

NEW POSSIBILITIES OF LABYRINTH SEALS STEAM FLOW LIMITATION

Ladislav Tajč^{*}, Bartoloměj Rudas^{*}

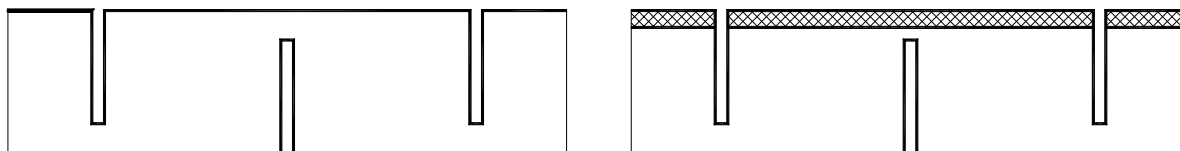
Summary: *The results from numerical simulation of flow in labyrinth seals with naturally or artificially manufactured grooves situated in front of strips are presented here. The mass flow with various geometrical parameters are kept in view. The CFD code FLUENT was used for numerical simulation.*

1. Úvod

Mezi tradiční konstrukční prvky parních turbín patří nadbandážové a hřídelové ucpávky. Zvyšování termodynamické účinnosti turbín znamená minimalizovat ztráty a úniky pracovní látky v ucpávkách. Ucpávky musí umožnit určitý rozsah vzájemného posuvu rotoru a statoru při spolehlivém provozu bez zadření břitů, lokálního přehřátí a ohybu hřídele. Průtok páry ucpávkou kromě základního geometrického uspořádání, vstupní teploty a tlaku, ovlivňuje zejména radiální vůle nad břitem. Tato skutečnost vede konstruktéry a návrháře snížit radiální vůli na minimální provozní hodnotu. Malá radiální vůle však zvyšuje riziko kontaktu rotoru se statorem. Jako řešení se nabízí opatření plochy nad břitem vrstvou vhodného, přijatelně měkkého materiálu, do kterého by se břity mohly při větším vyosení rotoru zaříznout. Teoreticky lze uvažovat i o umělém vytvoření zápichů. Cílem práce je ukázat, v kterých případech lze dosáhnout snížení úniku páry a kdy se naopak únik páry zvětší.

2. Uspořádání labyrintové ucpávky

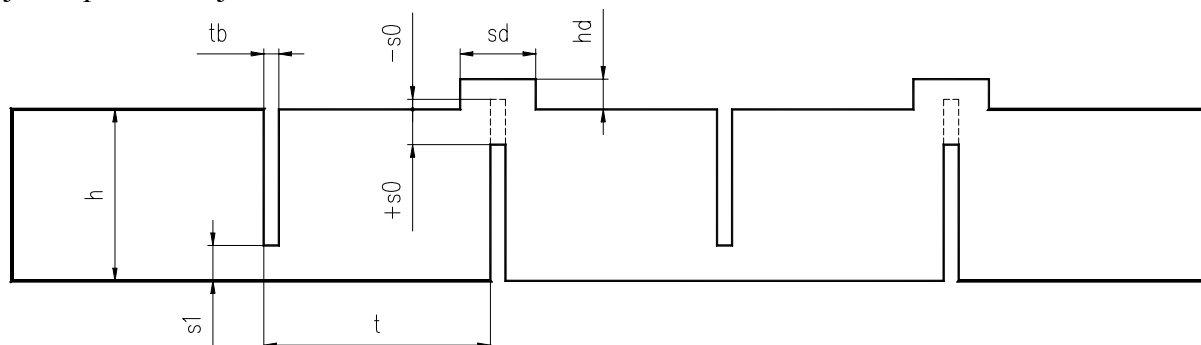
Charakteristické uspořádání pravého labyrintu je znázorněno na obr. 1. V jeho pravé části se pak nachází varianta s návarem „měkkého“ materiálu. Použití návaru umožňuje snížit velikost štěrbin na straně statoru na hodnoty, které by při tradičním uspořádání ucpávky již představovaly nepříjemně vysoké riziko. Použití menších štěrbin ale klade větší nároky na



Obr. 1: Schéma labyrintové ucpávky bez návaru a s návarem.

