

Oponentní posudek disertační práce

Experimentální vyšetřování syntetizovaného proudu v laminárním proudění kanálem

Autor Ing. Petra Dančová

Formální popis práce

Posuzovaná práce je předkládána jako doktorská disertační práce Ing. Petry Dančové na Technické univerzitě v Liberci, Fakulta strojní, ke získání titulu Doktor (Ph.D.) v doktorském studijním programu oboru Aplikovaná mechanika – Mechanika tekutin a termodynamika. Školitelem Ing. Petry Dančové je Ing. Zdeněk Trávníček, CSc., školitelem specialistou je Doc. Ing. Tomáš Vít, PhD.

Disertace je datována 2012, práci jsem obdržel 6. 9. 2012.

Disertace má 130 číslovaných stránek včetně příloh a je formálně dělena na 4 číslované kapitoly, plus Anotace, Seznam symbolů, Seznam obrázků, Reference, Publikace autora a 11 Příloh.

Dizertace je psána v angličtině. Na disertaci autorka pracovala na třech vědeckých pracovištích (ÚT AV ČR, TU Eindhoven, Holandsko, TU v Liberci).

Prvá kapitola – Introduction (18 stran) velmi stručně definuje cíle práce – výzkum syntetizovaných proudů (SJ) v oblasti nízkých Reynoldsových čísel, a jejich aplikaci při zlepšování chlazení malých elektronických součástek.

V této kapitole jsou také stručně shrnuty vlastnosti používaných elementů výzkumu: proudění v kanále, syntetizovaný proud a ovládání proudění vnášením syntetizovaného proudu. Je zde rovněž uvedena motivace, cíle práce a problémy parametrizace.

Druhá kapitola – Experimental Setup and Methods (23 stran) se v podstatě zabývá technickou stránkou experimentu a jeho vyhodnocení: piezokeramický aktuátor SJ a jeho buzení, vzorkování signálu rychlosti, fázovým a časovým průměrováním a použitými měřicími metodami CTA, laserová vibrometrie, poměrně unikátní metoda zviditelňování cínovými ionty, a hlavně metoda PIV.

V této kapitole je rovněž provedena – i když ne úplná a bohužel pouze obecná – analýza nejistot měření jednotlivých částí a metod měření.

Třetí kapitola – Experimental Results (36 stran) shrnuje většinou v grafické formě výsledky experimentů, a to jak měření nerušeného proudění kanálem, tak měření s jednou výstupní tryskou, tak měření s více výstupními tryskami SJ.

Při měření byly použity všechny měřicí metody uvedené v předchozí kapitole, a to jak pro měření samotného SJ proudění bez průtoku kanálem, tak i při současném průtoku kanálem. Naměřené výsledky jsou pak slovně shrnuty do zhruba dvou stran textu.

Čtvrtá kapitola – Conclusions (2 1/2 strany) hodnotí vykonanou práci z hlediska splnění cílů práce:

- bylo navrženo experimentální zařízení s aktuátory SJ
- byla určena rezonanční frekvence vyvinutého aktuátoru SJ
- byla provedena vizualizace proudění inkoustem a cínovými ionty
- bylo provedeno PIV měření, které bylo hlavní částí experimentu
- byla provedena analýza výsledků měření rychlostních polí s i bez SJ a bylo konstatováno, že ověřovaná konfigurace by mohla být užitečná pro chlazení mikroaplikací.

Tato kapitola rovněž uvádí náměty pro další práci.

Práce je vybavena rozsáhlými obecnými **Referencemi** (6 stran, 104 položek), **Publikacemi autorky** (2 strany, 27 položek) a 11 **Přílohami** konstrukčního, fotografického i výpočetního charakteru.

Hodnocení práce

Ze seznamu prací autorky je zřejmé, že se autorka touto tematikou zabývá dlouhodobě a disertace popisuje jen část vykonané práce. Téma je dobře zvolené. pokud jsem informován, tak v oblasti SJ je jen velmi málo prací, zabývajících se interakcí SJ a laminárního proudění v kanále s interakcí více trysek SJ.

