

LOSSES IN TRANSITION SEGMENTS BETWEEN STAGES WITH DIFFERENT ADMISSION RATES

J. Polanský¹, L. Tajč², B. Rudas²

Summary: Are given the results of the calculation study of the streaming in the stage with different admission rates and in the chamber between grades (stages) with different admission rates. The work is basically premised on the clarification of processes in the axial turbine 2 stage with partial steam admission. There is being investigated the influence of the axial wall, rapidity relationships and the Mach number on the efficiency of the stage. The simulation of the non-stationary steam flow through the stage and the transition canal was carried out by means of 'CFD' methods. Are being described the losses that emerge in the transition segment between stages with different 'partiality'. Are being calculated pressure and velocity fields into the following stage. The knowledge of the probmematic will enable to lower the losses to make better use of the energy and to lower the endamagement of the environment.

Klíčová slova:

účinnost turbínového stupně, parciální ostřik, axiální turbínový stupeň, CFD

Častěji použitá označení:

ε	[-]	parciálnost	η_{10}	[-]	maximální účinnost
F	[m^2]	průtočná plocha			stupně pro totální ostřik
F_b	[m^2]	zakrytá plocha			a délku lopatek pro parciální ostřik
D_{rl}	[m]	patní průměr	η_{e0}	[-]	maximální účinnost stupně s parciálním ostříkem
d_a	[m]	osová vůle	η_1	[-]	účinnost stupně pro totální ostřik
M_{ST}	[-]	Machovo číslo stupně	d	[m]	vůle mezi stupni
M	[-]	místní Machovo číslo	α	[°]	vstupní úhel
b_l	[m]	tětiva	ϕ	[°]	úhel po obvodu stupně
u_{rl}	[m/s]	obvodová rychlosť na patním poloměru			
c_{ST}	[m/s]	rychlosť pro izoentropickou expanzi			

¹ Ing. Jiří Polanský, Ph.D.: Nové technologie – výzkumné centrum v západočeském regionu, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 301 00 Plzeň; e-mail: polansky@ntc.zcu.cz

² Ing. Ladislav Tajč, CSc., Ing. Bartoloměj Rudas: Škoda Energo s.r.o. , Plzeň

1. Úvod

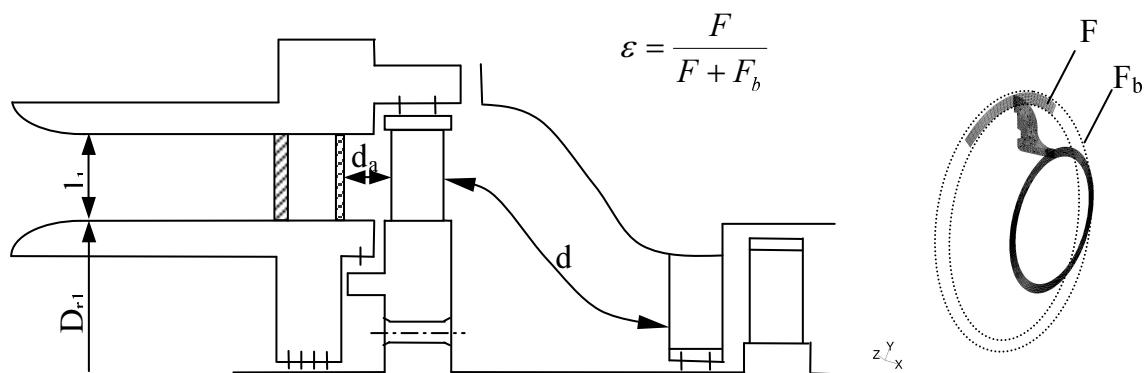
Parciální ostřik se vyskytuje zejména u regulačních stupňů. Při postupném otvírání jednotlivých dýzových segmentů se mění průtočná plocha a tím i parciálnost stupně. Při posuzování ztrát je důležitým parametrem parciálnost, která je definována jako poměr plochy otevřených segmentů k celému mezikruží, včetně zakrytých úseků.

