

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení



Petr Novák

**Numerické modelování interakce volného proudu
s komplikovanou porézní stěnou**

**Numerical modelling of an interaction of a free air flow
with complicated porous wall**

Vedoucí práce : Doc. Ing. Karel Adámek, Csc.
VÚTS Liberec

Konzultant : RNDr. Jaroslav Pelant, Csc.
VZLÚ Praha

Rozsah práce:

Počet stran: 56

Počet obrázků: 36

Počet tabulek: 1

Počet grafů: 4

Počet příloh: 1

Liberec 2001

ANOTACE: Diplomová práce se zabývá 3D modelováním interakce volného proudu s komplikovanou porézní stěnou (aplikace na tryskových tkacích strojích) s pomocí 3D softwaru Aper. Byly namodelovány čtyři alternativy tkacích prohozních kanálů. Výsledky jsou uvedeny graficky ve formě podélných a příčných rychlostních polí.

ANNOTATION: This thesis deals with the three-dimensional modelling of an interaction of a free air flow with complicated porous wall (application on jet-weaving machines) with the help of the three-dimensional software Aper. Four alternatives of reed channels have been modelled. The results are presented graphically using the longitudinal and diagonal speed field.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra energetických zařízení

Studijní rok: 2000/2001

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Petr Novák

obor

23 - 17 - 8 Konstrukce strojů a zařízení

zaměření

Tepelná technika

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

**Numerické modelování interakce volného proudu s komplikovanou porézní stěnou
(aplikace na vzduchových tryskových tkacích strojích)**

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Rešeršní část: teorie volných proudů, přístěnný proud, interakce rozlehlého proudu s konstrukčními elementy porézní stěny, princip tryskového tkaní.
2. Numerické modelování: s pomocí dodaného 3D programu modelovat interakci volného proudu ze vzduchové trysky s několika konstrukčními variantami daného systému prohozního kanálu tkacího stroje.
3. Vyhodnocení výsledků: grafické znázornění obrazů proudových polí ve významných rovinných řezech řešenou oblastí, diskuse výsledků.
4. Řešené varianty: standardní provedení – vynechaná spodní stěna – vzdálená tryska.

KEZ/TT
56 A

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: 50 stran
- grafické práce: asi 20 stran

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

Teorie volných proudů (Abramovič, Schlichting, ...)

Adámek, K.: Vlivy konstrukčních parametrů tkacího paprsku na obraz proudění v prohozním kanálu – zpráva VÚTS Liberec, 2000

Adámek, K.: Tkací paprsek Vega, zpráva VÚST Liberec, 2000

Pelant, J. : Metoda druhého řádu pro proudění v lamelových kanálech tryskového stavu, zpráva VZLÚ Praha, 2000

Pelant, J. : Rukopis manuálu k programu, Praha 2000

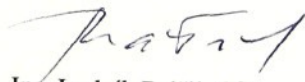
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Karel Adámek, CSc.
(TU Liberec)

Konzultant diplomové práce: RNDr. Jaroslav Pelant, CSc.

Pozn.: Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.


Doc. Ing. Jiří Unger, CSc.
vedoucí katedry




Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.
děkan

V Liberci dne

23. 11. 2000

Rád bych poděkoval panu Doc. Ing. Karlu Adámkovi, CSc. za podnětné připomínky, za poskytnutou odbornou literaturu a organizační vedení diplomové práce. Dále pak děkuji panu RNDr. Jaroslavu Pelantovi, Csc., taktéž za podnětné připomínky a poskytnutou literaturu.

Prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

Datum:24.5.2001.....

Podpis:Nora'.....

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném využití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Datum:24.5.2001.....

Podpis:Nemal.....

