



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ



KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI



JEDNOTLIVÝ PŘÍSPĚVEK ZE SBORNÍKU



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Charakteristiky rovinného podzvukového difuzoru

SEDLÁK Kamil, VOREL Jaroslav, LINHART Jiří

The objective of this work was to measure main characteristics of the planar diffuser, which is placed at the suction side of axial compressor. These characteristics of the wide-angle subsonic diffuser were measured by pressure probes and by wall pressure taps. Also optical apparatus to measure velocity vectors field was used. Obtained results of measurements are shown in this paper.

Klíčová slova: rovinný difuzor, syntetizovaný profil, PIV

Úvod

Tento článek navazuje na práce, které probíhaly na generátoru syntetizovaného paprsku, výsledky byly prezentovány na předcházejících konferencích. Cílem této práce je studium základních charakteristik prostého rovinného difuzoru, do něhož bude posléze zakomponován generátor syntetizovaného paprsku, jímž bude řízeno odtržení mezní vrstvy.

Pod pojmem prostý rovinný difuzor je míněno běžně používané experimentální zařízení, jehož dvě stěny zůstávají paralelní, zatímco druhá dvojice stěn umožňuje nastavení „libovolného“ úhlu rozevření difuzoru. V průběhu úvodních měření se ukázalo, že pro účely tohoto výzkumu lépe vyhovuje jednostranně rozevřený difuzor oproti symetrické variantě. U ní v průběhu měření dochází zdánlivě bez vnějších příčin k přepínání hlavního proudu od jedné stěny ke druhé, tím nejsou jasné definovány podmínky měření a nedá se mluvit o jakékoliv opakovatelnosti měření.

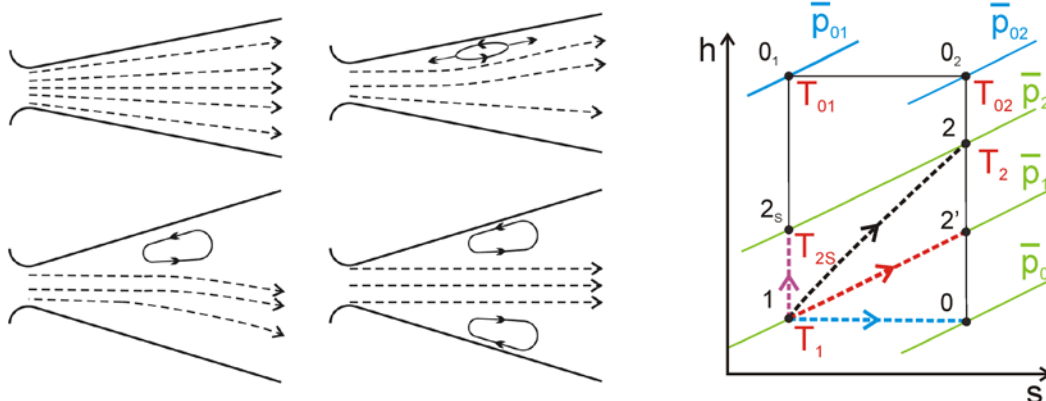
Pod pojmem charakteristiky difuzoru jsou zde myšleny především tvar vstupního rychlostního profilu, gradient statického tlaku po délce difuzoru a konečně také rychlostní profil na prodlouženém výstupu z difuzoru.

Výsledky, které budou uvedeny v rámci tohoto příspěvku, byly získány na zařízení, které je umístěno v laboratorích Katedry energetických strojů a zařízení, Západočeské univerzity v Plzni. Pro vlastní měření bylo využito dnes již konvenčních způsobů měření, jako jsou více-tvorové pneumatické sondy, odběry statického tlaku na stěně difuzoru. Pro tato měření bylo využito dvojice poměrně kvalitních 16-ti kanálových inteligentních tlakových převodníků NetScanner 9116, které jsou schopné komunikovat s měřicím počítačem prostřednictvím sítě Ethernet.

Kromě této aparatury, která ze svého principu umožňuje pouze bodové měření, bylo využito optického měření metodou PIV. Přestože úvodní fáze měření touto metodou byly poznamenány velkým množstvím technických komplikací, které byly dány především koncepcí experimentálního zařízení, podařilo se většinu z nich úspěšně vyřešit a získat relevantní data pro další zpracování. Na zmiňovaném pracovišti je k dispozici běžná PIV aparatura, které nemá dostatečně vysokou vzorkovací frekvenci, takže získaná okamžitá data jsou nekorelovatelná. Proto je nutné k nim při dalším zpracování takto přistupovat. Dále je třeba poznamenat, že při daných rychlostech proudění nelze postihnout vývoj vírových struktur, které vznikají při odtržení mezní vrstvy od stěny.

