

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering**

Ing. Kazimierz Peszyński, CSc.

**Výzkum a vývoj fluidických členů řídicích soustav na příkladě řízené
osově symetrické trysky**

**Research and Development of Fluidic Components of Control Systems
Using as an Example an Axisymmetric Nozzle.**

SUMMARY

The presentation describes the history, current situation and trends in research and development of fluidic components and then concentrates on one particular case investigated in depth by the author (and by the team of co-workers he leads at the University of Technology and Agriculture in Bydgoszcz). This particular case is a controlled axisymmetric nozzle, a jet-type element of automated systems.

The first section of the presentation summarises and evaluates current state of the jet-type device technology in Poland as well as abroad. It describes the situation at the starting point of author's activities in this field. The presentation demonstrates a number of typical examples of utilisation of jet-type device technology in various industrial control tasks. The next part *Pneumatic and electric control systems* is intended mainly to express the author's ideas concerning the importance of fluidic elements and systems in contemporary control technology. In the following part *Fluidics* the author concisely describes the development of the jet-type device technology based on mutual interactions of fluid flows. There is a description of planar fluidic control elements, the modifications of which into three-dimensional spatial layouts was one of the important aspects of the author's work. The following part then contains the basic information about importance and capabilities of impinging jets and also information on the unusual devices with several stable states. Finally, in the part *Self-excited Oscillation* discusses the opportunities available for achieving oscillatory character of the impinging jet flows and the resultant increase of heat transfer.

In the second section the presentation demonstrates the controlled axisymmetric nozzle. The bistable behaviour of the Coanda effect may be used to control heat and mass transfer also for the stagnation flow cases. Theoretical analysis and experiment have lead to one variant of the axisymmetric nozzle for which it is possible to control its working characteristics in a simple manner.

A particular geometry of the nozzle was then selected which allows pneumatic control fulfilling the requested parameter values. It is an arrangement unique on the world-wide scale, which was published in a prestigious journal.

Numerical and experimental solution of an annular, fluidically controlled jet was performed in several subsequent steps. The design of the geometry of the axisymmetric nozzle based on an analogy with planar nozzles was found to be unsuitable, the nozzles did not exhibit the required bistable behaviour. Numerical flowfield simulation (using the software FLUENT) has lead to a better geometry, which was then investigated experimentally. The bistable behaviour was verified by flow visualization using the smoke wire method and by hot-wire anemometry.

On the basis of the numerical as well as experimental approach a better layout of the nozzle, position of the control nozzle, and of the spoiler, were finally found.

SOUHRN

Přednáška uvádí historii, současný stav a trendy výzkumu a vývoje fluidických členů a pak se soustřeďuje na jeden konkrétní případ autorem (a jím vedeným kolektivem pracovníků Technologicko přírodovědecké university v Bydgoszczi) do hloubky zkoumaným a vyvíjeným proudovým prvkem automatizovaného systému, jakým je řízená osově symetrická tryska.

První část přednášky obsahuje přehled a zhodnocení dosavadního stavu proudové techniky jak v Polsku, tak i v zahraničí. Ukazuje tak situaci, na níž autor ve své činnosti navázal. V této části je uvedena řada typických příkladů přímého využití proudové techniky v řízení různých pracovních úloh v průmyslové oblasti. Následuje část *Pneumatické a elektrické řídicí systémy*, ve které autor vyjadřuje své názory na význam a postavení tekutinových prvků a členů v současné řídicí technice. V části *Fluidika* je stručně popsán vývoj odvětví proudové techniky, která se zabývá řízením proudu založeném na vzájemných interakcích. Jsou popsány základní fluidické planární řídicí prvky, jejichž modifikací do prostorového provedení se autor ve své práci zabýval. Další část obsahuje základní informace o významu a možnostech využití impaktních proudů a také informace o impaktních prouděch s několika stabilními stavy. Posléze v části *Samobuzené oscilace* jsou diskutovány možnosti, jimiž lze dosáhnout oscilací impaktního proudění a zvýšení intenzity přestupu tepla.

Ve druhé části přednáška ukazuje řízenou osově symetrickou trysku. Bistabilní chování Coandova jevu lze využít k řízení přenosu tepla a hmoty i pro případy stagnačního proudění. Teoretickou analýzou a experimentem byla posouzena jedna z variant osově symetrické trysky tak, aby bylo možno jednoduchým způsobem řídit její pracovní charakteristiku.

Byla navržena tryska konkrétní geometrie s možností pneumatického řízení splňující požadované provozní parametry. Jedná se o světově unikátní uspořádání a funkce trysky byla publikována v prestižním odborném časopisu.

Numerické a experimentální řešení prstencového fluidicky řízeného proudu bylo provedeno v několika postupných krocích. Návrh geometrie osově symetrické trysky založené na analogii s tryskami planárními se ukázal jako nevhodný, trysky nevykazovaly zřetelně bistabilní chování. Numerickou simulací (provedená pomocí běžně dostupného programu FLUENT) byla nalezena vhodnější geometrie, která pak byla studována experimentálně. Bistabilní chování bylo ověřeno kouřovou vizualizací a potvrzeno anemometrem se žhaveným drátkem.

Na základě numerického a experimentálního přístupu bylo nalezeno výhodnější tvarování trysky, umístění řídicí trysky a spoileru.

Klíčová slova: osově symetrická tryska, impaktní proud, zatopený proud, fluidický člen, řízení, vizualizace, CFD, bistabilní zesilovač, monostabilní zesilovač, Coandův jev, samobuzené oscilace, stabilita proudu

Keywords: Axisymmetric nozzle, impinging jet, submerged jet, fluidic component, control, visualization, CFD, bistable amplifier, monostable amplifier, Coanda effect, self-excited oscillation, stability of a jet.

České vysoké učení technické v Praze

Název: Výzkum a vývoj fluidických členů řídicích soustav na příkladech řízené osově symetrické trysky

Autor: Ing. Kazimierz Peszyński, CSc.

Počet stran:

Náklad:

© Kazimierz Peszyński, 2009

ISBN

OBSAH

Summary	2
Souhrn	3
1. Úvod	5
2. Proudová technika – terminologie	6
3. Pneumatické řídicí systémy a jejich vztah k systémům elektrickým.....	8
4. Fluidika	10
5. Impaktní proudění	15
6. Samobuzené oscilace.....	17
7. Vývoj modulované trysky	20
7.1 Uspořádání trysky.....	20
7.2. Model pro laboratorní experimenty	21
7.3. Stabilita proudového pole vycházející z Navierových- Stokesových rovnic a z rovnice kontinuity.....	22
7.4. Vývoj tvarových detailů trysky	23
7.5. Matematická optimalizace vstupního kanálu osově symetrické trysky.....	25
8. Závěr	25
8.1. Překlápění proudu.....	25
8.2. Citlivost proudu na umístění řídicí trysky	26
8.3. Překlápěcí charakteristiky, překlápění proudu versus hysterezní efekty	27
8.4. Střední proudové pole	27
8.5. Prstencový impaktní proud – experiment s přenosem hmoty	28
9. Literatura	
9.1. Literatura k přednášce	29
9.2. Relevantní autorovy publikace	30
Author's CV	32

1. ÚVOD

Význačným rysem přednášky je aplikace moderní, a přitom mnohde málo známé **proudové techniky**. Jde o technická řešení, u nichž je působení klasických mechanických součástí nahrazeno silovými a dalšími účinky proudu tekutiny, vytvářeného výtokem z trysky. Tekutina je přitom v trysce obvykle urychlena a dosahuje se tak známých silových dynamických účinků, srovnatelných s tím, když na tekutinu působí mechanické součástky. Mechanické součástky ovšem mají četné nevýhody – např. jejich setrvačnost omezuje dosažitelný frekvenční rozsah, musí být uloženy a utěsněny, což přináší omezenou životnost vyběháním a opotřebením ložisek a těsnění. Všechny takové nevýhody u proudového uspořádání odpadají, a to přináší řadu významných výhod. Tekutinový proud také může působit i jinými než silovými účinky – může například výhodně zajistit chlazení, sušení povrchu nebo ohřívání.

2. PRODOVÁ TECHNIKA – TERMINOLOGIE

Je zajímavé, že čeština nemá ekvivalentní termín k výrazu „technika strumieniowa“, naprosto běžnému v polštině. Budeme tedy používat doslovný překlad „proudová technika“, jenž ovšem v českém jazyce není zcela běžný. Není to však jen jazykovědná otázka. Obor, jenž je takto nazýván a kterým se tato přednáška zabývá, se v českém prostředí nepociťuje jako obor jediný – spadá spíše do více technických odvětví, která se považují za samostatná, a proto nemají žádný souborný název. Na jedné straně je to obor hydraulických a pneumatických řídicích soustav, v nichž se vyskytují prvky bez pohyblivých částí. Ten je v češtině označován jako „fluidika“. Na druhé straně pak jde o aplikace tekutinových proudů, např. v sušárenské nebo klimatizační technice, pro který není souborný název vůbec zaveden.



Obr. 1.1. Technika zatopených tekutinových proudů (proudová technika) a její aplikace

Ani samotný termín „tekutinový proud“ pro proudové pole vytvořené výtokem tekutiny z trysky do prostoru, jenž je alespoň po jedné straně (ale běžně na všech stranách) volně otevřen do okolí – odpovídající například anglickému „jet“ nebo ruskému „struja“ – není v českém jazyce používán tak samozřejmě jako je tomu v autorově mateřštině. Je na jedné straně pravda, že anglickému „jet aeroplane“ odpovídá české „proudové letadlo“, ale v oboru mechaniky tekutin mnozí čeští pracovníci používají také termín „paprsek“ – snad pod vlivem německého ekvivalentního termínu „Strahl“.

V technických aplikacích je tekutinový proud používán již řadu století. Srhávání okolní tekutiny do proudu se využívá např. v proudových přístrojích, jako jsou ejektory nebo injektory, které pro napájení parních kotlů začal vyrábět Giffard již v r. 1858. Princip však patentoval ve Francii již d'Ectot v r. 1818 a v primitivním uspořádání jej popsali Vitrio a Philibert de Lorme dokonce již v r. 1570 (!).

Mimo oblast zájmu této přednášky jsou letecké proudové a raketové pohony a rakety, kde se rovněž generuje a využívá tekutinový proud. Tam také historie sahá nazpět přes několik století. Nicméně nelze přehlédnout, že z této oblasti přišla řada zásadních nových myšlenek. Autor práce se konkrétně zabývá proudovými ústrojími využívajícími Coandův efekt přilnutí tekutinového proudu ke stěně (viz obr. 4.3). Tento efekt objevil rumunský inženýr H. Coanda již r. 1911 v době, kdy se během svého pobytu ve Francii [Coanda, 1934] zabýval možností proudového pohonu letadel.