Obsah

- 1. Úvod..... 9
- 2. Tkací stroje – současný stav techniky..... 10
- 3. Teorie volných proudů 13
 - 3.1. Průběh rychlosti proudu.....15
 - 3.2. Vliv pomocných trysek na hlavní proud..... 18
 - 3.3. Přístěnný proud.....19
- 4. Důvody numerického modelování..... 20
 - 4.1. Vlivy konstrukčních elementů na výsledné proudění..... 21
 - 4.2. Sledované konstrukční parametry.....21
 - 4.2.1. Vliv zaplnění stěny a rozteče lamel..... 21
 - 4.2.2. Vliv tvaru hrany lamel..... 22
 - 4.2.3. Vliv úhlu náběhu proudu..... 23
- 5. Vlastní řešení - numerické modelování..... 23
 - 5.1. Použitý 3D program.....24
 - 5.2. Tvorba modelu..... 24
 - 5.2.1. Geometrie a síť – společné prvky všech řešených modelů.....25
 - 5.2.2. Termodynamické a okrajové podmínky..... 26
 - 5.2.3. Vyjádření 3D výsledků..... 28
 - 5.3. Vlastní modelování.....28
 - 5.3.1. Standardní provedení..... 29
 - 5.3.1.1. Geometrie a síť – specifika provedení..... 29
 - 5.3.1.2. Výsledky..... 29
 - 5.3.1.3. Vyhodnocení..... 34
 - 5.3.2. Provedení s vynechanou spodní stěnou..... 34
 - 5.3.2.1. Geometrie a síť – specifika provedení..... 35
 - 5.3.2.2. Výsledky..... 35
 - 5.3.2.3. Vyhodnocení.....39
 - 5.3.3. Provedení s oddálenou tryskou.....40
 - 5.3.3.1. Geometrie a síť – specifika provedení..... 40

5.3.3.2. Výsledky.....	40
5.3.3.3. Vyhodnocení.....	44
5.3.4. Provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky.....	44
5.3.4.1. Geometrie a síť – specifika provedení.....	45
5.3.4.2. Výsledky.....	45
5.3.4.3. Vyhodnocení.....	49
5.4. Celkové vyhodnocení.....	50
6. Závěr.....	55
7. Použitá literatura.....	56
8. Seznam příloh.....	56

Přehled označení

R	poloměr	m
T	termodynamická teplota	K
V	objem	m ³
a	součinitel vířivosti	l
a [*]	kritická rychlost	m/s
l	délka	m
n	otáčky	ot./min.
v, w	rychlost	m/s
p	tlak	Pa
λ	bezrozměrná rychlost	l

Indexy

m	pro maximální hodnoty
x	pro složky osy x
y	pro složky osy y
o	pro počáteční hodnoty



1. Úvod

Cílem této práce je numerické modelování interakce volného proudu s komplikovanou porézní (lamelovou) stěnou v prostoru. Navazuje na předchozí dvojrozměrné (rovinné) modelování proudění v prohozním systému tryskových tkacích strojů prováděné na VÚTS Liberec. Řeší čtyři konstrukční varianty tvaru tkacího kanálu:

- 1) standardní provedení,
- 2) provedení s vynechanou spodní stěnou,
- 3) provedení s oddálenou tryskou a
- 4) provedení s vynechanou spodní stěnou a změnou sklonu trysky (tato varianta je oproti zadání řešena navíc).

Cílem je tyto varianty numericky namodelovat pro možnost dalšího určení co nejrychlejšího a nejrovnoměrnějšího rychlostního pole. Dosažení takových vlastností rychlostního pole je důležitým předpokladem pro rychlý, spolehlivý a hospodárný transport útkové nitě prohozním kanálem pomocí proudu vzduchu.

Modely kanálu musí být zjednodušeny, jak tvar lamely a ústí trysky, tak i okrajové a počáteční podmínky, neboť výpočet opravdu reálného modelu by byl časově velmi náročný. Obecné řešení přenosu hybnosti z proudu plynu na transportovaný lineární útvar není v současné době řešitelné. Výsledná proudová pole tak slouží jen pro kvalifikovaný odhad očekávaného silového působení proudu.

Řešení je prováděno ve 3D programu APER. Tento software byl vyvinut speciálně pro prostorový výpočet interakce volného proudu s lamelovou stěnou. Součástí práce je také testování a ladění úlohy v dodaném softwaru, což je jednoznačně časově nejnáročnější částí práce.

Výsledky práce byly prezentovány na 4. semináři „Euler and Navier – Stokes Equations“, který se konal v květnu 2001 na Ústavu Termomechaniky v Praze.

2. Tkací stroje – současný stav techniky

V České republice není v současné době prakticky jediný výrobce textilních tkacích strojů. Posledním výrobcem u nás byl v roce 1999 Trustfin Praha. Nyní se vyrábí jen menší série speciálních strojů.