^{*} Ing. Ladislav Tajč, CSc., Ing. Bartoloměj Rudas: ŠKODA ENERGO s. r. o.; Tylova 57; 316 00 Plzeň; tel.: +420 378 135 967, fax: +420 378 135 385; e-mail: ladislav.tajc@skoda.cz

přesnost výroby a montáže a na tuhost konstrukce. Nestejná vůle nad břity statoru a rotoru se musí promítnout i do hmotnostního toku ucpávky. V případě kontaktu břitu s nanesenou vrstvou vznikne v měkkém materiálu drážka, kterou bude opět ve větší míře unikat pára. K posouzení různých variant konečného uspořádání ucpávky se zvolil výpočtový model, jehož provedení je znázorněno na obr. 2.



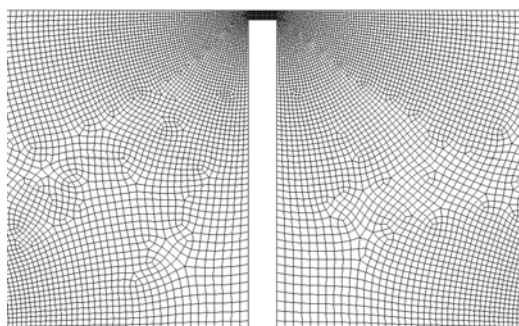
Obr. 2: Výpočtový model labyrintové ucpávky.

| parametr | význam | rozsah |
|----------|---------------------|--------------------------|
| h | výška ucpávky | 3,4 mm |
| t | rozteč břitů | 4,5 mm |
| tb | tloušťka břitů | 0,3 mm |
| s | štěrbina nad břitem | 0,1 – 0,7 mm |
| hd | hloubka drážky | 0; 0,1; 0,3; 0,6 mm |
| sd | šířka drážky | 0; 0,5; 0,7; 0,9; 1,5 mm |

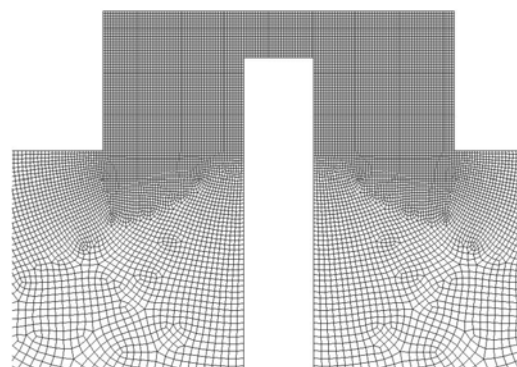
Výška ucpávky, rozteč a tloušťka břitů pro všechny varianty zůstaly konstantní. Jako měnící se parametry byly zvoleny štěrba nad břitem na straně rotoru (s_1) a statoru (s_0), šířka (sd) a hloubka drážky (hd) nad břitem.

Jednotlivé varianty ucpávek byly spočteny numericky pomocí výpočtového programu FLUENT. Okrajové podmínky byly zvoleny jako modelový případ s atmosférickým tlakem na vstupu a podtlakem na výstupu. Tekutina byla modelována jako stlačitelná ideální vodní pára.

Detaily výpočtových sítí jsou znázorněny na následujících obrázcích. Na obr. 3 je znázorněna síť ucpávky bez drážky.



Obr. 3: Detail sítě ucpávky bez drážky.