Také přímo v oboru řídicích systémů pracujících s tekutinami je tekutinový proud využíván značně dlouho. Pravděpodobně nejstarším uplatněním je myšlenka nahrazení šoupátkového rozvodu u hydraulického pístového pohonu rozvodem s výkyvnou tryskou. Takto uspořádané rozvody vyráběla německá firma Askania zejména pro uplatnění v hydraulickém servořízení letadel již od poloviny třicátých let minulého století. Systém byl vyráběn během druhé světové války v obrovských sériích pro tzv. automatické piloty německých letadel. Záměrem tohoto uspořádání bylo odstranění tření, které zejména v prvních stupních klasických šoupátkových rozvodů, kde se pracuje s nejmenšími přestavnými silami, způsobuje výraznou necitlivost a tím zhoršení přesnosti.

Moderní myšlenka fluidických řídicích jednotek bez pohyblivých částí sleduje spíše jiný cíl: zvětšení frekvenčního rozsahu tím, že odpadá setrvačnost pohyblivých částí. Také tato myšlenka má svého předchůdce ve využití proudové techniky při konstrukci strojů. Je to nápad, s nímž přišel v padesátých letech geniální český konstruktér Václav Svatý, který takto odstranil klasický člunek pro zanášení útku při tkaní látek v tkalcovském stavu. Dodatečně se sice ukázalo, že stejnou myšlenku bezčlunkového stavu si nechal patentovat již v r. 1922 Američan Ballou, nicméně nikdo nepopírá,

že teprve V. Svatý dokázal myšlenku zpracovat do podoby prakticky použitelného tkacího stroje.

3. PNEUMATICKÉ ŘÍDICÍ SYSTÉMY A JEJICH VZTAH K SYSTÉMŮM ELEKTRICKÝM

Svou náplní patří téma této přednášky do oboru hydraulických a pneumatických členů soustav automatického řízení. Tyto členy jsou někdy v českém jazyce označovány jako tekutinové členy.

Nelze nevidět, že hydraulické a pneumatické akční členy v konstrukcích strojů a výrobních linek jsou dnes vytlačovány elektrickými. Mohlo by se tedy zdát, že téma této přednášky je snad poněkud zastaralé. Použití pneumatických členů a prvků má však své opodstatnění a to se s vývojem elektrických systémů nemění. Hydraulické a pneumatické pohony si i v rostoucí konkurenci elektrických pohonů stále udržují své místo při uplatnění ve strojních zařízeních jednak díky svým dominantním charakteristickým vlastnostem a také díky stále intenzivnějšímu využívání mechatroniky, která integruje elektrické systémy s dalšími – mechanickými, ale velmi často i tekutinovými. Lze tedy hovořit o vývoji, který využívá dobré vlastnosti obou typů mechanismů. Opodstatnění tekutinových prvků je běžné zejména v koncových, akčních členech, kde jejich výhoda spočívá v nižší ceně, v jednoduchosti jejich praktické aplikace a ovládání a v nenáročnosti na údržbu. Významnou výhodou je využití pneumatických členů např. v prostředí s nebezpečím výbuchu, kde u pneumatického řešení díky menší objemové koncentraci energie naprosto odpadá možnost vzniku jisker. Náhrada elektrickými systémy s vícenásobným krytím je v takových aplikacích mnohem složitější a také nákladnější.

I když je dnes zřejmý trend stále častějšího používání elektrických akčních členů než v nedávné minulosti, což je způsobeno neustále se snižujícími cenami elektrických prvků, hydraulické a pneumatické prvky a členy jsou a i nadále budou využívány hlavně pro jejich jednoduchost, nízké pořizovací náklady a snadnou údržbu. Uplatňují se především jako akční členy ve výstupní části řídicího systému, kdy je informace již zpracována a na jejím podkladě má být proveden akční zásah. Pneumatické prvky jsou v takovém uplatnění cenově nenahraditelné a to zejména tam, kde zásah má charakter jednoduchých dvoustavových pohybů, neboť tam se pneumatické elementy ve srovnání s elektrickými vyznačují vyšším výkonem vzhledem ke své menší hmotnosti či menší velikosti.

Tekutinové mechanismy se především uplatňují při realizaci přímočarých pohybů a regulovaných pohonů – servomechanismů s možností regulovat polohu, rychlost, popř. sílu. Silnými stránkami jsou také zatížitelnost pohonů a rozmanitost konstrukčních provedení a možnost jejich zástavby do konstrukce výrobního zařízení.

Jako typický konkrétní příklad lze vzít třeba provedení brzd u automobilů — tedy v oboru, kde je obrovská konkurence a tlak na vysokou efektivitu. Prakticky všechny automobily mají dnes brzdovou soustavu hydraulickou. I když si lze představit elektrické brzdění, nepoužívá se, tekutinové členy jsou výhodnější.

Zatím velmi málo využívanou možností pro řadu aplikace (i když ovšem zdaleka ne všechny) jsou výkonové akční členy fluidické, tedy bez pohyblivých součástí, využívající dynamické účinky tekutinových proudů. Mají výhodu v obzvláštní jednoduchosti, odolnosti a spolehlivosti. Mnohdy je lze zhotovovat jako jedinou součástku, dokonce i vůbec jako odlitek bez třískového obrábění.

Přední výrobci hydraulických a pneumatických prvků dnes nabízejí průmyslové číslicové řídicí systémy integrované, popřípadě integrovatelné do hierarchických řídicích systémů strojů. Tento trend ve směru mechatronických bloků vedl nedávno například pracovníky firmy Festo — jednoho z předních světových výrobců pneumatických systémů pro automatické řízení — k poněkud nadsazenému bonmotu, že "pneumatika bez elektroniky už téměř neexistuje". Pneumatické systémy jsou dnes vybaveny aplikačním softwarem se snadno použitelnými algoritmy pro zpětnovazební řízení, řízení v otevřeném obvodu a také pro uvádění do provozu a parametrizaci regulátorů. Díky tomu se hydraulické a pneumatické systémy neliší po stránce zpracování signálů od systémů elektrických, jejich programování pro projektanty nepředstavuje zásadně odlišné řešení.

Na druhé straně je pro návrh a optimalizaci pneumatické části systému nezbytné, aby absolventi škol ve směrech, jež lze souhrnně nazvat jako řídicí technika, měli potřebné znalosti z mechaniky tekutin a jejího praktického využití. V tomto směru se snaží autor ve své pedagogické činnosti působit. Zvláště aktuální výzvou v oboru řídicí techniky je zvyšování energetické účinnosti, zejména u akčních členů a zejména pod tlakem požadavků na zachování životního prostředí.

Při využívání stlačeného vzduchu lze dosáhnout úspor dokonalejším konstrukčním návrhem např. ventilů a trysek — a to nejen trysek ve vlastních řídicích prvcích, ale i například ofukovacích (čisticích) nebo chladicích trysek, jejichž návrh byl dosud často považován za podružný a nebyla mu věnována větší pozornost.

Energetická náročnost v oblasti tekutinových a zejména koncových akčních členů je také určena nezbytnými přeměnami energie. Nejdříve se energie, zpravidla elektrická — u vozidel a mobilních strojů energie dodaná vznětovým motorem — přemění na tlakovou potenciální energii kapaliny, která je přes vedení (potrubí) a řídicí obvody přiváděna ke spotřebiči, kde se přemění zpět na mechanickou energii a teprve tam pak vykoná požadovanou práci. První ztráty vznikají v hydraulických agregátech při dodávání tlakové energie do hydraulického obvodu, další přenosem energie

a při řízení samotného akčního členu řídicími ventily. Proto se energetická náročnost řeší již při jejich projektování, výzkumu a vývoji.

Základním nezvratným směrem vývoje pneumatických mechanismů je zahrnutí integrace elektroniky. Souvisí to i s tlaky na zlepšování životního prostředí, vyžadující dokonalejší a energeticky méně náročný provoz. S tímto směrem bezprostředního lokálního elektronického řízení, vedoucím k „inteligentním“ akčním členům, souvisí i adaptabilita: zatímco dříve se vystačilo s jedním provedením výtoku tryskou, ohledy na to, aby funkce trysky mohla být elektronickým systémem řízena, si vyžadují proměnné provedení, buď s alternativními provedeními výtoku, nebo s vůbec spojitou proměnností.

4. FLUIDIKA

Termínem fluidika (anglicky "fluidics") je označován způsob řízení proudů, založený na jejich vzájemných interakcích, bez působení pohyblivých částí. Obor fluidiky je vyvíjen v posledních čtyřiceti letech, významné úsilí mu bylo věnováno na Českém vysokém učení technickém v Praze na počátku sedmdesátých let minulého století, a to zejména zásluhou prof. Milana Baldy, který patřil i ve světovém měřítku k význačným průkopníkům v tomto oboru. Fluidické zesilovače jako základní stavební kameny řídicích systémů byly mj. též sériově vyráběny v Polsku [Olszewski, Kaczanowski, Wański, 1970].

Problém, na který fluidika narazila, a to i ve snahách o její praktické uplatnění v tehdejší Československu, bylo zaměření na přenos a zpracování signálů prostřednictvím proudící tekutiny. V té době se o ní hovořilo i jako o konkurenci elektronice v oboru zpracování informací. Na rozdíl od mnohem starších klasických hydraulických a pneumatických systémů (které se dnes rovněž zahrnují do obecně pojatého pojmu fluidika, popřípadě se o nich hovoří jako o mechano-fluidických systémech) se tedy obejde bez účasti mechanických pohyblivých součástek (jako jsou třeba písky nebo rozváděcí šoupátka), které nejenže jsou nejčastější příčinou poruch, ale hlavně limitují dosažitelný frekvenční rozsah. Tím, že v prvcích bez pohyblivých součástek toto omezení odpadlo, jevílo se uvedené původní zaměření jako reálné.

Fluidika v něm neuspěla ze dvou důvodů. V první řadě se ukázala jako pomalá. Limitem pro rychlost přenosu a zpracování signálů je rychlost zvuku, nesrovnatelně nižší než rychlost šíření světla, která představuje obdobnou mez v elektronice. Moderní mikroelektronice nemohla také původní fluidika konkurovat svými velkými rozměry. Kvalitativní posun v tomto směru umožnilo až využití výrobních technologií, které přinesla technika zhotovování mikroelektronických integrovaných obvodů. Současně se ukázalo, že existuje celá řada aplikací, v nichž je proudění tekutin nezbytné – ovšem pro jiný účel než zpracování signálů a informací.

Do jisté míry fluidika přetrvala dodnes, ale většinou jde o jednoduché obvody ve výjimečných aplikacích kladoucích extrémní nároky. Byly třeba demonstrovány fluidické obvody z keramického materiálu, fungující při rozžhavení do bílého žáru, a jiné provádějící jednoduchou regulaci hladiny roztaveného kovu, přičemž jako pracovní tekutina v řídicích obvodech sloužil tekutý zpracovávaný kov.

V současné době význam fluidiky opět vystupuje do popředí, a to především ve dvou oblastech:

- MEMS (Microelectronic Mechanical Systems) – mikroelektronické mechanické soustavy – např. mikrofluidické ventily,
- Výkonová fluidika, zejména v letectví k ovládání vektoru tahu proudového či raketového motoru – např. pro stíhací a bitevní letouny vysokých výkonností.