Jednotlivé technologie výroby tkanin se navzájem odlišují. Od zastaralých člunků se již upustilo a v současné době jsou převážně vyráběny tkací stroje pracující na třech různých principech.

Prvním je tkaní projektilové (skřipcové), které uděluje hybnost útkové niti ve vodícím kanálu pomocí projektilu na konci vlákna (tzv. útek). Nevýhodou této metody jsou větší silové účinky na vlákno, neboť k vlastní hmotnosti vlákna musíme přičíst ještě hmotnost projektilu. Z toho plynou omezení pro rychlost výroby tkanin.

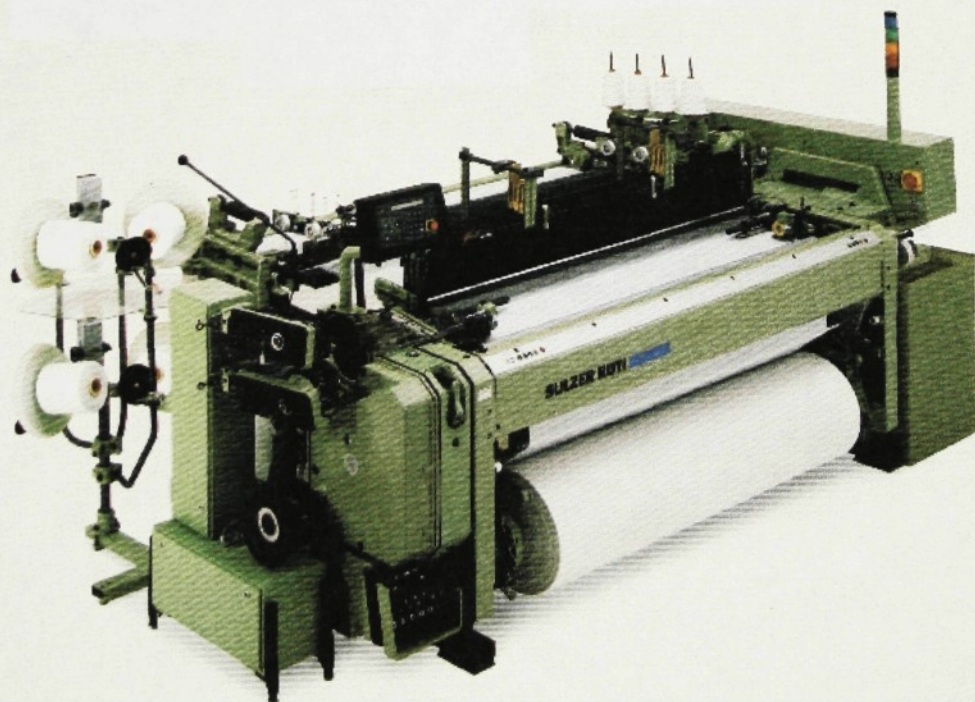
Druhým principem je tkaní pomocí jehel, kdy jsou z obou konců stroje současně vysunuty jehly, avšak jen jedna má na sobě uchyceno vlákno. V polovině cesty si vlákno navzájem předají a vracejí se zpět. Silové účinky jsou srovnatelné s první metodou, a proto stále představují pro výrobu určité rychlostní a pevnostní omezení.

Třetím principem, nejprogresivnějším a nejspíše nejperspektivnějším, je tryskové tkaní (**obr.2-1**). Vlákno je poháněno pouze proudem vzduchu, a tak se zde neprojevují žádné další silové účinky, než od vlastní váhy vlákna. Tím je možné zrychlit výrobu na současné maximum, neboť se zvýší rychlost prohozu útku, zjednoduší se obsluha, zkrátí se časy na seřízení, sníží se odpad, hluk a vibrace strojů. Předchozí dvě metody mají omezení dynamická, zde je nejdůležitějším omezením výroby rychlost proudu (snahou je, aby byla co nejvyšší) a pevnost vlákna. Rychlost proudu vzduchu na výstupu z trysky je maximálně kritická (tj. kolem 300 m/s), v kanálu poklesne přibližně na 100 m/s a účinkem proudu je rychlost útku maximálně 50-65 m/s. Rychlost proudu v prohozním kanálu zároveň nesmí způsobit nadměrné namáhání vlákna tak, aby se později zkracovalo a deformovalo výrobek. Pro těžká vlákna (kobercovina, stavební izolace) se používají stroje až 4,5 m široké, provozní otáčky jsou kolem

450 ot./min (max. rychlost útku 65 m/s). Šířka strojů pro lehké textilie (košilovina) je 1,5 až 1,9 metrů. Provozní otáčky jsou tu běžně 800 ot./min, pro špičkové stroje až 1 200 ot./min (max. rychlost útku 40 m/s).