Uskutečnil se rozsáhlý experimentální výzkum [1] a realizovalo mnoho výpočtových studií [2]. Experimentální parní turbína společnosti ŠKODA ENERGO, Plzeň umožňuje testovat turbinové stupně v měřítku 1:1. Výpočty se prováděly hlavně ve spolupráci se Západočeskou univerzitou v Plzni.

Ztráty ve stupni s parciálním přívodem závisí na větším počtu geometrických a provozních parametrech. To byl důvod, proč se experimenty uskutečnily při reálných provozních podmínkách. Jedině tak se může získat kompletní soubor informací o všech ztrátech ve stupni. Pro lepší porozumění jevů vyskytujících se ve stupni a v přechodovém úseku mezi aktivními a zakrytými segmenty rozváděcího kola a oběžným kolem, se provedly výpočty proudění [2]. Výpočtová studie se týká i ztrát v úseku mezi stupni s rozdílnou parciálností [3]. Soubor získaných poznatků vedl k přehodnocení vlivu geometrie stupně, parciálnosti, axiální vůle mezi koly, počtu zakrytých segmentů, Reynoldsova a Machova čísla rychlostního poměru, apod. na účinnost stupně a jeho optimální provedení.

2. Model turbinového stupně

Provedení turbinového stupně s parciálním přívodem páry je znázorněno na obr. 1



Obr. 1 Schéma regulačního stupně

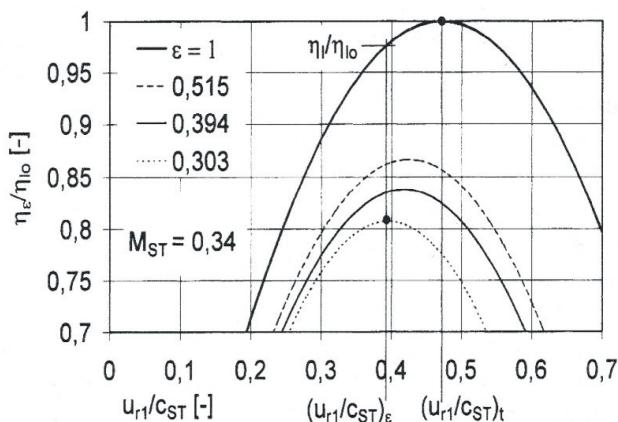
Na testovací turbíně společnosti ŠKODA ENERGO se mohla měnit parciálnost v rozsahu $\varepsilon = 0,4 \div 1$. Machovo číslo stupně se pohybovalo v rozsahu $M_{ST} = 0,55 \div 0,85$. Štíhlosť stupně byla $l_1 / b_1 = 0,39$. Pomocí experimentálního výzkumu se testoval vliv osové vůle na ztráty. Je zřejmé, že dodatečné ztráty vznikají přímo ve stupni s parciálním ostřikem, v přechodovém úseku a v důsledku nerovnoměrnosti proudu i v dalším stupni. Cílem výzkumného programu je optimalizovat provedení celého systému pro různou parciálnost a počty segmentů.