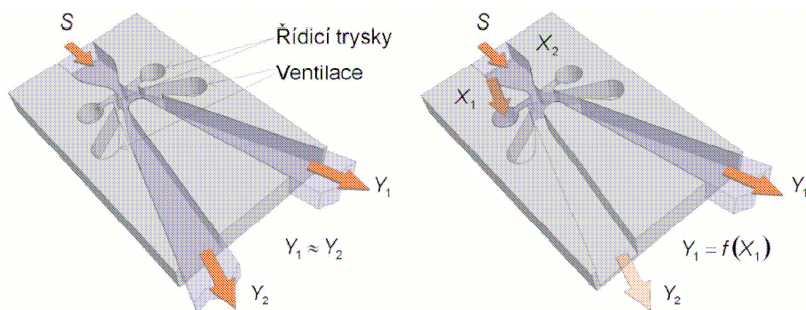
Aplikace proudové techniky ve fluidice je založena na myšlence využití dynamických účinků tekutinového proudu. Základní úlohou je řízení mnohem většího hlavního toku tekutiny slabším řídicím tokem. Dynamickým silovým účinkem je tekutina vedena do žádoucího výstupu – a mívá nežádoucí výstupní vývod – aniž by nastavení žádoucího směru proudu bylo realizováno pohyblivými elementy, jako je tomu u dříve běžných rozváděcích ventilů. Zatímco setrvačnost pohyblivých částí v mechanicky představovaných ventilech zpravidla neumožňuje pracovat s frekvencemi vyššími než 10 až 20 Hz (záleží na hmotnosti součástky a velikosti přestavných sil, které na ni působí), čistě fluidické rozváděcí ventily mohou běžně pracovat s frekvencemi řádu kilohertzů, ve speciálních provedeních až desítek kilohertzů. Protože tyto výzkumy probíhaly v době, kdy polovodičová elektronika ještě nebyla běžná v běžných aplikacích řídicí techniky, jevila se fluidika jako perspektivní alternativa, schopná konkurovat elektronice.

Tento směr byl propracován do prakticky použitelné realizace zejména v armádní laboratoři Harry Diamond Ordnance Fuze Laboratory v USA na počátku šedesátých let minulého století, samozřejmě se záměrem uplatnit jej ve vojenských aplikacích. To vedlo k určitému utajování, jímž byla historie fluidiky výrazně poznamenána. Přispěly k tomu obzvláště výhodné vlastnosti fluidických prvků schopných funkce v nepříznivém prostředí. Fluidický proudový zesilovač je např. schopen pracovat v prostředí s vysokou intenzitou jaderné radiace, kdy polovodičové elektronické součástky přestávají fungovat. Zatímco první germaniové diody a tranzistory byly vysoce citlivé na teplotu – zisk zesilovačů s germaniovými tranzistory klesal k nule již při teplotách přes 60 °C – firma Kearfott demonstrovala fluidický řídicí systém, který fungoval i při rozžhavení do bílého žáru. Také odolnost proti vibracím a vnějšímu zrychlení byly velmi žádané vlastnosti ve vojenských zařízeních.

Základem zesilovacího efektu je vyvodit v interakční dutině fluidického prvku proudění, jež je velmi citlivé na různé podněty. Přivedený řídicí tok je vhodným podnětem, jenž má velký vliv na charakter hlavního proudu. Jedním z takových mechanismů, s jehož využitím ve fluidice přišel P. Auger, je turbulizační efekt u laminárního proudu s Reynoldsovým číslem výtoku z trysky nastaveným tak, že se pohybuje těsně pod hodnotami, při nichž dochází k samovolnému přechodu laminárního proudění do turbulence. Se zesilovači tohoto druhu autor předkládané práce pracoval (viz literaturu: Peszyński 1977, Peszyński 1978, Peszyński, Kamiński, Golik 1979, Peszyński 1997).

Ve fluidice se však výrazněji uplatnily také jiné mechanismy řízení. Významný je např. vírový princip, který se stále významně uplatňuje zejména ve výkonové fluidice (např. [Tippets, 1974]), což ale nebylo předmětem zájmu autora této práce. Významnější je princip vychylování hlavního proudu slabším bočním řídicím proudem – viz obr. 1.2. Vhodným nastavením geometrických poměrů lze dosáhnout vysoké citlivosti, kdy až o řád slabší řídicí proud dokáže vyvolat potřebnou výchylku hlavního proudu řádu několika úhlových stupňů.

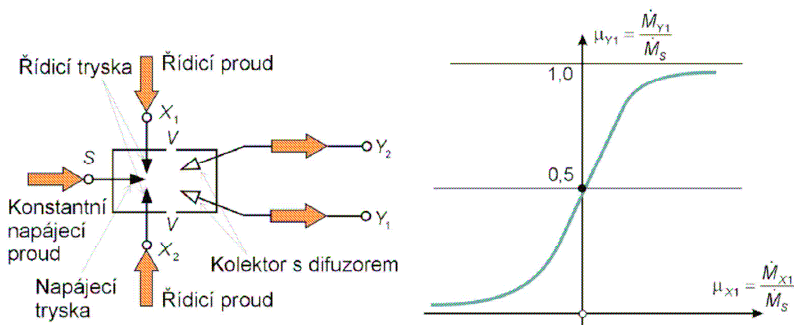
Typické uspořádání fluidického proudového zesilovače založeného na vychylovacím principu spočívá v tom, že proti hlavní trysce jsou umístěny vedle sebe ústí dvou kolektorů napojených na vývody zesilovače. Dojde-li k výchylce hlavního proudu, je zřejmé, že se změní vzájemný poměr průtoků v těchto vývodech. Aby se zabránilo přilnutí proudu, interakční dutina musí mít stěny vzdáleny od dráhy tekutinových proudů a zpravidla je odvětrána prostřednictvím ventilačních otvorů, které jsou u pneumatického provedení (pracujícího se vzduchem) vyvedeny do atmosféry.



Obr. 4.1. Příklad planárního provedení typického fluidického zesilovače proudového typu s proporcionální funkcí

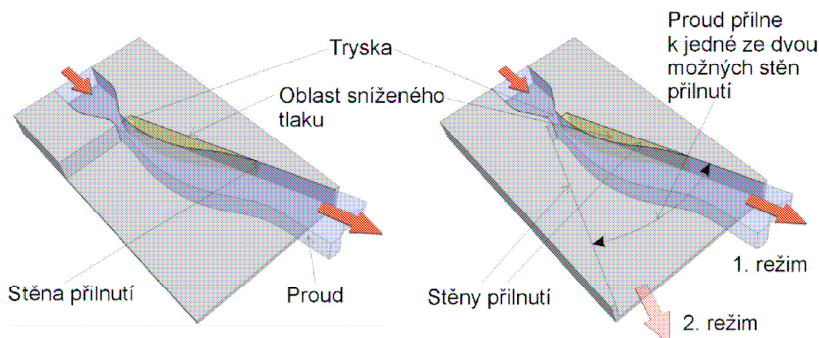
Při prvních pokusech s těmito zesilovači, prováděných v Harry Diamond Ordnance Fuze Laboratory, bylo použito uspořádání odpovídající obr. 4.1. Bylo neočekávané, že při zmenšování řídicího průtoku se hlavní

proud nevracel do výchozí polohy. Muselo být použito dvou řídicích trysek umístěných proti sobě (jak patrně na obr. 4.1). Je totiž velmi nesnadné dosáhnout spojitého přechodu hlavního toku z jednoho stavu do druhého dle charakteristiky na obr. 4.2, jako je tomu u proporcionálního zesilovače. Připojením druhé řídicí trysky tohoto záměru sice rovněž nedosáhneme, ale je alespoň zabezpečen spolehlivý zpětný přechod.



Obr. 4.2. Schéma a průběh převodní charakteristiky planárního provedení typického fluidického zesilovače proudového typu s proporcionální funkcí, jaký je na obr. 1.3

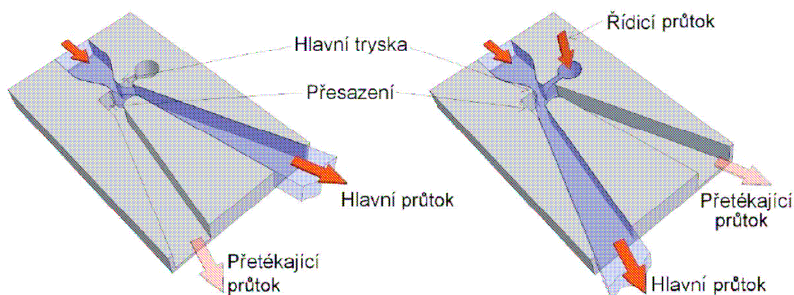
Tento zajímavý jev se záhy podařilo vysvětlit působením Coandova efektu, jak jej ukazuje obr. 4.3. Jde o přilnutí tekutinového proudu po opuštění trysky ke stěně, pokud se taková stěna nachází v blízkosti dráhy proudu. Na jevu není nic mimořádného. Jde o účinek nasávání okolní tekutiny do proudu – tedy shodný mechanismus, jaký je základním principem například již výše zmíněných injektorů a ejektorů. Pokud je blízkou stěnou takové nasávání omezeno, dochází mezi proudem a stěnou ke vzniku podtlaku. Tlakovým rozdílem působícím napříč proudem je proud ohnut a držen u stěny.



Obr. 4.3. Coandův jev přilnutí proudu ke stěně (vlevo) a bistabilní vychýlení proudu se dvěma různými režimy proudění (vpravo), jež nastane v případě, že po stranách dráhy proudu jsou proti sobě umístěny dvě stěny přilnutí

Jev je možné potlačit tím, že po stranách dráhy proudu v přímých stěnách jsou umístěna vybrání, jak je ukazuje obr. 4.1, která jsou propojena ventilačními otvory s nějakým velkokapacitním zásobníkem tekutiny (u vzduchu obvykle s atmosférou).

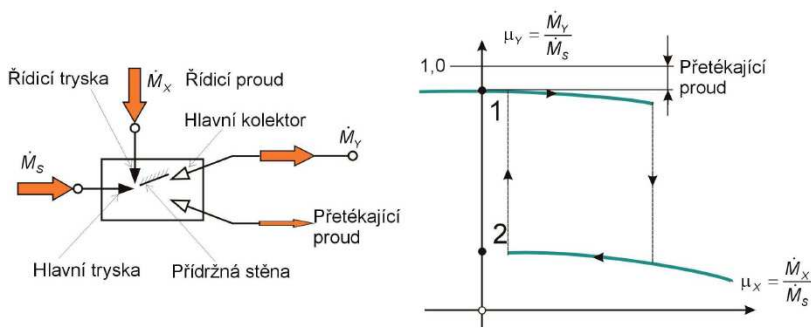
Vznik podtlaku se tím zruší, neboť proud si může tekutinu v potřebném množství přisávat z těchto otvorů. Ventilační otvory také zjednodušují návrh obvodů s fluidickými zesilovači, neboť zmenšují závislost chování zesilovače na připojené zátěži.