Princip tryskového tkaní je následující: tzv. hlavní tryska (**obr.2-2**) na principu ejektoru nasává předem odměřené vlákno a vyfukuje jej proudem vzduchu do lamelového prohozního kanálu. Podél osy kanálu jsou v pravidelných roztečích 60–80 mm rozmístěny tzv. pomocné trysky (**obr.2-3**), které udržují rychlost v kanálu na potřebné hodnotě a tím pohánějí vlákno na konec kanálu, kde je zachyceno a jeho konec je odstřižen. Stroj je ovládán elektronicky pomocí počítače a jeho provoz je tím prakticky bezobslužný.

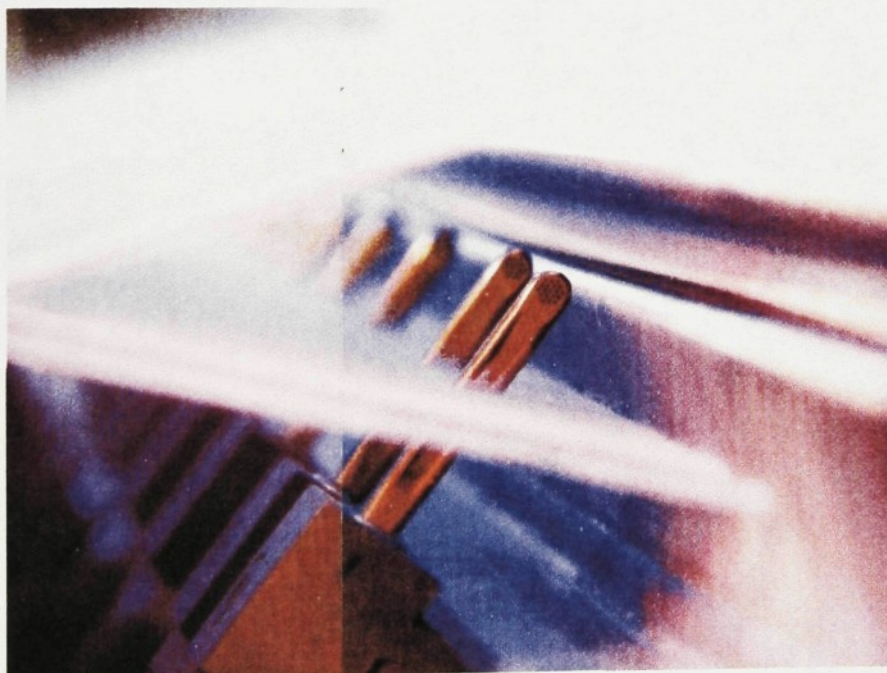
Mezi světoznámé výrobce tryskových tkacích strojů patří např. belgická firma Picanol, v Itálii pak firma Somet, dále švýcarský Sulzer (ohlásil prodej divize „Textil“), německý Dornier a japonské společnosti Yamaha a Tsudakoma. Na výrobu prohozních kanálů se specializuje francouzská firma Burckle (**obr.2-4**). Každé čtyři roky se v Evropě koná výstava textilních strojů ITMA, naposledy pořádaná v roce 1999 v Paříži.



obr.2-1. Tryskový tkací stroj švýcarské firmy Sulzer



obr.2-2. Tryskový tkací stroj – hlavní tryska, kanál, pomocné trysky
(pohled ze strany vstupu)



obr.2-3. Pomocné trysky v prohozním kanálu (tzv. víceotvorové)
(pohled ze strany výstupu)