Práce má v rámci doktorských prací slušnou úroveň a obsahuje originální výsledky. Z popsaných prací si nejvíce cením vývoje komplexní metodiky měření s použitím několika měřících metod (CTA, LDV, PIV, zviditelňování barvivem a zviditelňování cínovými ionty). Použití sítě trysek SJ je podle mého názoru originální řešení pro zvýšení účinku SJ s vysokým aplikačním potenciálem. Rovněž si velmi cením toho, že autorka dobře zvládla spolupráci mezi několika pracovišti a že práce je psána anglicky s velmi slušnou jazykovou úrovní i výbornou grafickou úpravou.

Připomínky a dotazy

Jsem rád, že se autorka u některých metod pokusila o odhady měřících nejistot. Odhady jsou ale vykonány více méně separátně a neobsahují celkové ani konkrétní numerické výsledné hodnoty, ani – myslím – nejsou provedeny v souladu s normami (nejistoty typu A, B...) nejistot měření.

Dotazy:

- (1) Vzhledem k tomu, že autorka v Acknowledgements děkuje Ing. Michalu Kotkovi, Ph.D. za jeho „rady a pomoc s PIV systémem“, prosím autorku, aby tuto pomoc blíže definovala z hlediska možného spoluautorství.
- (2) Jaky je odhad nejistot (nejistoty typu A, B...) měření rychlosti tekutiny při měření metodou PIV, pro kterou je v práci uvedeno nejvíce výsledků?
- (3) V modelových podmínkách provedených experimentů je rezonanční frekvence SJ v okolí 15 Hz. Zajímalo by mne, jaká by – pouze řádově – byla odhadovaná rezonanční frekvence reálného piezoelektrického budiče pro chlazení mikroelektroniky při práci ve vzduchu?

Formální hodnocení práce

Téma disertační práce je velmi aktuální.

V disertaci stanoveného cíle bylo beze zbytku dosaženo.

Zvolené metody zpracování práce jsou adekvátní.

Výsledky disertační práce jsou vědecky zajímavé a přínosné pro vědní obor.

Doktorandka vypracováním práce prokázala, že ovládá vědecké metody práce, má hluboké teoretické i praktické znalosti a přináší nové poznatky v oboru.

Formální úroveň práce výborně splňuje kritéria na ní kladená.

Celkové hodnocení disertační práce

Protože disertační práce podle mého názoru splňuje všechny požadavky stanovené v § 47 Zákona o vysokých školách č. 111/98 Sb., doporučuji ji k obhajobě na Technické univerzitě v Liberci. V případě úspěšné obhajoby disertační práce pak doporučuji udělit Ing. Petře Dančové vědeckou hodnost Ph.D.

Ing. Ladislav
Klaboch, CSc.

Digitally signed by Ing. Ladislav
Klaboch, CSc.,
DN: cn=Ing. Ladislav Klaboch,
CSc., c=CZ,
email=klaboch@optek.cz
Date: 2012.09.19 21:58:10
+02'00'

V Praze dne 19. 9. 2012

*Ing. Ladislav Klaboch, CSc., OPTEK, Čáslavská 9, 130 00 Praha 3
tel. 271 732 204, fax 267 317 266, klaboch at optek dot cz*

Oponentský posudek na disertační práci na téma

Experimental Investigation of Synthetic Jets in a Laminar Channel Flow

Experimentální vyšetřování syntetizovaného proudu v laminárním proudění kanálem

Doktorand: Ing. Petra Dančová
Fakulta strojní
Katedra energetických zařízení
Technická univerzita v Liberci

Téma disertační práce je zaměřeno na experimentální výzkum proudění kapalin i interakci se syntetizovaným proudem. Téma je vzhledem k použitým experimentálním metodám a uplatnění výzkumu v mnoha průmyslových aplikacích velmi aktuální.