Obr. 4.4. Příklad rovinného provedení monostabilního fluidického zesilovače

Bistabilní fluidické zesilovače také našly uplatnění. Na konci šedesátých let minulého století byla rozšířena domněnka, že fluidika by mohla konkurovat elektronickým systémům na zpracování informací. Proto se jevila výhodnou okolnost, že bistabilní zesilovač má funkci prvku digitální paměti, která si dokáže zapamatovat stav logické jedničky nebo logické nuly.

Bylo by vhodné ještě uvést méně častý princip fluidického monostabilního zesilovače, podle obr. 4.4., který má stěnu přilnutí pouze po jedné straně.



Obr. 4.5. Schéma uspořádání a průběh převodní charakteristiky monostabilního fluidického zesilovače

Později se ovšem ukázalo, že původně očekávaná konkurence elektronice byla pouze iluzí. Důvodem je několik faktorů. V prvé řadě je to relativní pomalost fluidických obvodů. Zatímco v elektronickém systému se signál šíří prakticky rychlostí světla, v systému fluidickém je rychlost šíření signálu rovna rychlosti zvuku, která je o mnoho řádů nižší. Druhým faktorem je snadná miniaturizace elektronických prvků a relativní snadná tvorba složitých integrovaných obvodů s nepatrnými rozměry.

Principiálně není zásadní fyzikální překážka v aplikaci fluidických systémů, avšak jejich realizace je doprovázena někdy řadou praktických potíží. Je patrně celkem snadné aplikovat principy fluidických zesilovačů v prvcích o velkých rozměrech, které vedly k vývoji oboru výkonové fluidiky. Tento obor se prosadil a nachází trvalá uplatnění. Není to však nějaké panaceum, které by snad mohlo vést k úplnému vytlačení klasických ventilů s pohyblivými díly.

Fluidické členy se mohou s výhodou uplatnit zejména tam, kde jde o řízení průtoku plynů o vysoké teplotě, kde je podstatným kritériem nízká hmotnost systému nebo kde jsou mimořádné nároky na spolehlivost a životnost či rychlost překlápěcí funkce. Na druhé straně je ovšem nevýhodou nutnost urychlení tekutiny v hlavní trysce. Při zpětné přeměně kinetické energie v difuzorech dochází k hydraulickým ztrátám, které byly obecně hlavním nedostatkem výkonové fluidiky, zejména před zavedením moderního počítačového softwaru nezbytného pro optimální návrh geometrie pracovních dutin.

5. IMPAKTNÍ PROUDĚNÍ

Přenos tepla mezi tekutinou a stěnou účinkem impaktního proudu, tj. proudu tekutiny dopadajícího na povrch stěny, je typický případ nucené konvekce, viz např. Incropera, DeWitt, 1996. Tato problematika byla předmětem bádání především v posledních čtyřech desítkách let. Nejvýznamnější práce jsou shrnuty v monografiích [Dyban, Mazur, 1982]; [Martin, 1997].

Problematika nucené konvekce je aktuální v průmyslových zařízeních, která jsou zaměřena na zvyšování přestupu tepla a přenosu hmoty. Jedná se např. o chlazení vysoce tepelně namáhaných součástek, jako jsou válce válcovacích stolic pro výrobu ocelových plechů, lopatky plynových turbín apod.

Tři hlavní výhody impaktních proudů, a tedy i důvody k jejich velkému rozšíření, jsou:

- (1) možnost dosahovat vysoké intenzity transportních procesů na obtékané stěně,
- (2) dobrá přizpůsobivost geometrie a dobrá lokalizace oblasti s intenzivním přestupem tepla a přenosem hmoty,
- (3) poměrně jednoduché a relativně levné použití.

Studium impaktních proudů i vývoj jejich aplikací logicky vychází od nejjednodušších geometrických tvarů, jakými jsou kruhová a šterbinová tryska ([Dyban, Mazur, 1982], [Martin, 1997]). Další intenzifikace procesu může být prováděna účelným tvarováním geometrie trysek, (pasivní řízení proudového pole): trysky prstencové, eliptické, čtvercové, obdélníkové, trojúhelníkové či speciálně tvarované trysky ve tvaru hvězdice (rozety) – Huber, Viskanta, 1994. Jiným příkladem speciálního tvarování jsou např. prstencové trysky s axiálně-radiálním výtokem. Jedním z velice perspektivních případů aktivního řízení impaktního proudu je prstencová tryska s fluidickým překlápěním, která je předmětem této práce.

V historickém přehledu je účelné pojednat o uplatnění ohřívacího a sušícího efektu vzduchových proudů (obvykle s ohřátým vzduchem) v impaktních sušárnách, používaných zejména v textilním a papírenském průmyslu. Jde o poměrně starý nápad; neboť sušárny založené na principu impaktního proudu byly známy a běžně vyráběny již v devadesátých letech 19. století. V rámci využití přenosu tepla a hmoty má princip impaktního proudu významné postavení proto, že umožňuje maximálně intenzifikovat přenosové jevy.

Běžná uspořádání slouží pro sušení plochých objektů, které mívají zpravidla tvar tenkého plochého pásu (papír, textilie). Sušárna mívá tvar tunelu a pás prochází sušárnou obvykle vodorovně podél dna tunelu. Ve stropě bývají uspořádány trysky napojené na zdroj sušícího vzduchu, většinou ohřátého na teplotu vyšší, než je teplota okolí. Proud vzduchu vytékající z trysek dopadá na povrch pásu. Existují provedení se šterbinovou tryskou, obvykle s delším rozměrem ústí pokrývajícím celou šířku stropu tunelu sušárny nebo provedení s tryskami osově souměrnými, zpravidla s jednoduchým kruhovým tvarem ústí, přičemž větší počet trysek v řadě vedle sebe je umístěn ve směru šířky stropu tunelu napříč ke směru pohybu pásu sušeného polotovaru. Běžné je, že takových šterbinových trysek nebo řad kruhových trysek je několik za sebou ve směru pohybu pásu, přičemž teplota nebo jiné parametry sušícího vzduchu jsou u jednotlivých řad buď stejné nebo různé, vhodně odstupňované v souladu s předpokládaným průběhem procesu sušení. Nemusí jít pouze o sušení: prakticky velmi podobná tunelová uspořádání jsou používána při kontinuálním ohřevu nebo naopak chlazení procházejícího polotovaru.

Impaktní proudění dosahuje vysokých hodnot intenzity přestupu tepla proto, že tekutinový proud, směřovaný obvykle kolmo k povrchu, je schopen dosáhnout do velmi malých vzdáleností ke stěně a zmenšuje tak dráhu, přes kterou se transportovaná veličina musí přepravit kondukcí.

Základním problémem v inženýrských úlohách přestupu tepla nebo hmoty mezi tekutinou a obtékaným povrchem je přítomnost tenké tekutinové vrstvy těsně u stěny, která má prakticky stagnační charakter: je držena u povrchu účinkem viskosity a transportovaná veličina je přes ni

přenášena málo efektivním konduktivním mechanismem. Ten je tak málo účinný, především u plynů, že i když tato vrstva je velmi tenká – často má tloušťku řádu pouhých setin milimetru – představuje hlavní složku tepelného odporu. Konvekce, zejména turbulentní, jež převládá ve vrstvách více vzdálených od povrchu, přenáší teplo anebo jinou transportovanou veličinu tak intenzivně, že odpovídající hodnota efektivního odporu je mnohdy téměř zanedbatelná.

6. SAMOBUZENÉ OSCILACE

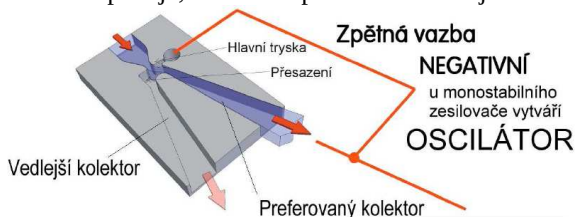
Impaktní proudění se vyznačuje tím, že umožňuje dosáhnout nevyšších možných hodnot intenzity přestupu tepla mezi tekutinou a pevnou stěnou. U speciální trysky jako výstupního členu řídicího systému, určeného pro vyvození impaktního proudění, je též namístě zabývat se otázkou, jaká je ještě možnost dalšího, ještě většího zvýšení intenzity působení na povrch těles. Ukazuje se, že limitním faktorem je tenká, prakticky nehybná vrstva tekutiny (v diskutovaném případě vzduchu), která je držena těsně u povrchu tělesa v důsledku viskozity. Přes ni se musí předávané teplo dostat konduktivním mechanismem – vedením tepla. To je u vzduchu zhruba o tři desítkové řády méně intenzivní než tepelná konvekce. Jeví se nasnadě zaměřit usilování o zvýšení intenzity na tom, jak onu téměř nehybnou vrstvu rozrušit nebo dokonce odstranit. Zdá se, že jednou ze slibných cest k tomu je vyvolat v dopadajícím tekutinovém proudu pulsace. Tato možnost byla již v literatuře popsána a některé výsledky jsou poměrně slibné. Bylo zkoušeno impaktní proudění s periodicky modulovaným výtokem, což se většinou dosahovalo mechanickými pulsátory zařazenými do přívodu pracovní tekutiny. Dosažený zisk ve zvýšené intenzitě přestupu se však jevil jako těžce vykoupený cenou a provozními náklady (pohon elektromotorem) mechanického pulsátoru.

Využití fluidiky, tedy pulsací vyvolaných bez použití pohyblivých součástí a bez nutnosti dodávání pomocné elektrické energie, se jeví jako mimořádně zajímavé. V zásadě se nabízejí řešení s fluidickým zesilovačem doplněným zpětnou vazbou tak, že je vytvořen oscilátor, v němž dochází k samobuzeným oscilacím. Protože vyvíjená modulovaná anulární tryska má v principu vlastnosti fluidického zesilovače, byl v rámci kapacitních možností – nevelkých jak pokud jde o finanční prostředky, tak i o časovou kapacitu – doplněn výzkumný program i o studium této možnosti. Jde přitom o zajímavý problém z hlediska techniky řízení a regulace, neboť musí být zavedena zpětná vazba.

Pojem zpětné vazby je jeden z nejdůležitějších pojmů řídicí a regulační techniky. Na jedné straně lze zpětnou vazbou zvětšit citlivost zesilovače nebo zpřesnit regulaci soustavy a zrychlit její odezvu na vstupní

signál, ale na druhé straně může jejím vlivem dojít k destabilizaci a vzniku samobuzených kmitání, což bylo právě využito v popisovaném případě.