Výhodou kombinace obou metod je fakt, že získaná data dávají ucelený pohled na proudění popisovaným difuzorem. Jak z pohledu rozložení rychlostí, které je ve formě dvourozměrných vektorových polí, tak z pohledu rozložení statických tlaků na stěně, ale také celkových v rámci hlavního proudu tekutiny.

Důvodem proč vznikla potřeba, resp. zájem, zabývat se problematikou proudění difuzorem je poměrně široké nasazení difuzorů v praxi. Navíc v poslední době jsou na vzestupu aktivní metody řízení mezní vrstvy, což skýtá naději na výrazné zvýšení účinnosti, resp. snížení ztrát difuzorů, převážně v nenávrhových režimech provozu. Také zde je počítáno s využitím progresivního řízení mezní vrstvy prostřednictvím syntetizovaného paprsku. Základní režimy proudění rozšiřujícím se kanálem bez řízení mezní vrstvy jsou schématicky zobrazeny na následujícím obrázku vlevo, viz obr.1. Toto je doplněno popisem dějů v h - s diagramu



Obr. 1: Režimy proudění podzvukovým difuzorem

Ideálním režimem je izoentropické proudění difuzorem, viz úsečka 1-2_s v uvedeném diagramu, kdy dochází ke stlačování pracovního média bez dalších ztrát. Nicméně tento stav je nereálný, přesto je snahou co nejvíce se mu přiblížit.

Obvykle je možné se setkat s obecným průběhem komprese média, viz křivka 1-2, kdy dochází ke kompresi, ale nikoliv bez ztrát, což vystihuje nárůst entropie v průběhu děje.

Existují případy, kdy komprese nevzniká, např. izobara 1-2', v průběhu děje nedochází k expanzi ani kompresi pracovního média.

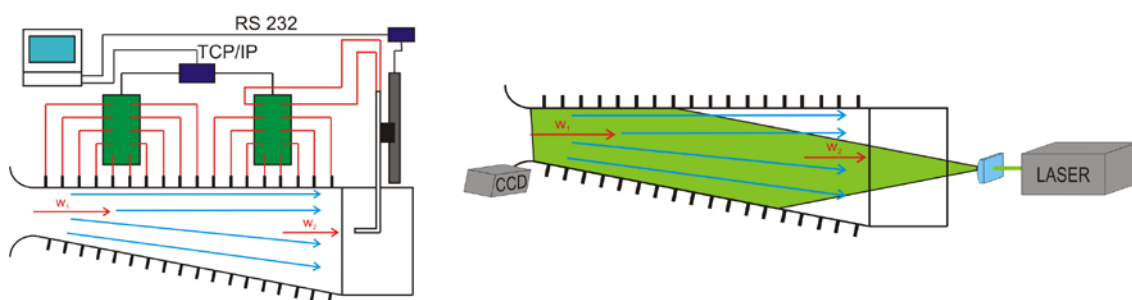
Posledním režimem, z pohledu difuzoru nežádoucím je případ, kdy dochází k expanzi. Tento jev je popsán například úsečkou 1-0. Jak již bylo zmíněno, poslední dva stavy jsou nežádoucí. Cestou jak se vyhnout těmto nepříznivým průběhům je snižování ztrát na únosnou mez.

Běžně je využíváno geometrických úprav kanálu, nebo pasivních, popř. aktivních způsobů řízení mezní vrstvy. V navazujících studiích bude středem zájmu aktivní způsob řízení mezní vrstvy v podobě syntetizovaného paprsku.

Z tohoto úhlu pohledu je tato práce jen jakousi přípravnou fází, kdy bylo nutné zjistit počáteční stav proudění v difuzoru s velkým úhlem rozevření. Hlavní snahou bylo nastavit režim se „stabilním“ odtržením mezní vrstvy, které by bylo možné dále studovat a podrobit jej vlivu syntetizovaného paprsku.

2. Popis měření

Jak již bylo v předcházející kapitole zmiňováno, pro měření tlaků bylo využito dvojice tlakových převodníků NetScanner 9116, pro něž bylo postaveno lokální Ethernetové rozhraní. Obě zařízení komunikují s měřicím počítačem prostřednictvím protokolu TCP/IP. Zmiňovaná dvojice tlakových převodníků byla shodného rozsahu 7 kPa, nejistota měření tohoto typu tlakového převodníku se pohybuje v řádech $\pm 0,15 \%$ z plného rozsahu. Sběr dat z tlakových převodníků a ovládání krokového motoru po sériové lince, jenž zajišťoval traversování s Prandlovo sondou ve výstupním průřezu difuzoru, byl řízen aplikací vytvořenou v prostředí LabVIEW 2010. Měřicí řetězec je schematicky naznačen na následujícím obrázku, viz obr 2 zcela vlevo.