Práce obsahuje 130 stran. Je členěna na čtyři kapitoly, jednotlivé kapitoly na sebe logicky navazují. Kapitola první je věnována zasvěcenému velmi kvalitnímu úvodu do problému včetně nezbytných teoretických informací, výčtu prací zaměřených na experimentální zkoumání syntetizovaných proudů, definování cílů práce. Specifikace variant experimentálních zařízení zaměřených na vliv jednoho syntetizovaného proudu a pole proudů na laminární proudění, návrh těchto zařízení a realizace, vyhodnocování reálného signálu získaného měřením, popis metod použitých při řešení problému (HWA, LDV, vizualizace, PIV) a rozbor chyb zařízení jsou rozvedeny v kapitole druhé. Kapitola třetí popisuje výsledky měření, vyhodnocuje je v závislosti na teoretických předpokladech. Postup měření je závislý na postupném rozšiřování kvality získaných výsledků, přitom je zřejmé, že tuto metodiku postupu nelze měnit, neboť výsledky jsou postupně využívány pro další experiment. Práce vznikla za spolupráce TU/e v Eindhoven, TUL v Liberci a ÚTAV ČR Praha. Tím bylo umožněno využít špičkových experimentálních zařízení i zkušeností pracovníků těchto pracovišť. Výsledkem je komplexně zpracovaná problematika experimentálního zkoumání syntetických proudů. Pokud je to možné, jsou výsledky různých metod a přístupů porovnávány. V závěru je práce zhodnocena s ohledem na splnění cílů dizertace a jsou zdůrazněny možnosti dalšího zkoumání podobných problémů.

Aktuálnost tématu

Téma disertační práce je velmi aktuální, neboť byly navrženy experimentální metody a postupy řešení syntetických proudů v interakci s laminárním prouděním v kanále, vyhodnocena jejich přesnost, náročnost. V současné době se otvírají možnosti širokého

využití syntetických proudů v řadě odvětví. Proto je předmětem zájmu teoreticky a experimentálně zvládnout interakci syntetických proudů s prouděním v kanále, podrobně popsat tento jev, zhodnotit možnost předem definovat vlastnosti syntetických proudů a jejich účinky.

Splnění sledovaných cílů práce

Cíle práce byly specifikovány do několika bodů počínaje návrhem, konstrukcí a realizací experimentálního zařízení, zjištění vlastních frekvencí při dynamickém chování proudění a vyhodnocení dalších pomocných veličin souvisejících s experimentem a hlavní část práce se měla týkat měření a vyhodnocení proudění v kanále za účinku syntetického proudu a skupiny syntetických proudů. Všechny body byly splněny a velmi kvalitně zpracovány v práci včetně teoretického základu. Tedy náročně stanové cíle byly splněny.

Zvolené metody zpracování

Pro řešení bylo postupně vybráno několik experimentálních metod řešení počínaje historickým přístupem k určení laminárního rychlostního profilu dle Reynoldse. Dalšími metodami byly moderní metody měření rychlostí HWA, LDA, LDV, PIV vhodné pro specifické vyhodnocení.

Nové poznatky, které přináší práce

Práce přináší nové poznatky v oblasti metodiky měření dynamiky proudění od specifikace typu proudění, určení frekvenčních charakteristik užitím HWA, neboť u složitějších proudění, jako je interakce periodických proudů, je teoretické určení nemožné. Následně je pak možno použít PIV a specifikovat parametry snímání signálu. Tato metodika je kvalitním návodem pro využití moderních experimentálních metod při řešení dynamických jevů v proudění tekutin.

Přínos pro rozvoj vědy a techniky

Přínosem experimentálního modelování je vytvoření metodiky pro zkoumání syntetických proudů z hlediska dynamiky proudění a zhodnocení možnosti řešení aplikací v různých průmyslových oblastech při realizaci návrhů zařízení a jeho optimalizaci na základě kvalitního experimentu. Práci je možno považovat za vynikající základ k rozvoji tohoto vědního oboru s výhledem na rozvoj experimentu z hlediska dynamiky proudění.