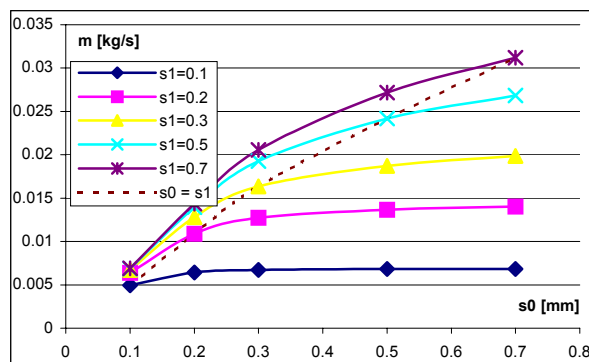


Obr. 4: Detail sítě v drážce s utopeným břitem.

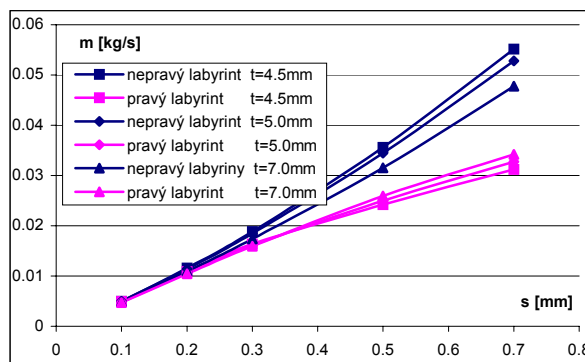
Aby bylo vystiženo proudění dostatečně i v šterbině nad břitem, bylo nutné výpočtovou síť kolem šterbiny a uvnitř ní dostatečně zahustit. Na obr. 4 je znázorněn detail výpočtové sítě v drážce s utopeným břitem. Počet buněk se pohyboval v relativně širokém rozmezí (cca. 40 000 – 110 000). Úkoly byly řešeny implicitním řešičem, který umožňoval poměrně rychlou konvergenci výpočtů u všech variant. Při výpočtech byly sledovány kromě reziduí také rozdíl hmotnostních toků na vstupu a výstupu a ustálenost absolutní hodnoty hmotnostního toku. Při výpočtech se posuzovalo více než 300 variant uspořádání ucpávky.

3. Výsledky výpočtů

Aby bylo možné posoudit kvalitu nových provedení ucpávek, musí se stanovit proudové poměry u tradičního uspořádání pravého a nepravého labyrintu. Vliv rozdílné vůle nad břity u statoru a rotoru je podchycen na diagramu na obr. 5. Je-li na rotoru a statoru stejná vůle, je