Obr. 2: Schéma měření charakteristik rovinného podzvukového difuzoru

Kromě měření charakteristik difuzoru prostřednictvím tlakových odběrů bylo využito PIV aparatury. Výhodou tohoto přístupu je fakt, že vlastní proudové pole není narušováno přítomností sebemenší sondy, navíc výsledkem jsou vektorová pole rychlostí, což dává lepší představu o dějích odehrávajících se ve sledované oblasti.

Nicméně je nutné podotknout, že i tento princip měření vykazující velké množství výhod má také svá omezení, schéma měření uvedeno na předcházejícím obrázku vpravo, viz obr.2.

Zcela na začátku je nutné si uvědomit, že není měřena přímo rychlost proudící tekutiny, ale rychlost sytících částic. Tedy v místech kde není zajištěno dostatečné množství částic, popř. není žádná částice, není možné získat relevantní výsledky. Těmito oblastmi může být mezní vrstva nebo oblast nacházející se za bodem odtržení.

Prvním požadavkem pro získání dobrých výsledků, který je nutné splnit, je zajištění dobrých „sledovacích“ vlastností částic vůči proudící tekutině. Z výše uvedeného vyplývá, že dalším požadavkem je zajištění víceméně homogenní směsi proudícího media a sytících částic.

První z dvojice podmínek je zajištěna vhodnou volbou částic a celého zařízení, které vytváří částice o velikosti několika mikrometrů. Tím je zajištěna dostačující sledovací schopnost bez ztráty informací vlivem prostorového rozlišení použité kamery.

Zajištění druhé podmínky je o poznání komplikovanější a to především z důvodu koncepce celého standu. Vzhledem k tomu, že difuzor je umístěn na sací straně axiálního kompresoru a vstup do difuzoru je z klidného prostředí, není možné využít turbulenci k homogenizaci směsi. Z tohoto důvodu si sytící zařízení vyžádalo specifickou úpravu, což bylo zpočátku doprovázeno nárůstem velikosti částic a také výraznou kondenzací částic v zařízení, přesto se podařilo splnit výše popisovanou podmínku.

Výsledkem jsou spolehlivá primární data, z nichž je možné vyhodnotit další parametry popisovaného difuzoru.

3. Vyhodnocení gradientu tlaku

Na základě dat snímaných tlakovým převodníkem je možné si udělat představu o pozici „bodu“ odtržení a také o hodnotě tlakového součinitele, který je obvykle definován takto:

$$C_p = \frac{2 \cdot (p - p_{REF})}{\rho U^2} \quad (1)$$

Veličiny vystupující ve vztahu (1) jsou:

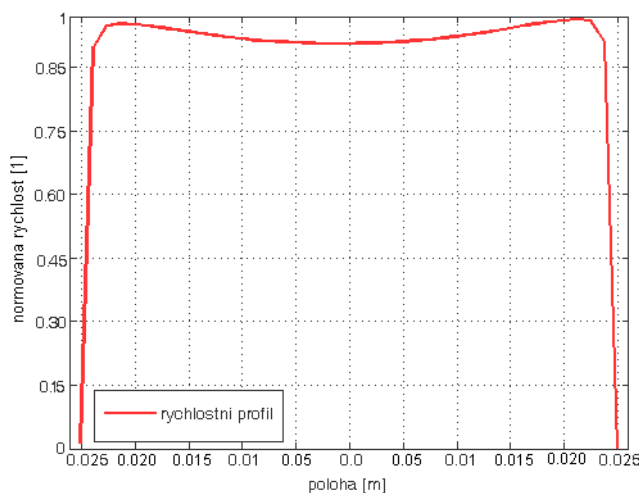
- p ... tlak v obecném místě difuzoru,
- p_{REF} ... referenční hodnota tlaku (může to být hodnota v ústí difuzoru),
- U ... rychlost hlavního proudu v referenčním bodě,
- ρ ... hustota proudící tekutiny v referenčním bodě difuzoru.

Takto vyhodnocená data je možné kombinovat s výsledky měření získanými metodou PIV a použít je k doplnění informací o rozložení tlaků ve sledované oblasti.