Práce je napsána velmi přehledně, grafické zpracování je na vysoké úrovni, k formální stránce nemám žádné připomínky.:

Otázky na doktorandku

- Str. 27, obr. 1.10 – jsou zde vyhodnoceny zajímavé výsledky získané z numerické simulace. Byly tato metody použity k dalším návrhům zařízení případně pro verifikaci výsledků? Budou případně numerické metody jednou z možností dalších prací v oblasti návrhu podobných zařízení?
- Str. 62, obr. 3.2 a 3.3a – měření se od teoretického výpočtu liší minimálně, přesto je u druhého obrázku zjevná větší odchylka měřených hodnot, profil se jeví jako ještě neustálený. Co bylo důvodem této nepřesnosti, i když méně významné?
- Str. 82, obr. 3.25 a 3.26 – průběh rychlosti vykazuje nesymetrii profilu (navíc v opačném smyslu), čím je to způsobeno?
- Bude do budoucna plánováno měření v oblasti přechodu z laminarity do turbulence či turbulence, neboť při úlohách s vyššími teplotami takové situace mohou nastat. Jaké metody by se jevíly jako optimální?

Dizertační práce dokumentuje, že doktorandka velmi dobře zvládla danou problematiku, shromáždila řadu publikací, výsledky byly publikovány v řadě konferencí a časopisech, splnila jasně stanovené cíle dizertační práce, která je na vysoké teoretické i aplikační úrovni a obsahuje významné původní přístupy. Proto doporučuji dizertační práci k obhajobě

Ostrava, 5/010/2012


Prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Fakulta strojní

VŠB-TU Ostrava

Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.
Radomská 469
18100 Praha 8

Oponentní posudek

disertační práce Ing. Petry Dančové: *Experimental Investigation of Synthetic Jets in a Laminar Channel Flow*, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Liberec, 2012.

Předložená disertační práce obsahuje 130 stran s listy titulním, o autorství a s poděkováním, dále kromě vlastního textu obsahuje souhrny v jazyce českém a anglickém, obsah, seznam označení, seznam obrázků, 11 dodatků, seznam použité literatury, který má 104 pramenů, a seznam publikací autorky převážně se spoluautory, který má 27 pramenů.

Tématem práce je experimentální výzkum zaměřený na účinky syntetizovaných proudů na laminární proudění v kanále obdélníkového průřezu.

V rozsáhlém úvodu jsou popsány laminární proudění v kanále obdélníkového průřezu, syntetizované proudy a jejich účinky a užití a jsou vytyčeny cíle disertační práce. Jsou shrnuty významné veličiny charakterizující syntetizované proudy a hlavní proud v kanále obdélníkového průřezu.

Ve druhé kapitole jsou popsána experimentální zařízení a použité výzkumné metody. Jsou podrobně uvedeny vodní kanály v TU Eindhoven (Nizozemí) a v Ústavu termomechaniky AVČR, v.v.i. včetně uspořádání syntetizovaných proudů při prováděných experimentech. Je zmíněno vzorkování při snímání měřených veličin a zpracování signálu. Užití experimentální metody - anemometrie žhaveného drátku, laserová dopplerovská vibrometrie, vizualizace ionty cínu a velocimetrie z obrazů částic (PIV). Je vyjádřena analýza nejistot aplikovaných výzkumných metod a užitých měřicích přístrojů.

Třetí kapitola předkládá dosažené experimentální výsledky - obrazy proudových polí a rozložení parametrů proudu pro případy - proudění vody v kanále obdélníkového průřezu bez interakce se syntetizovanými proudy, syntetizované proudy v nepohybující se vodě a syntetizované proudy v interakci s laminárním prouděním vody v kanále obdélníkového průřezu.

V závěrech jsou shrnuty a hodnoceny výsledky výzkumné práce. Jsou vytyčena témata pro zdokonalení budoucích experimentálních prací.

V početných dodatcích jsou informace převážně technického charakteru.

Hodnocení :

Obor mechaniky tekutin získal zhruba před osmnácti roky pozoruhodné téma, kterým je řízení parametrů hlavního proudu pomocí syntetizovaného proudu. Lze konstatovat, že toto téma vyvolalo značný zájem nejen významných výzkumných pracovišť, ale i pracovišť usilujících o aplikace např. v oborech energetiky, dopravy, chemických technologií, provozu elektronických zařízení, aj. Podstatou je, že energeticky nenáročný generátor syntetizovaného proudu střídavě ve stejném hmotovém množství nasává a vytlačuje tekutinu do hlavního proudu a může podstatným způsobem ovlivnit vektorové pole hlavního proudu a tak dosáhnout změny ve struktuře proudu na podporu průběhu procesů v tekutině. Autorka disertační práce měla obzvláštní příležitost připravit a provádět experimenty na zařízeních ve dvou prestižních výzkumných pracovištích i užitím vynikající měřicí techniky. Zvolila si za cíl navrhnout a vyvinout generátory syntetizovaného proudu pro speciální experiment