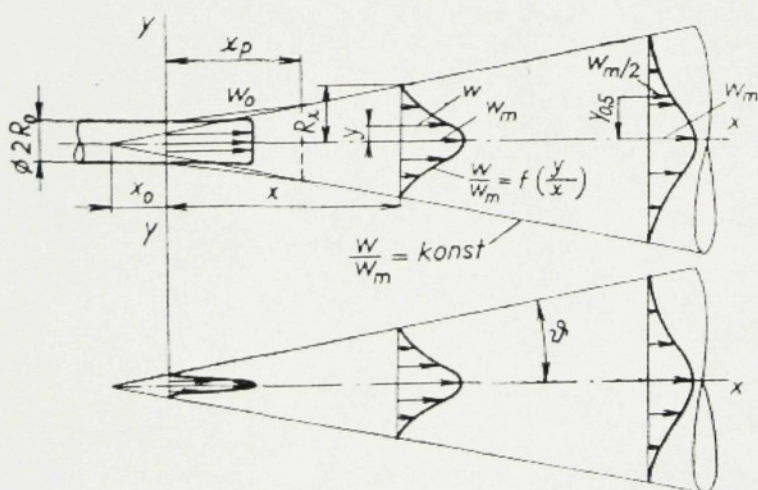
obr.2-4. Prohozní kanál od firmy Burckle

3. Teorie volných proudů

Proudění z trysek do otevřeného prostoru, jako je tomu v našem případě, podléhá teorii volných proudů. Mezi nejznámější odborníky, kteří se výzkumem volných proudů zabývali patří G.N. Abramovič [1] a H. Schlichting [8], dále pak ruští vědci Talijev a Šepelev. Nejprve si však pojem volný proud definujme. Proud je volný (dříve používán pojem „otevřený“), když není omezen tuhými stěnami a šíří-li se v prostředí stejných fyzikálních vlastností jako je jeho podstata [1]. Tyto podmínky jsou v našem případě splněny, neboť proudícím médiem je vzduch, který proudí do okolí, které je rovněž tvořeno vzduchem. Stejně tak proud není omezen tuhými stěnami, od hrdla trysky až po vstup do prohozního kanálu.

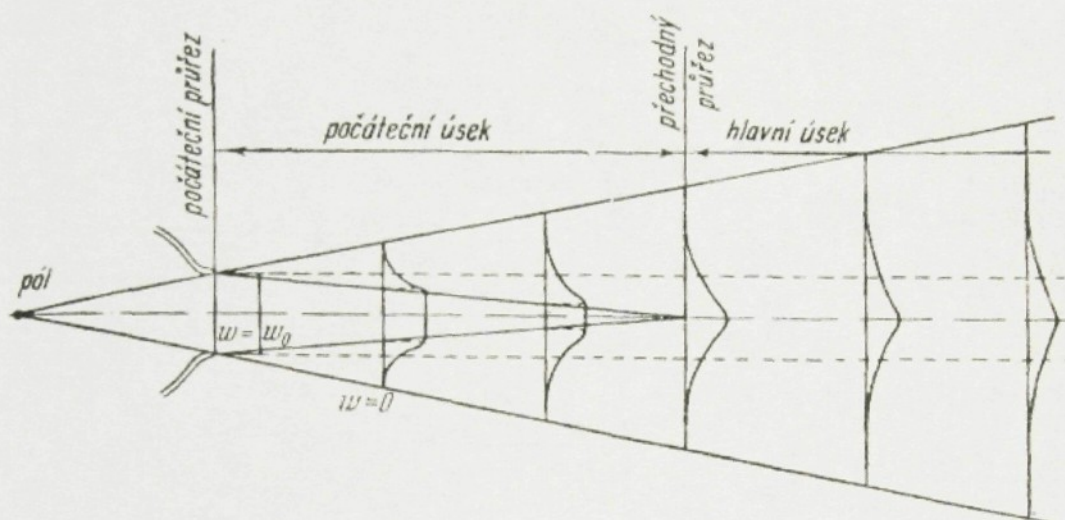
Obyčejně je proud turbulentním, tj. vířící hmoty se v něm pohybují nepravidelně. Pronikají při svém příčném pohybu za hranice proudu, vnášejí do přiléhajících nepohybujících se vrstev tekutiny (kapaliny či plynu) své impulsy a unášejí je. Místo částic, které byly vypuzeny z proudu, vnikají do něho částice z obklopující tekutiny a přibrzdíují hraniční vrstvy proudu. Tak vzniká výměna hmoty mezi proudem a nepohybující se okolní tekutinou, čímž celková hmota proudu roste, jeho šířka se zvětšuje a rychlosti na jeho hranici ubývá (obr.3-1).