3. Výsledky experimentů

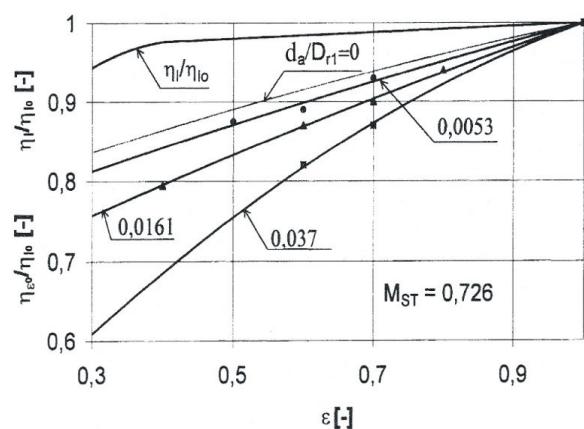
Ztráty ve stupni s parciálním ostříkem

Účinnost stupně s parciálním přívodem páry je odvozena od účinnosti stupně s totálním ostříkem. Při experimentech je délka lopatek konstantní. Mění se jen rozsah zakrytých úseků a jejich počet. Maximální účinnost se dosáhne pro jistou hodnotu rychlostního poměru (u_{r1} / c_{ST}). Tato hodnota závisí na ventilačních ztrátách a též na parciálnosti. V důsledku všech dodatečných ztrát účinnost klesá z η_{lo} na η_{eo} a optimální rychlostní poměr padá z hodnoty (u_{r1} / c_{ST})_t na (u_{r1} / c_{ST})_e. Je to znázorněno na obr. 2.

Kdyby se přídavné ztráty neuvažovaly, byla by účinnost aktivní části stupně, v důsledku neoptimální hodnoty rychlostního poměru, na úrovni η_1 . Vliv axiální vůle na účinnost stupně je vidět z diagramu na obr. 3.



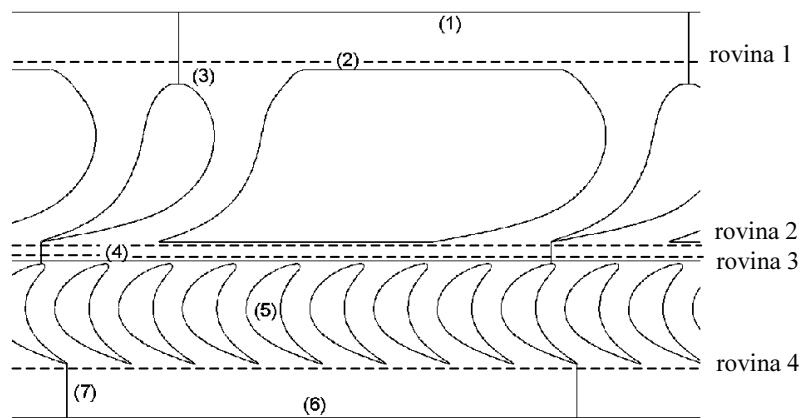
Obr. 2 Účinnost stupně s parciálním ostříkem



Obr. 3 Vliv axiální vůle na účinnost stupně

Jestliže se zvětšuje vůle mezi rozváděcím a oběžným kolem stupně dochází k úniku většího množství páry do prostoru za zakrytou část stupně, což vede k nárůstu směšovacích ztrát. K objasnění vzniku ztrát ve stupni s parciálním ostříkem přispívá i numerická simulace proudění. Provedla se výpočtová studie nestacionárního proudění na 2D modelu stupně [2]. Geometrie výpočtového modelu je totožná s geometrií lopatkování na středním průměru testovaného stupně. Výpočtová oblast je zobrazena na obr. 4. Zahrnuje vstupní část (1), neaktivní (2) a aktivní (3) část, přechodový úsek mezi pevnou a pohyblivou mříží tzv. interface (4), oběžnou mříží (5) a výstupní rovinu (6). Celou výpočtovou oblast uzavírá periodická okrajová podmínka (7).