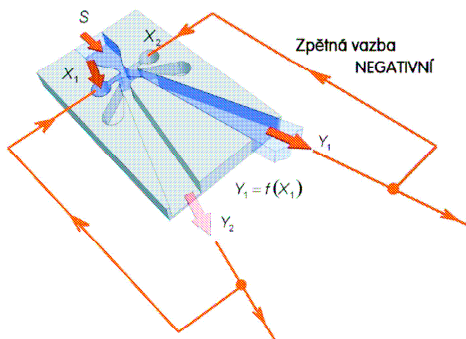
Takováto negativní zpětná vazba však právě vyvolá požadované samobuzené oscilace, je-li zavedena v monostabilním zesilovači, provedeným např. jako na obr. 4.4. Takovéto uspořádání zpětné vazby může být provedeno např. podle obr. 6.1. Předpokládá se, že zpětná vazba je natolik silná, aby vychýlila hlavní proud z preferovaného kolektoru a vedla jej do kolektoru vedlejšího. V tom okamžiku se ovšem přeruší průtok tekutiny i do zpětnovazebního kanálku. Účinek zpětné vazby zanikne a hlavní proud se navrátí zpět to preferovaného kolektoru. Tím nastane původní výchozí stav a celý děj se znovu opakuje, dochází k periodickému ději.



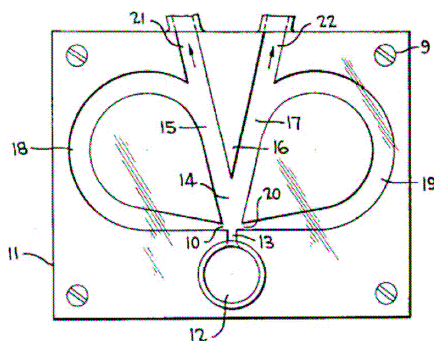
Obr. 6.1. Schéma oscilátoru vytvořeného z monostabilního zesilovače podle obr. 4.4. zavedením negativní zpětné vazby.

Zavede-li se negativní zpětná vazba u bistabilního fluidického zesilovače, k oscilacím nedojde, neboť hlavní proud přilne k protilehlé přídržné stěně a zůstane u ní ve vychýleném stavu.

V takovém případě je nutné pro vyvození trvalých oscilací uspořádat ještě jednu negativní zpětnou vazbu stejného druhu na protilehlé straně bistabilního zesilovače, jak je znázorněno na obr. 6.2. Tato druhá zpětná vazba zajistí návrat vychýleného proudu do výchozí polohy a umožní tak opakování celého děje.



Obr. 6.2. Schéma oscilátoru vytvořeného zavedením dvou negativních zpětných vazeb u symetrického zesilovače – zde je naznačeno použití proporcionálního provedení podle obr. 1.3., ale zcela běžné jsou takovéto oscilátory spíše s bistabilním zesilovačem provedeným podle obr. 1.6.

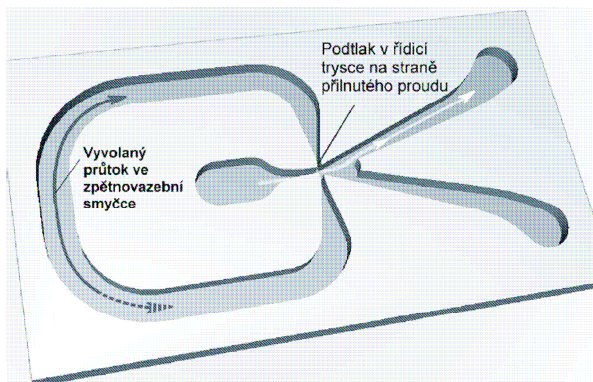


Obr. 6.3. Jako historická zajímavost je zde obrázek oscilátoru z původního Warrenova patentového spisu z r. 1962. Opět jde o zavedení dvou negativních zpětných vazeb, a sice u bistabilního zesilovače. Pozoruhodná je jiná věc: aby zpětná vazba fungovala, musí v ní být zajištěno fázové posunutí přeneseného signálu. Zde však žádné fázovací členy ve zpětných vazbách nejsou.

Bistabilní fluidický zesilovač proudového typu se dvěma postranními zpětnovazebními kanálky je jedním z velmi starých fluidických ústrojí, jak dokládá ukázka z patentového spisu jednoho z otců moderní fluidiky, R. W. Warrena na obr. 6.3. Z hlediska teorie zpětné vazby je tento obrázek zajímavý tím, že by takový oscilátor vlastně na první pohled ani neměl fungovat. Zpětná vazba by neměla být tvořena pouhým kanálkem, jako je tomu zde u tohoto nejstaršího provedení, ale její funkce vyžaduje (alespoň v klasické lineární či linearizované teorii bez uvažování víceméně podružných vlivů), aby ve zpětnovazebním vedení došlo k fázovému zpoždění. K tomu účelu se skutečně do cesty zpětné vazby zapojují fluidické členy, jako je například RC člen s fluidickým rezistorem (odporem) a akumulací komůrkou (analogie kondenzátoru) – popřípadě člen s inertancí, jež je analogií elektrické indukčnosti) – ale je to nezbytné jen tam, kde se má dosáhnout velmi nízké opakovací frekvence generovaných oscilací. Jak dokládá právě obr. 6.3., k dostatečnému zpožďovacímu efektu může postačovat inherentní zpoždění, k němuž dochází při průtoku tekutiny jednoduchým kanálkem. Ten totiž na rozdíl od elektrického propojení dvou elektronických součástek vodičem způsobuje několik efektů, jež jsou v prvním přiblížení zanedbávány. Je zde v prvé řadě dopravní zpoždění, dané konečnou rychlostí šíření tlakových změn v kanálkách. Dále se uplatní nezanedbatelná inertance i tak poměrně krátkých kanálků, jak je ukazuje obr. 6.3.

Na závěr je vhodné se zde zmínit o jednom ze zvláštních případů fluidických zpětných vazeb, který je uveden na obr. 6.4. I ten se může zdát celkem nelogický – namísto zpětnovazebních smyček propojujících, jak již jejich název říká, výstup se vstupem, jsou zde spolu propojeny dva řídicí vstupy. Význam tohoto uspořádání pro práci autora je v tom, že právě takto

byl vytvořen oscilátor s vyvíjenou anulární tryskou s modulovaným impaktním prouděním. Na rozdíl od klasických fluidických zesilovačů takováto tryska nemá výstupní kanálky, k nimž by bylo možné klasickou zpětnou vazbu vůbec připojit.



Obr. 6.4. Velký význam pro oscilátor vyvinutý v rámci předkládané práce má hodně speciální Spyropoulosova zpětná vazba - s jediným kanálkem propojujícím obě řídicí trysky. V diskutovaném případě anulární bistabilní trysky pro impaktní proudění nejsou totiž k dispozici výstupní vývody pro napojení zpětných vazeb.

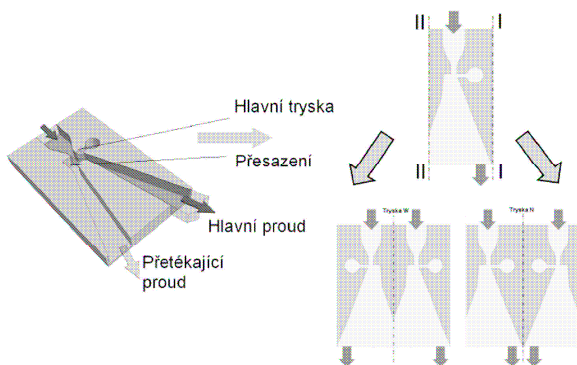
Zpětnovazební efekt u uspořádání podle obr. 6.4. dosahuje právě v důsledku Coandova jevu přilnutí proudu ke stěně – proto je toto provedení v obvyklé fluidice používáno jen ve spojitosti s bistabilními fluidickými zesilovači (ostatně monostabilní ani dva vstupní přívody – viz např. obr. 6.1. – ani vůbec nemusí mít. Ve stavu naznačeném na obr. 6.4., kde je světlou čarou zakreslena dráha proudu vytékajícího z hlavní trysky, je proud držen pod tlakem u stěny ve vychýleném směru a tento podtlak se nevyhnutelně projeví i v horní řídicí trysce. Naproti tomu u spodní řídicí trysky tento efekt chybí, tlak je tam vyšší. Tento tlakový rozdíl vyvolá proudění ve zpětnovazební smyčce od spodní trysky (vyšší tlak) k trysce horní (nižší tlak). Tento průtok nabude intenzity postačující k překlopení hlavního proudu ke spodní přídržné stěně a tedy i ke spodní řídicí trysce. Po tomto překlopení se ovšem tlakové poměry obrátí. Vyšší tlak v horní řídicí trysce než ve spodní řídicí trysce způsobí opačný směr průtoku ve zpětnovazebním kanálku. Ten nakonec vyvolá překlopení proudu nazpět a tento děj se pak periodicky opakuje.

7. VÝVOJ MODULOVANÉ TRYSKY

7.1 Uspořádání trysky

V zásadě je využit poměrně málo známý princip monostabilního fluidického zesilovače uvedený na obr. 4.4. Nicméně prostá aplikace geometrie monostabilního zesilovače by v tomto případě vedla jen k tomu,

že by proud horkého vzduchu vytékal v jednom nebo druhém směru a nedosáhlo by se tak potřebné změny průřezu proudu. Osově symetrické uspořádání vyžaduje proto modifikaci. Rovinnou konfiguraci dle obr. 4.4. bylo nutné nahradit osově symetrickým uspořádáním podle obr. 7.1.



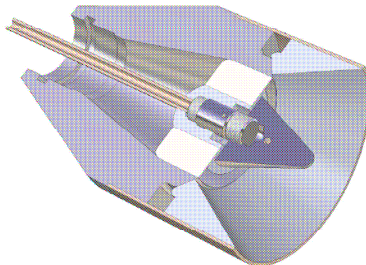
Obr. 7.1. Schématický obrázek využití planární geometrie monostabilního zesilovače v osově souměrné trysce, v principu vytvořené rotací kolem excentricky umístěné osy rotační symetrie.

Podle obrázku 7.1. je možné rotací profilu získat dva typy osově symetrické trysky. Pokud se profil monostabilního zesilovače otáčí kolem osy I–I, vznikne tryska N (ang. Narrow) s přívodem řídicího signálu centrálním kuželovým tělesem. Pokud se ale profil monostabilního zesilovače otáčí kolem osy II–II, vznikne tryska W (ang. Wide) s přívodem řídicího kanálu z vnější strany. Tryska W byla zkoumána v Praze [Tesař, 1997]. Vyznačuje se tím, že má jediný stabilní stav, ve kterém setrvává, pokud není přiveden řídicí proudový signál do řídicí trysky. Proud v tomto stabilním stavu sleduje vnitřní povrch vnějšího dutého kužele. V stabilním stavu 2 se vytváří sice široký proud prstencového průřezu, nevýhodou ale je, že uprostřed současně vznikne recirkulační oblast, takže vytékající proud je významně geometricky modifikován a jeho přenosové účinky jsou značně redukovány. Při dopadu takového proudu na stěnu vznikají zajímavé topologické struktury proudového pole.