Obr. 5: Vliv vůlí nad břity pravého labyrintu

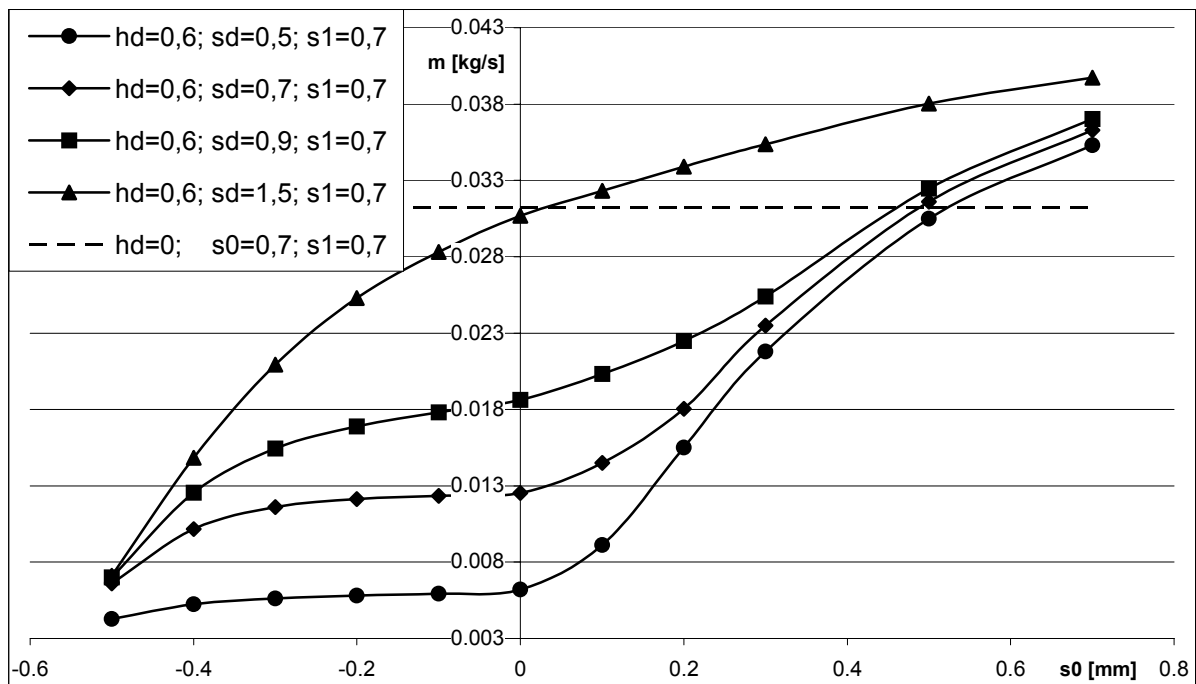


Obr. 6: Porovnání pravého a nepravého labyrintu

hmotnostní tok ucpávkou přibližně lineární funkcí příslušné vůle. Zmenšování vůle nad rotorovými břity vede ke snížení toku páry. Tato závislost je však nelineární. Pro každou vůli na straně rotoru existuje vůle na straně statoru, kdy zvětšování statorové vůle neovlivňuje hmotnostní tok ucpávkou. Je-li např. vůle na rotoru $s_1=0,1$ mm, vůle $s_0>0,3$ na statoru již nemá vliv na průtok páry labyrintem. Je málo pravděpodobné, že by se tak malé vůle v praxi uplatnily. Spíše lze očekávat kombinaci $s_1=0,7$ a $s_0=0,3$ mm, kdy se sníží průtok páry ucpávkou o 1/3.