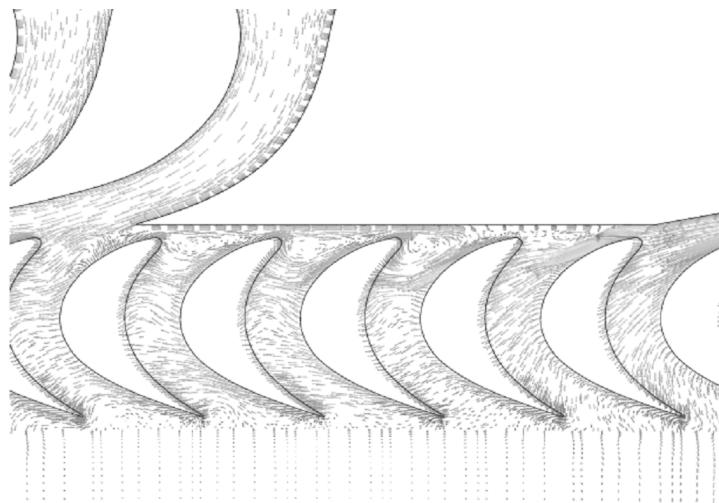
Matematický popis proudění je dán soustavou Navier – Stokesových rovnic pro turbulentní proudění stlačitelné, newtonské tekutiny. Soustava je doplněna stavovou rovnicí ideálního plynu. Celou soustavu pak uzavírají rovnice turbulentní vaznosti. Pro vlastní modelování turbulence je použito RNG k-ε modelu. Při řešení proudění v blízkosti profilu je využito Standard wall functions. Viskozita a měrné tepelné kapacity jsou uvažovány v celé výpočtové oblasti konstantní.



Obr. 4 Geometrie výpočtové oblasti a okrajové podmínky

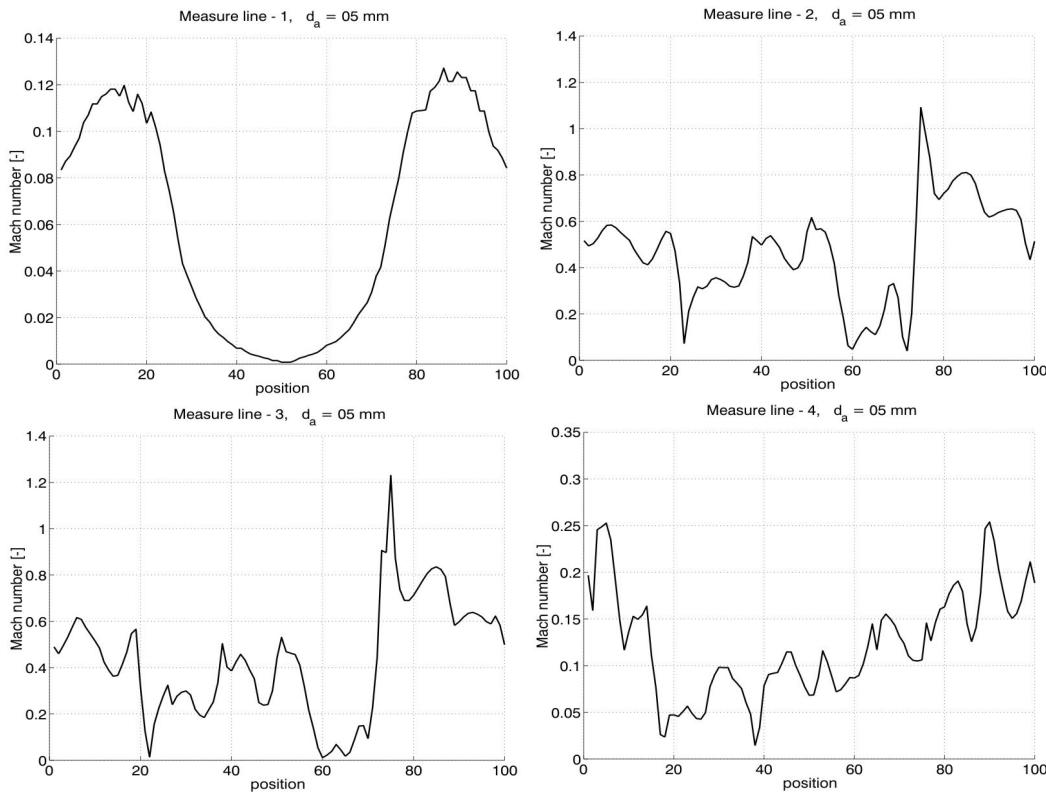
Uvažují se čtyři roviny pro popis výsledků výpočtů. Výpočtová studie se týká tří osových vůlí d_a . Z průběhu statického tlaku a Machova čísla v prostoru mezi pevnou a pohyblivou mříží jsou patrné anomálie v rychlostním poli stupně. Vznikají zde místa s prudkým poklesem tlaku resp. nárůstem rychlosti [4].

