија погодна за испитивање једноставнијих и правилнијих токова, код којих се, уз помоћ података о брзини у не великом броју тачака, може добити комплетна слика тока флуида. Практично је, од оптичких техника, најпогоднија код испитивања токова брзина мањих од неколико m/s, и када је од интереса дуготрајно праћење тока. Међутим, код токова са вртлозима и већим степенима турбуленције, погодније је користити технике које тренутно дају слике расподеле интензитета одређене компоненте брзине у целој равни, као што су PIV и PDV. Овим техникама се могу мерити и три компоненте брзине у тачкама осветљене равни (у чему је PDV поузданија). Трокомпонентно (3C) мерење брзине у тродимензионалној области (3D) омогућују холографске технике, али ће, због огромног броја података (бројних вредности) везаних уз њих, њихова практична примена бити могућа тек са довољним повећањем моћи рачунара и програма за обраду холограма. Међу холографским техникама се издваја холографска интерферометрија због тога што не захтева присуство маркера у флуиду (још је мање инвазивна од осталих оптичких техника) и код ње је најлакше решив проблем преламања светлости који се јавља код свих испитивања затворених токова.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] G.S.Settles, E.B.Hackett, J.D.Miller, L.M.Weinsterin, "Full-Scale Schlieren Flow Visualisation", Flow Visualisation VII, 1995, pp.2–13.
- [2] J.Westerweel, "Fundamentals of digital particle image velocimetry", Meas.Sci.Technol., vol. 8, pp. 1379–1392, 1997.
- [3] R.J. Adrian, "Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry", Meas.Sci.Technol., vol. 8, pp.1393–1398, 1997.



- [4] K.Ohmi, H.Y.Li, "Particle-tracking velocimetry with new algorithms", *Meas.Sci.Technol.*, vol. 11, pp. 603-616, 2000.
- [5] F.Scarano, "Iterative image deformation methods in PIV", *Meas.Sci.Technol.*, vol. 13, R1-R19, 2002.
- [6] H.Huang, D.Dabiri, M.Gharib, "On errors of digital particle image velocimetry", *Meas.Sci.Technol.* vol. 8, pp. 1427-1440., 1997.
- [7] F.Pereira, M.Gharib, "Defocusing digital particle image velocimetry and the three-dimensional characterisation of two phase flows", *Meas.Sci.Technol.*, vol. 13, pp.683-694, 2002.
- [8] K.D.Hinsch, "Holographic particle image velocimetry", *Meas.Sci.Technol.*, vol. 13, pp. R61-R72, 2002.
- [9] V.Palero, N.Andres, M.P.Arroyo, M.Quintanilla, "Holographic interferometry versus stereoscopic PIV for measuring out of plain velocity fields in confined flows", *Meas.Sci.Technol.* vol. 11, pp. 655-666, 2000.
- [10] J.M.Desse, F.Albe, J.L.Tribillon, "Real-time color holographic interferometry", *Appl.Opt.*, vol. 41, pp. 5326-5333, 2002.
- [11] F. Durst, A. Melling, J.H. Whithlaw, "Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry", Academic Press, New York, 1976.
- [12] С.Ристич, М.Сречковић, Ј.Илић: "Analysis of Fluid Flows in Tubes of Variable Cross-section by LDA", *Transactions - Scopštenja Mašinskog fakulteta*, XXX, бр.1 стр. 25-30, 2000.
- [13] B.Lehmann, N.Nobach, C.Tropea, "Measurement of acceleration using the laser Doppler technique", *Meas.Sci.Technol.* vol. 13, pp.1367-1381, 2002.
- [14] J.Czarske, "Laser Doppler velocity profile sensor using chromatic coding", *Meas.Sci. Technol.*, vol. 12, pp.52-57, 2001.
- [15] R.L.McKenzie, "Measurement capabilities of planar Doppler velocimetry using pulsed lasers", *Appl.Opt.*, vol. 35, 948-964, 1996.
- [16] B.Thurow, J.Hileman, M.Samimy, W.Lempert, "Progress towards a real time quantitative measurement technique for high speed flows", 31st AIAA Fluid Dynamics Conference, Anaheim 2001, pp. 2985-2986.

## ОДРЕЂИВАЊЕ КОЕФИЦИЈЕНТА ТОПЛОТНЕ ПРОВОДНОСТИ ЧВРСТИХ МАТЕРИЈАЛА МОДИФИКОВАНОМ "ДИСК" МЕТОДОМ

М. А. Зоњић, Н. Д. Милошевић, К. Д. Маглић

### Кратак садржај

У раду је описано унапређење експерименталне методе за одређивање топлотне проводности групе материјала лошијих проводника топлоте у које спадају пластике, стакла, гуме и сл. Метода се примењује у Лабораторији за термотехнику и енергетику Института за нуклеарне науке "Винча" од краја 60-их година [1] и даје добре и поуздане резултате у опсегу од 10 до 200 °C. У току последње године метода је подвргнута ревизији и унапређена увођењем аутоматизованог мерења и обраде података под контролом рачунара. Примена унапређења илустрована је експериментима на узорцима ебонита, некадашњим радним еталонима National Physical Laboratory, Teddington, UK, где је била и првобитно развијена [2,3] и стандардизована [4].

### УВОД

Значајан напредак технике у последњих неколико деценија повезан је са развојем нових материјала и нових технологија. Све оштрији захтеви у погледу перформанси различитих уређаја и склопова, уштеде енергије итд. наметнули су потребу за тачним познавањем особина материјала, међу којима посебну групу представљају термофизичке карактеристике материјала. Познавање ових карактеристика омогућава решавање термичких проблема као што су димензионисање топлотне заштите, усмеравање и одвођење топлотних токова, смањивање топлотних губитака, акумулација топлоте и сл. Коefицијент топлотне проводности која се одређује методом која је предмет овог рада представља једну од најбитнијих термофизичких карактеристика материјала.

Која ће метода за одређивање топлотне проводности бити примењена за који материјал зависи од тога којој групи у погледу провођења топлоте он припада, термопроводним или термоизолационим материјалима, зависи од опсега температуре на којој се материјал примењује, од структуре и природе материјала, тј његових физичких, оптичких и електричних карактеристика. Приказ метода које се данас користе и њихова систематизација изложени су у референтном делу [5].

Метода која је предмет овог рада даје најпоузданије резултате кад се одређује Коefицијент топлотне проводности тзв. "средњих" проводника топлоте, материјала код којих се ова особина налази у опсегу између 0,15 и 2 W/mK. Користи узорке у облику дискова дебљине од 3 до 15 mm. Опсег температура у којем се одређује коefицијент топлотне проводности зависи од тога који се флуид користи за термостатирање хладњака који представљају топлотни попор и може бити од 10 до 90 °C, или од 10 до 200 °C.

М.А. Зоњић, Институт за нуклеарне науке "Винча" Лабораторија за термотехнику и енергетику – ИТЕ  
 Н.Д. Милошевић, Институт за нуклеарне науке "Винча" Лабораторија за термотехнику и енергетику – ИТЕ  
 К.Д. Маглић, Институт за нуклеарне науке "Винча" Лабораторија за термотехнику и енергетику – ИТЕ