4. Výsledky měření

Je zřejmé, že výrazný vliv na proudění media difuzorem mají geometrické parametry, např. úhel rozevření, stupeň rozšíření, popř. bezrozměrná délka difuzoru. Nicméně na vývoji proudění skrze difuzor se také významně podepisuje nerovnoměrnost, resp. tvar, rychlostního profilu na vstupu do difuzoru, viz [1].

Z tohoto důvodu bylo středem zájmu určení rozložení rychlosti v ústí difuzoru. Výsledek z měření metodou PIV je uveden ve formě grafu na následujícím obrázku, viz obr. 3.



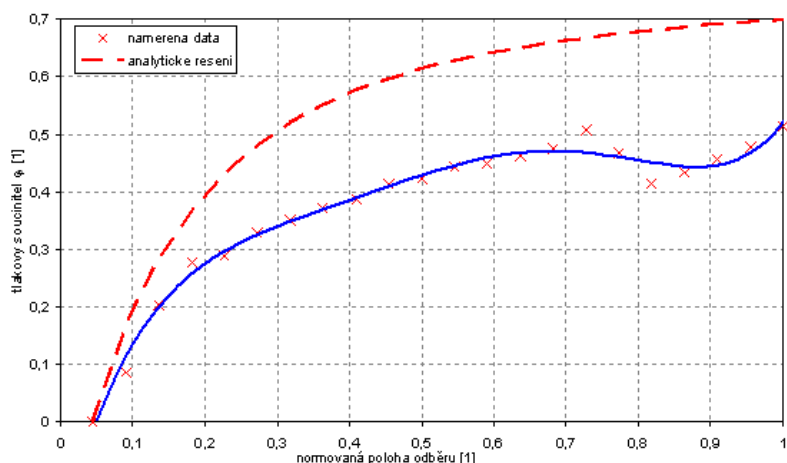
Obr. 3: Rychlostní profil měření metodou PIV v ústí difuzoru

Difuzory s obdobným rozložením rychlosti na vstupu vykazují nižší úroveň ztrátového součinitele ve srovnání s případem, kdy maximální rychlost je ve středu hrdla. Toto je možné s největší pravděpodobností vysvětlit vyšší energií, která je soustředěna v oblastech blízko u stěny, čímž je pokryt nepříznivý (kladný) tlakový gradient ve směru proudu. Výsledkem je fakt, že difuzor s takovýmto vstupním rychlostním profilem je odolnější proti vzniku odtržení.

Zmiňovaný ztrátový součinitel reaguje výrazným nárůstem na vznik odtržené oblasti, proto je možné usuzovat na přítomnost odtrženého proudění také z hodnoty ztrátového součinitele.

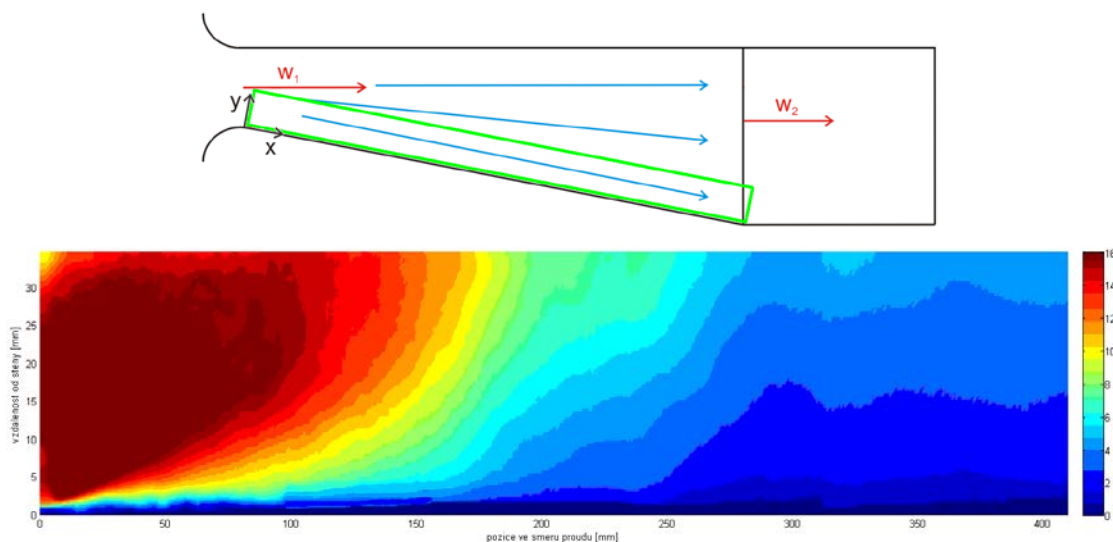
Další získanou charakteristikou difuzoru je tlakový součinitel C_p , resp. gradient statického tlaku po délce difuzoru, viz obr. 4. Z průběhu tohoto součinitele je možné poměrně dobře usuzovat na kvalitu proudění v difuzoru. Pro lepší představu o průběhu součinitele C_p je modrá křivka, která vznikla jako regresní křivka proložením měřenými body, doplněna o analyticky vypočítaný průběh tlakového součinitele pro izoentropické proudění difuzorem, viz červená čárkovaná křivka.