Na obr. 5 jsou ukázány vektory absolutní rychlosti pro osovou vůli $d_a = 5 \text{ mm}$ a poměr $u/c_{ST} = 0,38$. Jsou zde místa s maximálním urychlením a skokovou změnou parametrů. Ve stupni se objevuje odtržení proudu i zpětné proudění. V okamžiku přesunu oběžné lopatky do aktivní části stupně vzniká ejekční účinek a přisávání páry. Při výstupu z této oblasti se vytváří v lopatkovém kanálu oběžného kola Lavalova dýza s pohyblivou stěnou. Dýza je zdrojem urychlení páry, poklesu tlaku i periodických tlakových pulzací na oběžné lopatce.



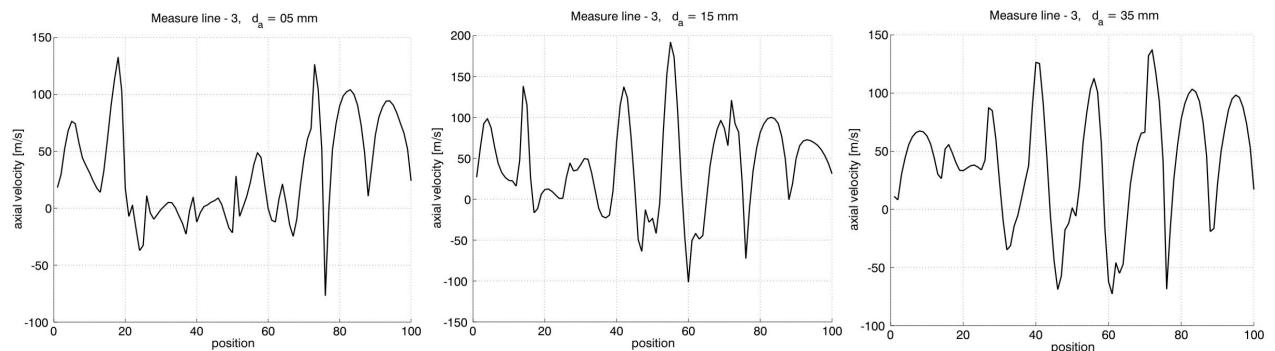
Obr. 5 Vektory rychlosti ve stupni, $d_a = 5 \text{ mm}$, $u/c_{ST} = 0,38$

Průběh Machova čísla pro jednotlivé uvažované roviny je zobrazen na obr. 6. Při totálním ostříku by Machovo číslo bylo vždy $M < 0,7$.

Obr. 6 Machovo číslo při $d_a = 5 \text{ mm}$, $u/c_{ST} = 0,38$

Zakrytí části lopatek vede k místnímu nárůstu až na $M = 1,8$. Je třeba si uvědomit, že se jedná o nestacionární proudění. Uvedené obrázky popisují pouze jeden z okamžiků vzájemné polohy obou mříží. Pro komplexní pochopení chování tekutiny při průtoku stupněm je zapotřebí vyhodnocovat proudové pole ve více časových krocích.

Jak se mění axiální rychlosť se změnou osové vůle v rovině 3 ukazují záznamy na obr.7.