7.2 Model pro laboratorní experimenty

První návrh trysky (laboratorní model), pro který bylo nutno provádět experimenty a získávat tak informace o kvantitativních vlastnostech trysky, je označován jako Tryska 98. Přes snahu autora se nepodařilo navrhnout trysku s vlastnostmi monostabilního fluidického zesilovače. Proto byla navržena konstrukce, která splňuje podmínky bistabilního zesilovače (planární provedení dle obrázku 1.6.), který má nevýhodu, že vyžaduje dva řídicí signály. Nepříznivým jevem byla citlivost funkce trysky na její vzdálenost od stěny. Zajímavé je, že při přibližování trysky ke stěně

docházelo ve vzdálenosti menší než 10 cm (což obecněji odpovídá přibližně poměru průměru trysky ku její šířce rovném 1) k překlopení trysky – ke změně průřezu výstupního proudu ze širokého prstencového na úzký kruhový, avšak v opačném případě – při vzdalování trysky od stěny zpětné překlopení již nenastalo.

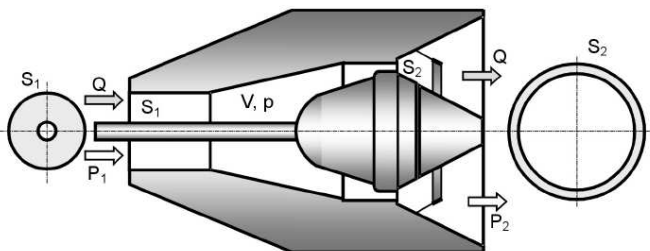


Obr. 7.2. První laboratorní model trysky

7.3. Stabilita proudového pole vycházející z Navierových-Stokesových rovnic a z rovnice kontinuity

Myšlenka o oscilujícím proudu, který je překlápený fluidickým oscilátorem se zpětnou vazbou, byla publikována v článku [Viets, 1975] a později využita, např. v práci [Raman a kol., 1994]. V nedávné době byl podobný princip použit v poněkud odlišném uspořádání bez zpětné vazby [Mi, Nathan, 2001]. Dvourozměrný oscilující impaktní proud navrhli na základě fluidických principů [Herr, Camci, 1997], jejich práce byla motivována snahou zlepšit chlazení lopatek u plynových turbín.

Zajímavý případ návrhu fluidické trysky je uveden v práci [Říha, Pochylý, 2000]. Vlastní návrh sestává se tří částí. První část tvoří rozbor Navier-Stokesových rovnic a rovnice kontinuity z hlediska stability stacionárního proudového pole. Další část představuje počítačové modelování proudění metodou konečných objemů pomocí programu Fluent 4.42. Poslední část návrhu tvoří měření parametrů fluidické trysky a jejich vzájemné porovnání s vypočtenými hodnotami.



7.3. Obecný tvar trysky pro vyšetřování stability proudového pole pomocí Navierových-Stokesových rovnic a rovnice kontinuity

$$D + \frac{\partial W_k}{\partial t} + \frac{\rho}{2} Q^3 \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) > 0, \quad (7.1)$$

kde: i je složka vektoru rychlosti,
 p je tlak,
 Π_{ij} je tenzor nevratných napětí,
 S je plocha (1 S vstupní, 2 S výstupní),
 Q je objemový průtok,
 n je složka vektoru vnější normály plochy,
 t je čas,
 D je disipační funkce

$$D = \int_V \Pi_{ij} c_i c_j dV, \quad (7.2)$$

W_k je kinetická energie

$$W_k = \frac{1}{2} \int_V \rho c_i c_i dV. \quad (7.3)$$

Podmínku (7.1) lze v jistém smyslu chápat jako podmínku stability proudění. Má-li kapalina proudit od vstupu k výstupu při zachování rovnice kontinuity, potom nerovnice (7.1) musí být vždy splněna. Všimneme-li si však posledního členu v nerovnici (7.1) na levé straně, lze konstatovat, že stabilitě proudění bude přispívat relace $S_1 > S_2$. Naopak v případě, že $S_1 < S_2$, bude oblast V citlivější na výskyt nestability proudění.

Následkem těchto úvah byla navrhovaná konstrukce opatřena prstencem, který zvětšil poměr vstupního a výstupního průřezu proudu v trysce z původních 0,84 na 1,42.

7.4. Vývoj tvarových detailů trysky

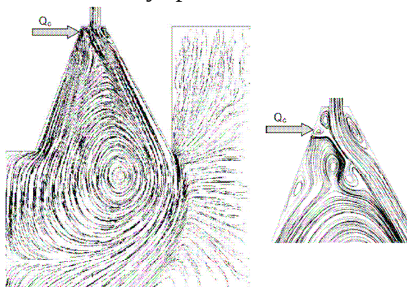
Další úpravou bylo zkrácení středového kužele (odříznutí jeho vrcholu). Komolý tvar kužele sice poněkud zhoršuje aerodynamickou účinnost, avšak byl funkčně vynucen potřebou měření v malé vzdálenosti od stěny v některých funkčních režimech. Sledovala se také myšlenka Zalmanzona [Zalmanzon, 1971], že kratší délka povrchu přilnutí podporuje příznivější odtržení proudu od stěny kužele. To bylo skutečně během výzkumu v laboratoři experimentálně potvrzeno. Zhoršení aerodynamické účinnosti je důsledek úplavu. Úplav za středním kuzelem je oblast proudového pole, kde postupný pohyb tekutiny je zastaven a tekutina víří. Velikost úplavu je v podstatě určena vývojem a stavem mezních vrstev na odtokové hraně. Čím je tloušťka mezní vrstvy větší, tím větší je i příčný rozměr úplavu, s čímž souvisí pak ztráty hybnosti. Jelikož rychlost tekutiny vně úplavu je vždy vyšší než rychlost tekutiny v úplavu, vzniká na hranici úplavu smyková vrstva s rotací částic tekutiny, směřující do úplavu. Úplav je tedy oblastí silně vířivého zbržděného proudění a je podstatnou příčinou odporu

obtákaného tělesa. Tento úprav se podařilo vizualizovat a rovněž numericky vyhodnotit (Obr. 7.4.).



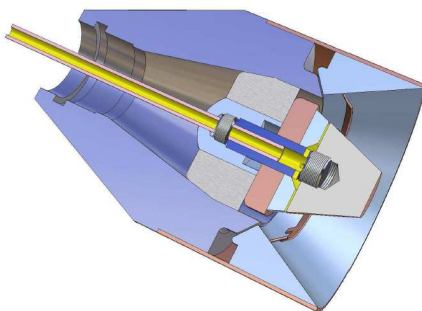
Obr. 7.4. Úprav za komolým kuželem navrhované trysky. Vlevo je naznačeno rychlostní pole úpravu podle numerického výpočtu, vpravo je výsledek jeho vizualizace.

Snad nejdůležitější úpravou bylo zavedení spoileru opatřeného osmi patkami, kterými byl připevněn k vnějšímu dutému kuželu. Spoiler zhoršoval podmínky obtékání stěny tohoto kužele, díky čemuž tryska označená jako *Tryska 02* byla plně monostabilní. Vliv spoileru na proudové pole je na obrázku 7.4. a samotný spoiler na obrázku 7.6.



Obr. 7.5. Numericky určená proudová pole pro trysku bez spoileru (vlevo) a z aplikovaným spoilerem (vpravo)

Na obrázku 7.5. vlevo je řídicí proud umístěn těsně u základny kužele, v místě hrany hlavní trysky, na obrázku 3.9 vpravo v optimální vzdálenosti 10 mm stanovené numericky.



Obr. 7.6. Konečný tvar trysky po posunutí řídicí trysky směrem k vrcholu kužele

Konečná úprava této trysky je uvedena na obrázku 7.6. Je to laboratorní model, který sloužil k experimentálnímu výzkumu, popsanému v další části práce.

7.5. Matematická optimalizace vstupního kanálu osově symetrické trysky

Při studiu funkce trysky z hlediska jejího řízení se do značné míry zanedbávaly energetické ztráty doprovázející hlavní a řídicí proud v trysce. Avšak vzhledem k potenciálním průmyslovým aplikacím se tato otázka jeví závažná, protože energetické ztráty trysky mohou podstatně ovlivnit celkové energetické poměry, např. příkon u klimatizační jednotky s tryskou. Především je nutné se zaměřit na omezení místních ztrát, které reprezentují podstatnou část znehodnocení mechanické energie v trysce. V rámci omezení místních ztrát je třeba zdokonalit tvar vstupního kanálu. Tato okolnost nemusela být uvažována ve stadiu vývoje nebo není významná z funkčního hlediska. Při vývoji trysky se kladl z výrobního hlediska důraz především na geometrickou jednoduchost modelu. Při návrhu vstupního kanálu se do značné míry sledoval záměr minimalizovat zrychlení proudícího vzduchu v radiálním směru. Z matematického hlediska to vyjadřuje požadavek minimalizace druhé derivace radiální souřadnice. Tato optimalizace se prováděla pomocí pomyslné tvořící křivky středů prstencových průřezů, která po otočení kolem osy trysky o úhel 2π vytvoří plochu, která rozdělí objemově vstupní kanál na dvě stejné části, vnitřní a vnější.

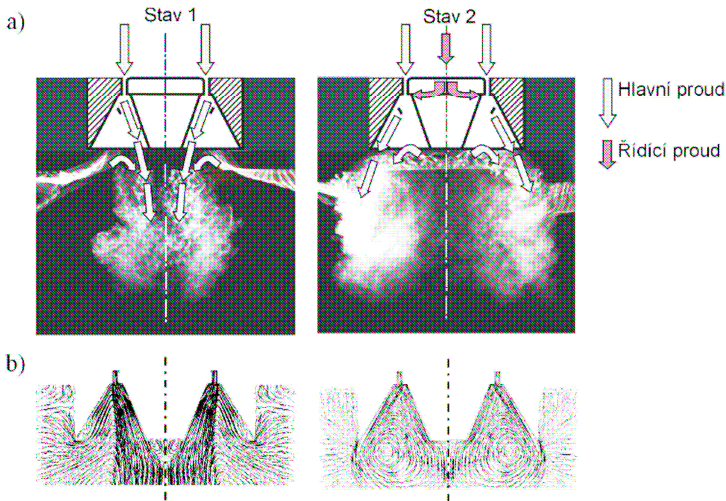
8. ZÁVĚR

8.1. Překlápění proudu

Obr. 8.1 ukazuje oba stavy proudu:

- Stav 1 bez řídicího proudu. Prstencový proud vytékající z hlavní trysky je v důsledku Coandova efektu odkloněn směrem k vnitřnímu kuželu trysky, proudí podél tohoto kužele a výtok proudu je soustředěn do oblasti podél osy trysky. Jak je obvyklé u každého prstencového proudu, za středním tělesem – jádrem trysky – se nachází oblast recirkulačního proudění a vnitřní směřovací oblast, na větším průměru proudu je vnější směřovací oblast. Hranicí mezi vnitřní a vnější směřovací oblastí je poloha lokálního maxima rychlosti; na obr. 8.1a) je vyznačena šipkami vytékajícího proudu. Výskyt těchto dvou oblastí končí v bodě splnutí (reattachment point), kde toto rozhraní dosáhne osy trysky. Dále po proudu má rychlostní profil jen jediné maximum na ose trysky.
- Stav 2 nastává při zapnutí řídicího proudu. Prstencový proud vytékající z hlavní trysky je radiálním řídicím proudem rozevírán směrem k vnější kuželové ploše, k níž v důsledku Coandova efektu přilne a proudí podél ní.