Z průběhu obou křivek je patrné, že dochází k výraznému odklonu měřených dat od ideálního průběhu v okolí bezrozměrné délky 0,2. Z uvedeného je pravděpodobné, že zhruba v této oblasti je možné čekat bod odtržení.



Obr. 4: Součinitel C_p měřený na stěně difuzoru

Posledním uvedeným výsledkem, viz obr.5, je skalární pole rychlostí, které bylo získáno středováním dat v čase získaných metodou PIV. Sledovaná oblast pokrývala zhruba 90 mm délky difuzoru a 40 mm šířky, měřeno kolmo ke stěně. Pro získání průběhu v celé délce difuzoru, tak jak je uveden níže, bylo nutné difuzor rozdělit do pěti podoblastí, které se překrývaly v šířce 20 mm. Finální obraz vznikl složením z jednotlivých podoblastí.



Obr. 5: Skalární pole rychlosti měřené v blízkosti stěny difuzoru

Z uvedeného obrázku je patrné, že skutečně dochází k odtržení mezní vrstvy zhruba ve vzdálenosti 150 mm od vstupu do difuzoru, což také potvrzuje průběh tlakového součinitele.

Závěr

Výsledkem snažení bylo získat ucelenou představu o proudových charakteristikách rovinného difuzoru při relativně velkém rozevření.

Z uvedených grafů a obrázků v tomto článku je zřejmé, že:

- vstupní rychlostní profil vykazuje maximální hodnoty rychlostí v oblastech blízkých stěnám difuzoru, viz obr. 3,
- měřený tlakový součinitel C_p dosahuje podstatně nižších hodnot než analyticky řešený izoentropický případ proudění,
- Konečně ze skalárního pole rychlostí je patrné, že dochází ke vzniku a vývoji odtržené oblasti na odkloněné stěně.

Na základě uvedeného, je možné konstatovat, že se jedná o zcela nevhodné nastavení difuzoru, které je z pohledu prací budoucích stavem žádoucím, pro studium vlivu aktivního řízení mezní vrstvy.

Literatura

- [1] DEJČ, M. E.: Technická Dynamika Plynů. SNTL Praha, 1967.
- [2] HIBŠ, M. Podzvukové difuzory. SNTL Praha, 1985.
- [3] HIBŠ, M: Mezikruhové difusory I, II, III, IV; Výzkumné zprávy VÚTT-55-04016, VÚTT-56-04006, VÚTT-56-04017, VÚTT-57-04016, 1955-1957.
- [4] SEDLÁK, K. Vliv syntetizovaného paprsku na proudění v rozeviratelném difuzoru. Referát, Plzeň, 2011.
- [5] SEDLÁK, K.; KÁPL, V.; LINHART, J. Vlastnosti syntetizovaného paprsku. Referát, Plzeň, 2011. Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow – ES 2010, University of West Bohemia, Pilsen, June 16-17, 2010, ISBN 978-80-7043-883-1.
- [6] SEDLÁK, K.; KÁPL, V.; LINHART, J. Generování syntetizovaného paprsku v klidném prostředí. Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow – ES 2011, University of West Bohemia, Pilsen, June 17-18, 2011, ISBN 978-80-261-0004-1.
- [7] ZARJANKIN, A. E.; SIMONOV, B. P. Vychlopnye trubki parovyh i gazovyh turbin. Izdatelstvo MEI, 2002.

Poděkování

Autoři děkují za podporu získanou z projektu SGS-2012-072 v rámci něhož vznikly publikované výsledky.

Ing. SEDLÁK Kamil, Západočeská univerzita v Plzni, FST KKE, 377 638 144,
sedlakk@kke.zcu.cz

VOREL Jaroslav, Západočeská univerzita v Plzni, FST KKE

Prof. Ing. LINHART Jiří, CSc., Západočeská univerzita v Plzni, FST KKE, 377 638 132,
linhart@kke.zcu.cz