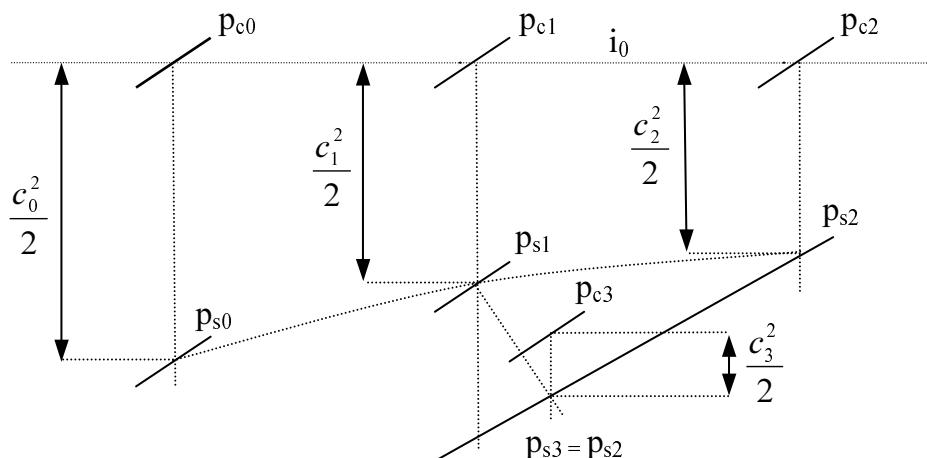
Obr. 7 Axiální rychlosť v jednom časovém okamžiku

V lopatkové části oběžného kola se vyskytují úseky se zápornou axiální složkou absolutní rychlosti. Při větší axiální vůli je nerovnoměrnost proudění větší. Kolísání rychlosti a tlaku vede k růstu energetické ztráty.

Ztráty v přechodovém úseku

Charakteristický tvar přechodové části je zobrazen na obr. 1. V přechodovém úseku se pára vystupující z oběžného kola rozvádí do následujícího stupně s menším patním poloměrem než jaký je u regulačního stupně. V tomto úseku se skokově mění průtočný průřez i stupeň rozšíření průtočné plochy. Pomocí výpočtové studie se posuzoval vliv délky kanálu na proudové poměry a na pokles tlaku v daném úseku.

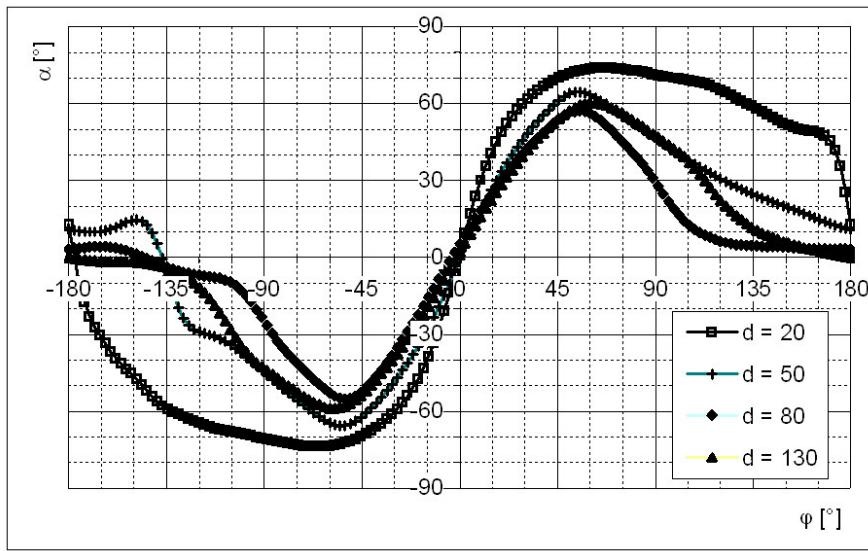
Na výstupu z přechodového úseku se uplatňuje sací efekt následných stupňů. Ve stupních dochází k expanzi a k poklesu tlaku. To zaručuje, že se po celém obvodu výstupní části odvádí pára. Proudové poměry budou na každém místě výstupního průřezu jiné. Pro popis proudění v zakřiveném kanálu nestačí zadat statický tlak na výstupu z tohoto úseku, ale statický tlak až za následným stupněm. Aby se expanze páry nemusela složitě popisovat pomocí lopatkové mříže, je pokles tlaku modelován škrcením v porézní vrstvě.