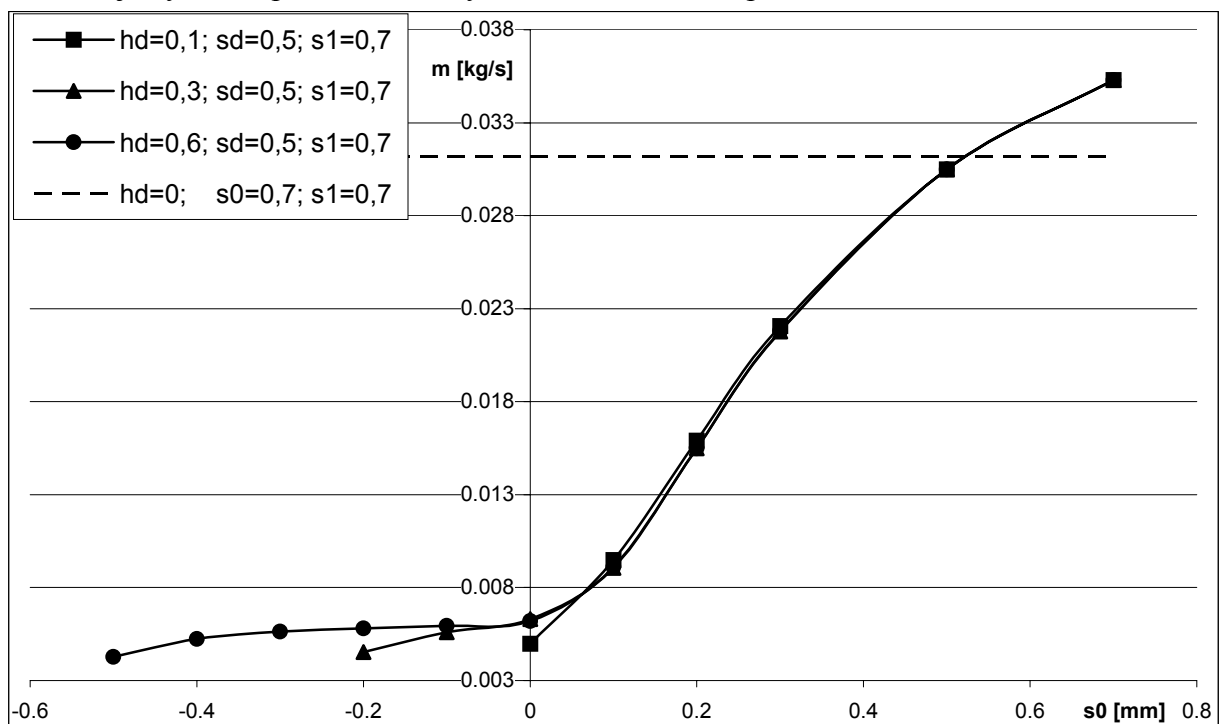
Nepravým labyrintem protéká vždy větší množství páry než pravým labyrintem. Jsou-li však použity vůle nad břity menší než 0,2 mm, jak ukazuje obr. 6, je rozdíl mezi kvalitou pravého a nepravého labyrintu nepodstatný. V případě zařiznutí břitu do měkkého návaru se vůle i hmotnostní tok zvětší. Z tohoto důvodu je vhodnější i při použití velmi malých vůlí aplikovat pravý labyrint. Pro posouzení různých provedení ucpávek se zápichy i bez nich se za základ zvolilo uspořádání s $s_1=s_0=0,7$ mm.