Výsledný výtok má divergentní charakter – je rozevřen ve směru prodloužení vnější kuželové plochy a má tedy ve srovnání se stavem 1 relativně velký příčný rozměr a menší rychlost.

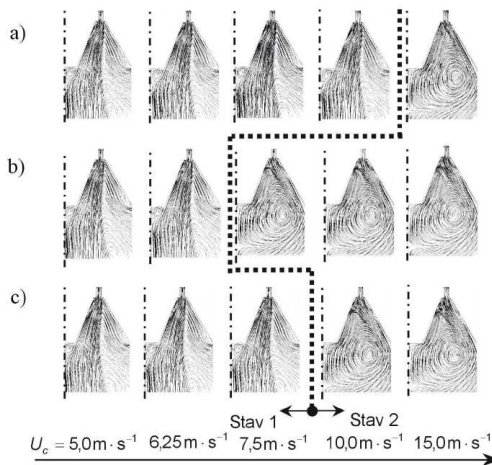


Obr. 8.1. Dva stavy prstencové trysky, $x_c = 0$, bez ventilace. a) kouřová vizualizace při $Re_D = 23000$, ($Re_w = 23000$, $U_j = 4,4\text{m/s}$), $x_s = 15,3\text{ mm}$, $r_c = 0\%$ ve stavu 1 a $r_c = 9,7\%$ ve stavu 2., b) vypočítané trajektorie při $Re_D = 49400$ ($Re_w = 2900$, $U_j = 8,5,4\text{m/s}$) bez spoileru, $r_c = 0\%$ ve stavu 1 a $r_c = 21,1\%$ ve stavu 2.

8.2. Citlivost proudu na umístění řídicí trysky

Motivace tohoto kroku numerické simulace vychází z kontroverzních požadavků na řídicí proud. Na jedné straně řídicí proud musí být dostatečný pro přestavování hlavního proudu. Na druhé straně ale řídicí průtok by měl být pokud možno malý – důvodem je požadavek nízké energetické náročnosti.

Vhodné umístění řídicí trysky bylo hledáno v místech znovupřilnutí hlavního proudu (dle výsledků numerických simulací – viz šipka označená b) *Vstup řídicího proudu*; tato oblast je velmi citlivá na účinky řídicího proudu. Byly provedeny numerické simulace pro umístění řídicí trysky v polohách $x_c = 0$; 10; 15 mm. Přitom nebylo použito ani spoileru ani ventilační štěrby. Velikost řídicího proudu byla volena v rozsahu $U_c = 5$ až $15\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (odpovídající bezrozměrný řídicí průtok r_c byl 5 až 21%).



Obr. 8.2. Numerická simulace citlivosti bistabilního proudového pole. Tečkovaná lomená čára je hranice mezi stavy 1 a 2. Není použit ani spoiler ani ventilace, $Re_D = 49400$. a) $x_c = 0$, b) $x_c = 15$, c) $x_c = 20$.

8.3. Překlápěcí charakteristiky, překlápění proudu versus hysterezní efekty

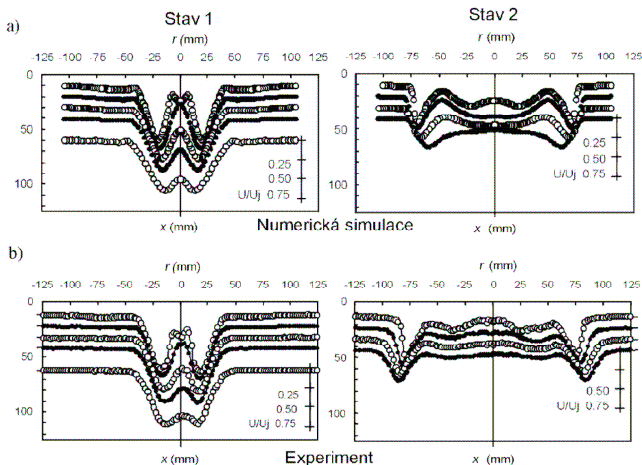
Existence dvou stavů proudu a zvláště pak jejich překlápění, resp. přepínání, nebere v úvahu vliv postupného narůstání řídicího proudu. Podle obr. 8.2. k překlapaní proudu ze stavu 1 do stavu 2 dochází při jisté velikosti řídicího proudu. Představa překlapaní proudu jako skokové změny je ale jen zjednodušením skutečného fyzikálního procesu. Ve skutečnosti má cyklus překlápění proudu ze stavu 1 do stavu 2 a naopak hysterezní charakter. Okamžik překlapaní proudu je vyvolán nestabilitou proudového pole a předchází mu postupné narůstání řídicího proudu doprovázené postupným odkláněním proudu hlavního. V následující úvaze je ukázáno, v jakém rozmezí lze považovat skutečnou komplikovanou a postupnou změnu vyvolanou řídicím proudem mezi stavy 1, 2 za dvoustavové překlapaní proudu a jaké parametry jsou podstatné pro takový děj.

Konečná varianta trysky byla proto vybavena spoilerem a ventilačním kanálem, hysterezní efekty byly tak potlačeny, ke zpětnému přepnutí ze stavu 2 do stavu 1 dochází okamžitě po vypnutí řídicího proudu, neboť účinky spoileru a ventilačního kanálku rychle „zruší“ stav 2.

8.4. Střední proudové pole

Obrázky 8.3.a), b) ukazují a porovnávají profily střední rychlosti získané numerickou simulací a experimentem. Levé dva obrázky se týkají stavu 1 (bez řídicího proudu, $r_c = 0$), pravé dva obrázky se týkají stavu 2 (řídicí průtok $r_c = 10,9\%$). Kvalitativní shoda numerické simulace a experimentu je

velmi dobrá. Výsledek dobře odpovídá filozofii fluidického řízení: proud je soustředěn podél osy trysky ve stavu 1, anebo je rozložen do větší oblasti ve stavu 2. Poznamenejme, že právě tato dobrá shoda numerických a experimentálních výsledků zvyšuje důvěru k teoretickému přístupu při případném dalším zdokonalování geometrie trysky.



Obr. 8.3. Profily velikostí vektoru rychlosti. Vlevo stav 1, $r_c = 0$, $x = 10, 20, 30, 40, 60$ mm, vpravo stav 2, $r_c = 10,9\%$, $x = 10, 20, 30, 40$ mm, $x_c = 10$ mm, $x_s = 20$ mm, bez ventilace, a) výpočet pro $Re_D = 49400$, b) experiment při $Re_D = 42000$

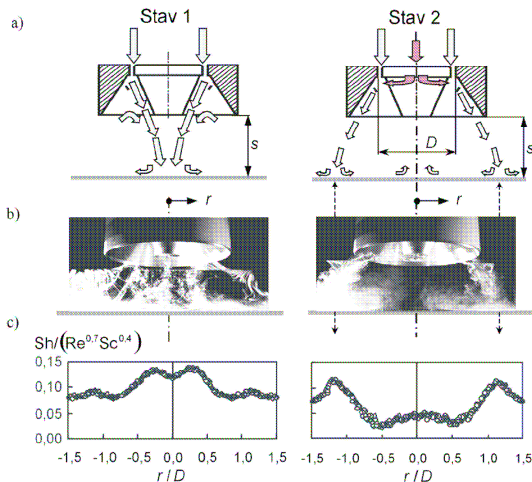
8.5. Prstencový impaktní proud – experiment s přenosem hmoty

Na obr. 8.4 jsou znázorněny výsledky experimentu s prstencovým impaktním proudem – a) schéma proudového pole, b) kouřová vizualizace a přestup hmoty na obtékané stěně. Vzdálenost stěny od trysky byla $s = 80$ mm. Součinitel přenosu hmoty byl transformován do bezrozměrného

tvaru v podobě Sherwoodova čísla Sh a poté přepočítán na poměr $\frac{Sh_D}{Re_D^m Sc_D^n}$. Exponenty byly voleny $m = 0,7$; $n = 0,4$. Hodnoty exponentu m byly voleny dle údajů uváděných pro impaktní proudy – viz např. Dyban, Mazur, 1982; Martin, 1997 (tato práce neřešila vliv Reynoldsova čísla na přestup tepla a hmoty). Exponent n byl volen na základě analogie přestupu tepla a přestupu hmoty; obvyklý uváděný rozsah bývá $n = 0,33$ až $0,42$, hodnota $n = 1/3$ pak platí pro laminární obtékání rovinné desky – Dyban, Mazur, 1982; Goldstein, Cho, 1995. Naměřené hodnoty přestupu hmoty mohou být tedy přepočteny pomocí analogie na přestup tepla:

$$\frac{Sh_D}{Re_D^{0,7} Sc_D^{0,4}} = \frac{Nu_D}{Re_D^{0,7} Pr^{0,4}} \quad (8.1)$$

Podobně jako v obr. 8.1 i zde byla vizualizace prováděna při přibližně poloviční rychlosti proudění (předběžné experimenty ukázaly, že takové snížení Reynoldsova čísla kvalitativně neovlivňuje překlápění proudového pole). Levá řada obrázků 8.4.a)-c) se vztahuje ke stavu proudu 1, pravá řada ke stavu 2:



Obr. 8.4. Prstencový impaktní proud, vlevo stav 1, $r_c = 0$, vpravo stav 2, $r_c = 9,7\%$ při vizualizaci, $r_c = 6,5\%$ – při měření s přenosem hmoty, $s = 80$ mm, $x_c = 0$, $x_s = 15,3$ mm, bez ventilace. a) Schéma proudového pole, b) kouřová vizualizace při $Re_D = 23000$, c) přenos hmoty na exponované stěně u stavu 1 $Re_D = 52800$, $U_j = 10,1$ m/s, u stavu 2 $Re_D = 49600$, $U_j = 9,5$ m/s