interakce syntetizovaného proudu s laminárním proudem ve vodním kanále a tento experiment uskutečnit s detailním proměřením parametrů a struktury proudových polí. Takovéto experimenty a dosažené výsledky jsou bezpochyby mimořádně aktuální. Lze konstatovat, že autorka disertační práce splnila stanovený cíl tím, že na dvou nezávislých, ale podobných, zařízeních připravila a provedla experimenty a užitím vynikající měřicí techniky (anemometrie žhaveného drátku, Dopplerovské laserové vibrometrie, vizualizace ionty cínu a velocimetrie z obrazů částic (PIV)) získala původní výsledky jako rozložení významných parametrů v proudovém poli a výskyt a strukturu významných jevů v proudových polích. Autorka si je vědoma, že provedené experimenty lze zdokonalovat a proto v tomto směru vytyčuje úkoly pro další výzkum.

Předložená disertační práce je přínosná hlavně pro základní výzkum svými výsledky a tím, že prokazuje možnosti a zkušenosti pro provedení experimentů se syntetizovanými proudy ve vodním prostředí. Na tuto práci budou bezpochyby navazovat další výzkumné práce, které budou využívat dosažené poznatky. Autorka disertační práce prokázala velmi dobré znalosti ze stavby a návrhu experimentálních zařízení pro výzkum v mechanice tekutin a dokázala si osvojit vynikající a moderní výzkumné a měřicí metody pro řešení náročných úkolů ke splnění vytyčených cílů.

Oponovaná práce má logickou stavbu. Je poznamenána tím, že předkládá výsledky různých experimentů ve variantách a pro důkladné rozborů výsledků zbývá jen menší prostor. Disertační práce je provedena s mimořádnou pečlivostí a na vynikající jazykové úrovni. Oponent měl určité potíže s orientací v odkazech na literaturu, protože nebyla citována chronologicky v postupu textu. V práci je skutečně minimální počet opomenutí a nedůsledností, které žádným způsobem nesnižují velmi dobré dosažené výsledky a kvalitu disertační práce.

Pro oponentní řízení by autorka disertační práce měla promluvit o tom, zda její výsledky by byly vhodné a dostatečné pro energetické bilance proudění ve vodním kanále a pro detailnější studium nevratných procesů.

Oponent se nechá poučit v lingvistickém tématu. Nebylo by vhodnější místo termínu "channel" použít termín "duct"?

Je možné z dosažených výsledků analyzovat možnost výskytu lokální turbulentní oblasti nebo rezervu od ztráty stability laminárního proudění?

Oponent musí poznamenat, že uvedením nejistot jednotlivých měřících přístrojů a výzkumných metod v experimentálním výzkumu analýza nejistot nekončí, ale začíná.

Závěr :

Předložená disertační práce je na velmi dobré úrovni a je určitě přínosná pro základní výzkum v oboru mechaniky tekutin. Autorka splnila stanovené cíle tím, že svým výzkumem získala soubor experimentálních výsledků účinku syntetizovaných proudů na laminární proudění ve vodním kanále. Prokázala svojí tvůrčí aktivitu, své velmi dobré odborné znalosti a výjimečnou pečlivost nejen ve výzkumné práci ale i v přípravě písemné dokumentace. Její disertační práce je podnětná i pro praxi v oborech, kde se lze setkat s potřebou řízení laminárního proudu. Oponent

doporučuje disertační práci Ing. Petry Dančové k obhajobě

před komisí pro obhajoby disertačních prací v doktorském studijním programu Aplikovaná mechanika a doporučuje, aby po úspěšné obhajobě byl Ing.P.Dančové udělen akademicko-vědecký titul

Philosophiae doctor (PhD.).