Vliv drážky uměle vytvořené, nebo vzniklé za provozu je podchycen na obr. 7. Hloubka zápichu i vůle na rotoru se uvažuje pro všechny případy stejná. V obr. 7 je čárkovaně vyznačena hranice, která vymezuje oblast s lepšími výsledky než výchozí varianta. Ukazuje se, že šířka drážky má výrazný vliv na průtok páry ucpávkou. Pro nulovou vůli vůči základnímu obrysu statoru $s_0=0$ ($hd=0,6$) nesmí šířka drážky překročit míru $sd=1,5$ mm. Je-li šířka drážky větší, je třeba použít zapuštěný břit a menší vůle nad břitem.

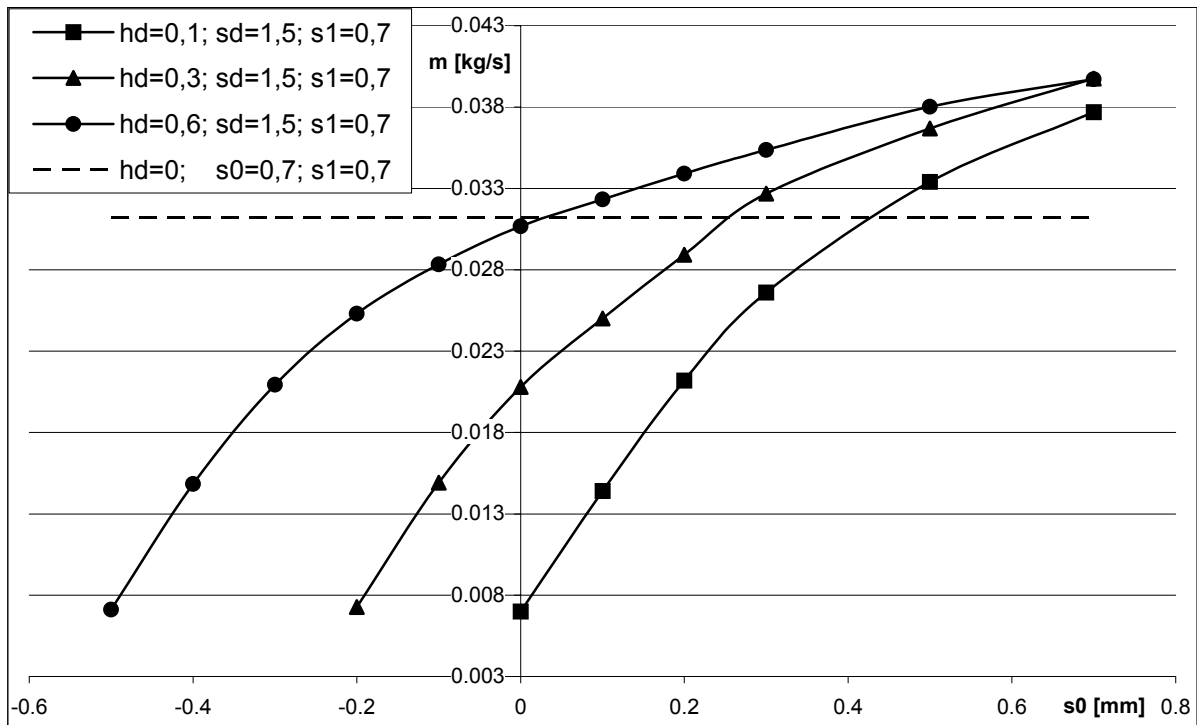


Obr. 7: Vliv šířky drážky na průtok ucpávkou ($hd=0,6$; $s1=0,7$)

Jaký vliv má hloubka zápichu na proudové poměry v ucpávce ukazuje obr. 8 a 9. Diagram na obr. 8 je vytvořen pro šířku drážky $sd=0,5$ mm a obr. 9 pro šířku $sd=1,5$ mm. Je-li drážka

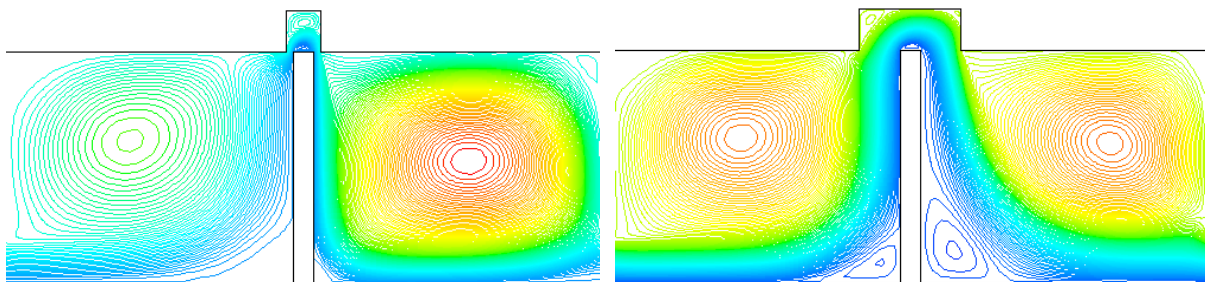


Obr. 8: Vliv hloubky drážky na hmotnostní tok ucpávkou s relativně úzkou drážkou ($sd=0,5$; $s1=0,7$)