9. LITERATURA

9.1. Literatura k přednášce

- [1] Coanda H., 1934. Procédé et dispositif pour faire devier une veine fluide penetrante autre fluids, francouzský patent, č. 788140, 217.
- [2] Davidson L., 2001. An Introduction to Turbulence Models, <http://www.tfd.chamers.se/~lada>, Goeteborg.
- [3] Doebelin E.O., 1990. Measurement Systems Application and Design. McGraw-Hill, 4th ed., New York.
- [4] Dyban E.P., Mazur A.I., 1982. Konvektivnyj teploobmen pri strujnom obtekanii tel. Naukova dumka, Kiev, (in Russian).
- [5] Herr F., Camci C.: Self-oscillating-impinging-jet as a gas turbine cooling enhancement system. In: Proceedings of the Int. Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exposition, ASME, Orlando, FL, 1997.
- [6] Martin, H., 1997. Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces. Advances in Heat Transfer 13, 160, pp. 1–60.
- [7] Mi J., Nathan G.J., 2001. New Flip-Flop Jet Nozzle Without Control Port and Feedback Loop. in: E.Lindborg et al. (Eds.), Proceedings of the 2nd Int. Symposium Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-2), Stockholm, vol. II, pp. 253–257.
- [8] Olszewski M., Kaczanowski S., Wański Z., 1970. Płynowe elementy i ich układy

- [9] Raman G., Rice E.J., Cornelius D.M., 1994. Evaluation of Flip-Flop Jet Nozzles for Use as Practical Excitation Devices. Transaction of the ASME, Journal of Fluids Engineering 116, p. 508-515.
- [10] Říha Z., Pochylý F., 2000. Návrh fluidické trysky, Inženýrská mechanika, Brno, č. 2, s. 141–150
- [11] Tesař V., 1997. Řízená tryska pro generaci impaktního proudění (Controlled nozzle for impinging jet flow generation - in Czech) Proceedings of "Topical Problems of Fluid Mechanics '97", ISBN 80-85918-26-9, p. 59, Inst. of Thermomechanics AS CR, Praha.
- [12] Tippetts J. R. and all, 1978: Vortex amplifier controlled ventilation systems for nuclear fuel reprocessing plants. Fluidic Quarterly.
- [13] Trávníček Z., Křížek F., 1999. Impinging Jet and Combined Slot Nozzle (Impaktströmung und die Zusammengesetzte Schlitzdüse). Heat and Mass Transfer 35 (5), 351-356, (in German).
- [14] Trávníček Z., Maršík F., 2002. Flow Visualization and Mass Transfer with a Bistable Two-Slot Impinging Jet. In: Proceedings of the 10th Int. Symposium of the Flow Visualization, (ISFV 10), Kyoto, Book of Abstracts p. 44; Full text CD-ROM, F0068.
- [15] Viets H., 1975. Flip-Flop Jet Nozzle. AIAA Journal, 13 (10) p. 1375-1379.
- [16] Wawrzyniak S., 2002. Stanowisko do ciągłej wizualizacji przepływu w elementach strumieniowych. Proceedings of the VI conference 'Postępy w konstrukcji i sterowaniu' – Bydgoszcz-Duszniki Zdrój, p. 61, full text CD-ROM.
- [17] Wawrzyniak S., Nowicki K., 2004. Analiza numeryczna rzeczywistego przepływu powietrza za dyszą osiowoosymetryczną, XIV Krajowa Konferencja PNEUMA 2004, Printed Pneumatyka 4 (47), ISSN 1505–3954, p. 10 – 11.
- [18] White F.M., 1994. Fluid Mechanics, Mc Graw-Hill, New York.
- [19] Zalmanzon L. A., 1971. Teoria elementów stosowanych w technice strumieniowej, Wydawnictwa Naukowe – Techniczne, Warszawa.

9.2. Relevantní autorovy publikace

- [1] Peszyński K., 1997. Dwustanowy przerzutnik strumienia ścianowego. (Bistable Wall Flow Konferencja Naukowo-Techniczna "Mechanika '97. Nauka i Praktyka, Elbląg.
- [2] Peszyński K., 1998. Badania funkcjonalności rozdzielacza strumienia gazu technologicznego. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna VIII - ICMR '98, Bydgoszcz.
- [3] Gawda M., Peszyński K., 1998. Badanie charakterystyk sterowania strumienia wypływającego z dyszy o przekroju kołowym. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna VIII - ICMR '98, Bydgoszcz.
- [4] Peszyński K., 1998. Flow control by axisymmetric fluidic device with radial switching. Engineering Mechanics '98, Svratka 1998, Česká republika. Organizátor konference: Akademie věd ČR
- [5] Tesař V. Peszyński K., 1998. Strumieniowe osiowo-symetryczne zawory rozdzielające. Pneuma '98 - Pneumatyka i Sterowanie w Przemysle, Koszalin.
- [6] Peszyński K., Kamiński A., 1999. Modelowanie numeryczne strumieniowej dyszy pierścieniowej. IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna IX - ICMR '99, Bydgoszcz.
- [7] Wawrzyniak S., Peszyński K., 1999. Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych na własności dyszy osiowoosymetrycznej. Proceedings of the scientific seminary "Postępy w sterowaniu i konstrukcji", Bydgoszcz
- [8] Peszyński K, Nowicki K., 1999. Neuronowy model rozkładu prędkości strumienia wyjściowego w osiowoosymetrycznym elemencie strumieniowym. Zeszyty Naukowe nr. 222, Mechanika 45, p. 45 – 54, ATR, Bydgoszcz, ISSN 0208-6395

- [9] Peszyński K., Hošek J., Kuszyński Z., Trávníček Z., Wawrzyniak S., 2000. Active control of annular bistable jet. Engineering Mechanics '2000, Svratka 2000, Czech Republic. Volume IV, p. 149-154, ISBN 80-86246-03-05 (all), ISBN 8086246-07-08
- [10] Peszyński K., Trávníček Z., 2000. Wizualizacja pola prędkości na wyjściu dyszy osiowosymetrycznej. Proceedings of the scientific seminary "Postępy w sterowaniu i konstrukcji", Bydgoszcz, p. 41-42 – Streszczenie
- [11] Peszyński K., Trávníček Z., Wawrzyniak S., 2001: Optyczna i numeryczna wizualizacja pola prędkości na wyjściu dyszy do urządzeń suszących. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, RECYRKULACJA W BUDOWIE MASZYN, XI - ICMR '2001, Bydgoszcz, p. 251-258, ISSN0137-9682
- [12] Peszyński K., Trávníček Z., 2001. Pomiar lokalnych wartości przenoszenia masy metoda sublimacji naftalenu w pierścieniowym bistabilnym strumieniu uderzającym. Proceedings of the scientific seminary "Postępy w sterowaniu i konstrukcji", Bydgoszcz, p. 39 – 40, Full text CD ROM.
- [13] Trávníček Z., Peszyński K. 2001. Přestup tepla a hmoty u osově symetrického, aktivně řízeného impaktního proudu. Kolokvium Dynamika Tekutin 2001, Ústav termomechaniky AV ČR, Praha.
- [14] Peszyński K., Trávníček Z., 2002. Jet flow visualization for an axi-symmetric nozzle. Chapter in monography „Development in control and machinery design”, editor Janusz Sempruch, Wydawnictwa Uczelniane ATR w Bydgoszczy, ISBN 83-87274-39-9
- [15] Hošek J., Trávníček Z., Peszyński K., 2002. Numerical simulation of a fluidically controlled annular jet. In: Seminar Postępy w sterowaniu i konstrukcji (Developments in Control and Machinery Design), Eds. K. Peszyński, S. Wawrzyniak, M. Farbotko Bydgosz-Duszniki, Poland, pp. 25-26 in Book of Abstracts; (full text is on the CD Proceedings, in Polish).
- [16] Trávníček Z., Peszyński K., Hošek J., Wawrzyniak S., 2003: Aerodynamic and Mass Transfer Characteristics of an Annular Bistable Impinging Jet with a Fluidic Flip–Flop Control. International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003), 1265-1278, Semimonthly, ISSN: 0017-9310, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD, ENGLAND, OX5 1GB.
- [17] Trávníček Z., Peszyński K., 2003. Zmiany geometrii dyszy wpływające na „przełączania strumienia” i strefę histerezy (An adaptation of nozzle geometry to balance "jet switching" versus hysteresis effects), Proceedings of the VII scientific seminary "Postępy w konstrukcji i sterowaniu", Bydgoszcz – Hołny Mejera, p. 57 – 58, (full text is on the CD proceedings, in Polish).
- [18] Hošek J., Peszyński K., Trávníček Z., 2004. Numerical simulation of an annular jet with a fluidic control. Chapter in monography „Developments in machinery design and control Vol. 3”, Wydawnictwa Uczelniane ATR, Wydawnictwa Uczelniane ATR w Bydgoszczy, p. 41-52.
- [19] Peszyński K., Trávníček Z., 2004. Mass Transfer Measurements of a Flip-Flop Jet Using the Naphthalene Sublimation Technique. Chapter in monography „Developments in machinery design and control Vol. 3”, Wydawnictwa Uczelniane ATR w Bydgoszczy, p. 53-66.

Ing. Kazimierz Peszyński, CSc. (born 1950)

- 1974 M.Sc. (Eng.) degree at the Mechanical Engineering Faculty, the Czech Technical University (ČVUT) in Prague
- since 1974 University of Technology and Agriculture in Bydgoszcz, Poland, Faculty of Mechanical Engineering, Automatics Sub-Department, Automatics and Thermal Measurement Sub-Department, Department of Machinery Design and Control, University of Technology and Life Sciences (2006) in Bydgoszcz (as a result of organizational changes)
- 1980 Ph.D. degree at the Mechanical Engineering Faculty, the Czech Technical University (ČVUT) in Prague
- 1980 appointed to the post of the Assistant Professor
- 1980 – 1986 Head of Control and Measurement Systems laboratory
- 1986 – 1999 Head of Faculty Computer Laboratory and Computer Section at the Faculty of Mechanical Engineering
- 1999 apparatus grant (value of PLN 100,000 US\$ ~ 40,000), State Committee for Scientific Research – Stream Line thermo-anemometer purchase (international grant)
- since 1999 Head of the Control Division at the Department of Control and Machinery Design

Member of faculty commission for science (1993-96), Member of the Faculty Board (1993- 96 and 2005-08), Many times member of the Scientific or Organizing Committee of various National and International Conferences, e.g., Nationwide Conference PNEUMA, International ,Conference on Developments in Machinery Design and Control, IX. Conference on Recirculation in Mech. Engineering, etc.

International collaborations

- 1999 short-term training at the University of Sheffield (1 week)
- 2000 short-term training at the Institute of Thermomechanics of the Academy of Science of the Czech Republic (2 weeks)

Professional interest

Professional interest covers the development of control devices based on the combination of mechanics and fluid dynamics principles, especially representing the power fluidics group, particularly axi-symmetric nozzles. Designing and examination, presented in research papers, involved both theoretical and experimental methods. The theoretical ones include fundamental theoretical equations, the similarity theory and CFD software, whereas the experimental ones - anemometric measurements, flow visualization and PIV analyses. The thermodynamic properties of the nozzle have been investigated using the naphthalene sublimation technique.

Teaching activity

- since 1996 Head of the post-graduate college of Computer-Aided Engineering (7 successive editions)
- 1980 – 1981 plenipotentiary of Vice Rector for Student's Affairs Erasmus Teaching Staff, Technical University of Kosice (Slovakia) (2006, 2007)
- Erasmus Teaching Staff, Brno University of Technology (Czech Republic) (2009)