V Praze 12. října 2012

18/10-12

Review by: dr.ir. H.C. de Lange

Thesis: "Experimental Investigation of Synthetic Jets in a Laminar Channel Flow"

Author: Petra Dancova

Theme and Aims

The thesis deals with the experimental study of flow patterns created by synthetic jets in laminar flow conditions. The interaction of the jet flow with main stream channel flows is investigated. The aim of the work is to clarify the flow-field behavior in laminar flow cases applicable to micro-channel applications, where previously mostly numerical work has been performed. For this purpose, Reynolds number scaling has been applied to allow for flow-visualizations and –measurements.

The text and setup of the thesis are well chosen. The goal of the thesis, the presentation of the results and the conclusions are well connected. Furthermore, the experimental results are shown in clear details and in a logical order. The introduction gives a clear overview of the status of the topic. The present work is placed in perspective and the questions raised and answered in the thesis are posed. The candidate has chosen to position her work as an experimental verification of the synthetic jet in laminar flow conditions. As such, the results are applicable to flow-control and –mixing for micro-scale developments.

The conclusions to the thesis are well in line with the task the candidate set out for. The experiments performed shed light on the experimental behavior of Synthetic Jets and can serve as good reference for the numerical work of others.

Conclusion: The theme is timely and of importance for the further development of Synthetic Jets and the candidate fulfills the aims she set out for.

Methods

In the study, both single jets and a series of 4 parallel jets are studied. For these experiments, a number of dedicated experimental setups has been developed and, where necessary, constructed. The experimental methods used are tin-visualizations, hot-film anemometry and particle image velocimetry. These techniques are described in the thesis including a careful description of their inaccuracies.

The setups and experimental methods used are well up to standard. The use of combinations of tin visualizations, PIV and CTA gives the work a large potential of exploring the flow features of the Synthetic Jets.

Conclusion: The methods are well-chosen; appropriate and up-to-date for the task at hand. The careful description of the experimental methods and their inaccuracies shows that the candidate has really understood the possibilities of the techniques and is well aware of their limitations.

Results

The results are built from understanding the single jet in quiescent surrounding to the 4 parallel jets in a channel flow. The first results (fig.2.11) show that the flow field of the Synthetic Jet

contains two major time-scales: one is the pumping frequency of the jet-generator; the other is the swaying motion of the unstable laminar jet. The candidate has chosen to evaluate the flow-field using phase-averaging based on the pumping frequency. This results in the very clear visibility of the pumping results (for example visible in fig.3.27b) and is especially worthwhile in the study of the flow close to the generator (as in CTA-results in fig.3.22).

A slight disadvantage of the chosen phase averaging is that it only shows the mean motion of the swaying of the resulting jet-flow (further away from the nozzle exit). This can already be recognized in fig.2.11. From the point of the decay of the jet (fig.3.10), understanding the diffusion due to the laminar instability would have been of added value. This topic of jet decay/diffusion, for which the work gives some great leads, could have been explored more. In this sense, the tin visualizations are a great addition to the thesis as they show the non-averaged flow-field.

One aspect of fig.3.19 is that the 4 parallel jets seem to differ (and are also different from the single jet shown earlier, fig.3.7). It would seem that the generated swaying motion in these jets has different features (probably due to small differences in the Jet-generators).

Conclusion: the results presented fulfill the aim set out for: they clearly show the mean flow-patterns resulting from the Synthetic Jet in interaction with the channel flow.

Relevance

The combination of visualizations and PIV results gives a new insight in the resulting mean flow features. Furthermore, the flow field results of the interaction of the Synthetic Jets with a laminar channel flow are unique and give a clear view of the spreading and bending of the jet flow.

A major concern is the noticeable difference between the different Synthetic Jets. This seems to imply that details in the production of the SJ generators have a significant effect on the resulting flow-field. This is clearly visible in, for example, figs3.24b, or comparing figs.3.27c and d. These differences might influence the relevance of the results in, for example comparison with numerical results.

Conclusion: the presented results are unique; the work presents clear and new results on the behavior of Synthetic Jets. These results are valuable for the understanding of Synthetic Jets in an experimental setup.

Overall Conclusion

The thesis shows that the candidate fully understands the methods used, was able to produce valuable results and brought new insight in the experimental behavior of Synthetic Jets.