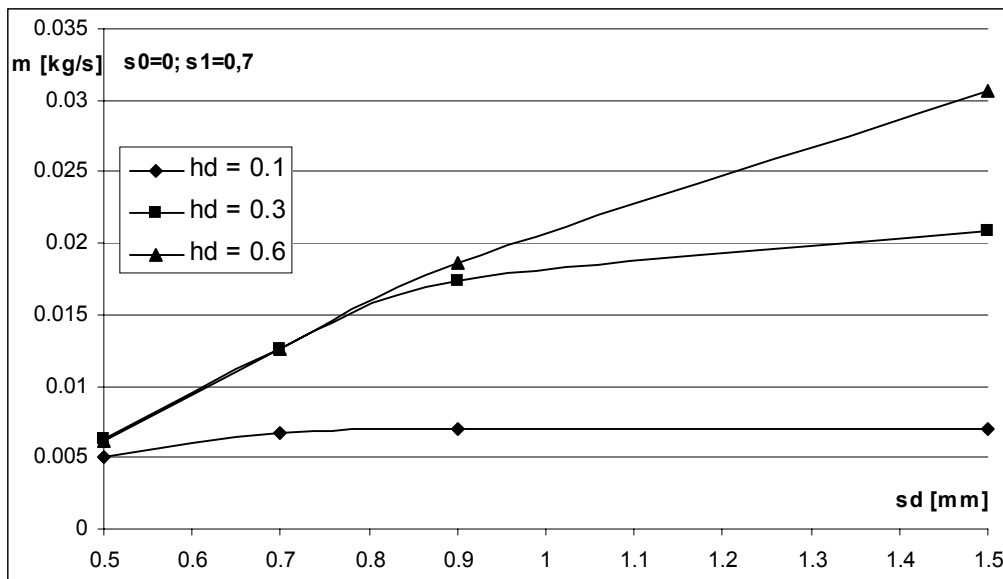
Obr. 9: Vliv hloubky drážky na hmotnostní tok ucpávkou s relativně širokou drážkou ($sd=1,5; s1=0,7$)

úzká, může se dosáhnout velmi výrazného snížení hmotnostního toku ucpávkou. V takovém případě nezáleží na hloubce zápichu, ale jen na vůli s_0 . V případě širší drážky je situace zcela jiná. Aby se při $s_0=0$ dosáhlo lepších výsledků než u výchozí varianty, musela by být hloubka zápichu $hd < 0,6$ nebo by se musela nastavit alternativa se zápornou vůlí s_0 . Znovu se potvrzuje, že šířka drážky má zásadní vliv na proudové poměry v okolí břítu ucpávky. Je to dobře patrné i z obr. 10. Vždy záleží na minimální průtočné ploše, která se v okolí břítu vytvoří. V průběhu provozu turbíny se asi nepodaří udržet ostré hrany zápichu. Pak se minimální průtočná plocha a tím i hmotnostní tok zvětší i v případě úzké štěrbině.



Obr. 10: Proudění ucpávkou s rozdílnou šířkou zápichu

Shrnutí dosažených poznatků je znázorněno na diagramu v obr. 11. Z grafu je patrné, že vliv šířky drážky na únik páry je výraznější než vliv hloubky. Je-li však hloubka drážky malá, pak šířka zápichu již neovlivňuje únik páry ucpávkou. Souvisí to se zmenšením průtočné plochy v ucpávce.



Obr. 11: Vliv tloušťky a šířky drážky na průtok páry ucpávkou

4. Závěr

- Aplikace nánosu “měkkého” materiálu na statorovou část ucpávky umožňuje zmenšit provozní vůle nad břity bez rizika zadření a poškození rotoru. Minimální provozní vůle vždy umožní snížit a omezit průtok páry ucpávkou na nejmenší možnou hodnotu.
- Největší vliv na průtočné množství páry má jednoznačně šterbina nad břitem, šířka drážky má mnohem větší vliv na průtočné množství páry ucpávkou než hloubka drážky.
- Vždy je vhodnější používat pravý labyrint než nepravý labyrint.

5. Poděkování

Výzkumnou práci podpořila Grantová agentura České republiky grantem 101/02/0647. Práce vznikla rovněž s přispěním MŠMT v rámci projektu výzkumu a vývoje LN00B084.

6. Literatura

- B. Rudas, L. Tajč (2003) Průtok páry labyrintovými ucpávkami. Výzkumná zpráva VZTP 0939.
- M. Šťastný (1996) Predikce účinnosti osových turbínových stupňů, Výzkumná zpráva VZTP 0861.
- Fluent 6 User's Guide 1-5 (2001) Fluent Incorporated, December.