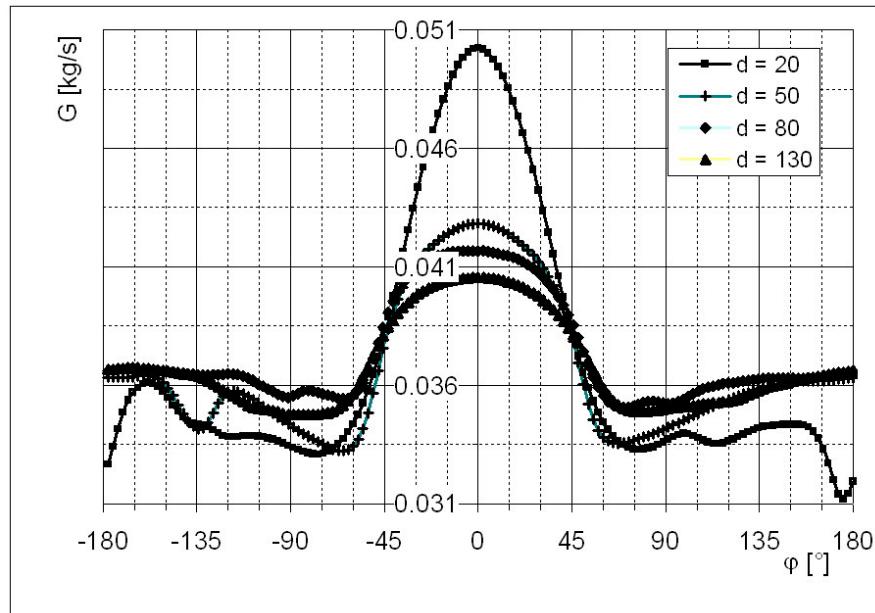
Obr. 8 Změna stavu páry v h-s diagramu

Změny stavu v h-s diagramu se nachází na obr. 8. Procesy v přechodové části se týkají stavu 0-1. Změna 1-3 popisuje poměry v lopatkové mříži a proces 1-2 se týká škrcení v porézní vrstvě. Výpočty ukazují, že existuje jistá délka kanálu, pro kterou vycházejí minimální ztráty. Pro větší délku, v důsledku třecích ztrát, celková ztráta jen nepatrně roste. Pro kratší úsek je narušení proudu výraznější a i ztráty jsou větší. Projevuje se to zejména v odklonu proudu od osového směru v místě vstupu do dalšího stupně. Je to vyznačeno na obr. 9. Úhel proudu do lopatkové mříže za přechodovým úsekem se může měnit až v rozmezí ± 70 deg.

Čím kratší je přechodový úsek, tím více páry proteče jen v úzkém rozmezí přechodového úseku. Větší vzdálenost napomáhá k zrovnomenění rozložení hmotnostního toku po obvodu stupně. Proudové poměry v přechodovém úseku mají zásadní vliv na ztráty v následném stupni.

Obr. 9 Průběh úhlu α po obvodu kola

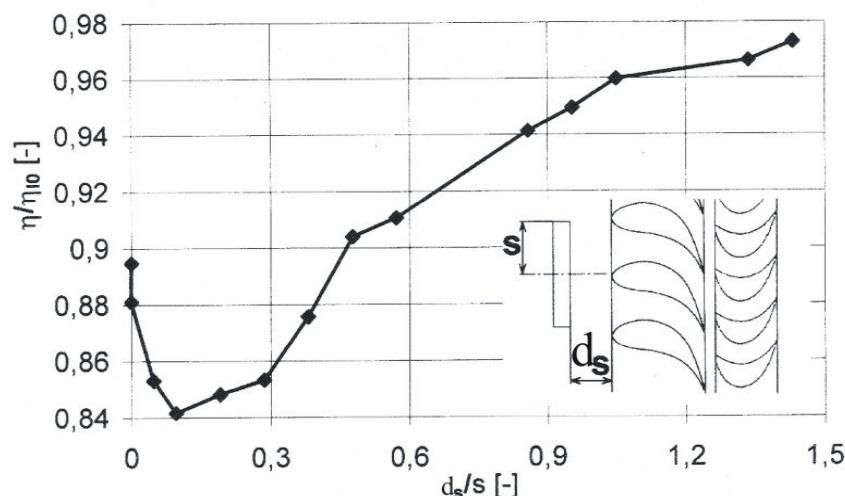
Rozdílné úhly α doprovází i změny statického tlaku a zejména pak nerovnoměrné rozložení hmotnostního toku páry. Ten je zobrazen na obr. 10.



Obr. 10 Rozložení hmotnostního toku po obvodu stupně

Ztráty ve stupni po stupni s parciálním ostříkem

Vliv nerovnoměrnosti proudu na ztrátách ve stupni za stupněm s parciálním ostříkem se vyšetřoval pomocí experimentu na modelové turbíně [5]. Postupně se měnila délka přechodového úseku. Při nulové vzdálenosti obou stupňů ($d_s = 0$) pracuje následný stupeň jako stupeň s parciálním ostříkem. Tím jsou definovány i ztráty ve stupni, tlakový poměr i hmotnostní tok. Od určité vzdálenosti by rychlostní profil v průřezu byl konstantní, tzn. ustálený a druhý stupeň v pořadí by začal pracovat s účinností pro totální ostřík a nenarušené proudové poměry na vstupu. Závislost účinnosti stupně na délce přechodové části ukazuje diagram na obr. 11.



Obr. 11 Vliv axiální vzdálenosti na účinnost stupně

Při malé axiální vůli se, v důsledku špatného plnění lopatkových kanálů umístěných za zakrytou částí stupně s parciálním ostříkem, ztráty zvětšují. Zlepšení účinnosti se dosáhne teprve až od jisté minimální axiální mezery. Poznatky potvrzují i některé publikované výpočty [6], [7].

4. Závěry

Axiální vzdálenost mezi rozváděcími a oběžnými lopatkami stupně s parciálním ostříkem má podstatný vliv na ztráty ve stupni.

Ve stupni vzniká Lavalova dýza s proměnným hrdlem a statickým tlakem. V oběžné mříži se vyskytuje transsonické i zpětné proudění. Optimalizace stupně s parciálním ostříkem závisí na jeho geometrii, parciálnosti, axiální vůli mezi koly, počtu zakrytých oblouků, Reynoldsově a Machově čísle stupně a rychlostním poměru u/c_{ST} .

Optimalizační proces se týká i návrhu přechodového úseku mezi stupni. Výsledná účinnost závisí na správné volbě počtu zakrytých segmentů a na vzdálenosti mezi stupni.

5. Poděkování

Článek vznikl s přispěním MŠMT v rámci projektu výzkumu a vývoje LN 00B084. Autoři rovněž děkují Grantové agentuře České republiky za finanční podporu, kterou obdrželi pro řešení grantu No 101/01/0449.

6. Použitá literatura

- [1] L. Tajč, J. Zelený, L. Bednář: Parciální ostřík axiálního stupně, Výzkumná zpráva VZ TP 0861, 1996
- [2] J. Polanský: Partial Steam Admission in an Axial Turbine Stage, PhD Thesis, 2001
- [3] L. Tajč, B. Rudas: Numerická studie vlivu několika parametrů na ztrátového součinitele, Výzkumná zpráva VZTP 0422, 2002
- [4] J. Škopek, J. Vomela, L. Tajč, J. Polanský: Partial Steam Admission, Third European Conference of Turbomachinery, C557/077/99, 1999
- [5] J. Vomela, J. Škopek, J. Kňourek: Spolupráce turbinových stupňů s parciálním ostříkem, Výzkumná zpráva ZČU, KKE-14, 01, 2001
- [6] L. He: Computation an Unsteady Flow through Steam Blade Row at Partial Admission, 2nd European Conference, Antwerpen, 1997
- [7] F. Dejean, H. Delabrier, J. Duplex: 2D Blade to Blade Analysis Applied to Steam Turbines Operating Under Partial Admission, 10th Conference on Steam and Gas Turbines, Karlovy Vary, 1994