Přibržděné částice aktivního proudu spolu s částicemi obklopující tekutiny vytvářejí turbulentní slučovací (původně mezní) vrstvu. Její tloušťka ve směru proudění vzrůstá. Jsou-li ve výtokovém průřezu hrdla trysky rychlosti rozděleny stejnoměrně, rovná se na začátku proudu tloušťka slučovací vrstvy nule. Hranice oblasti proudu pak vlastně představují rozbíhající se plochy (povrchy), které se protínají na hranách výtoku z trysky. Z vnější strany se oblast proudu stýká s nepohybující se tekutinou. Vnější hranici rozumíme plochu (povrch proudu), v jejímž každém bodě je složka rychlosti, rovnoběžná s osou proudu, rovna nule. Na vnitřní straně přechází oblast proudu těsně za ústím do jádra s konstantní rychlostí. Proto se na vnitřní straně oblasti proudu bude rychlost nenarušeného proudu rovnat rychlosti proudění. Vzdalováním od hrdla trysky a také zesilováním slučovací vrstvy se zužuje jádro nenarušeného proudu, jenž má konstantní rychlost, takže v určité vzdálenosti zcela mizí.



Obr. 3-1. Teoretické schéma volného proudu

V dalším úseku proudu již slučovací vrstva zaplňuje celý průřez, neboť se prostírá až k jeho ose. Slábnutí proudu doprovází nejen jeho rozšiřování, ale též snižování rychlosti v jeho ose (**obr.3-2**).



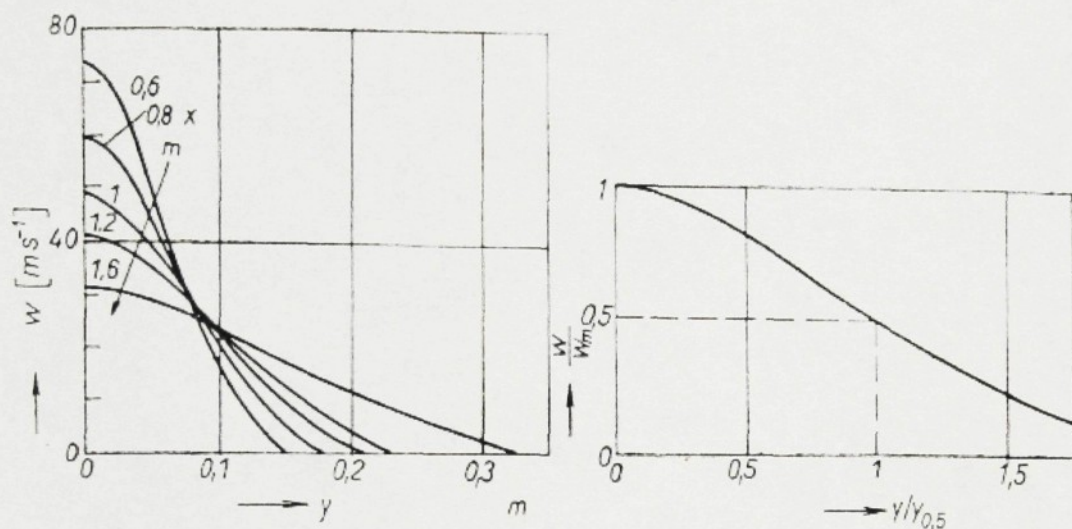
Obr.3-2. Rychlostní profil podél osy volného proudu

Průřez proudu, ve kterém končí jádro konstantní rychlosti, je nazýván *přechodným*. Úsek mezi výtokem z trysky a přechodným průřezem je *počáteční* (dochází k zániku jádra proudu), za ním je pak úsek *hlavní*. Průsečík vnějších hranic proudu se nazývá *pólem proudu* [1].

3.1. Průběh rychlosti proudu

Charakteristickou zvláštností volného proudu, jak podle teorie tak podle praktických poznatků velkého počtu zkoušek, jsou malé příčné složky rychlosti v porovnání se složkami podélnými a to v libovolném průřezu. Jestliže ztotožníme osu x s osou souměrnosti proudu, pak budou složky rychlosti w_y tak malé, že je můžeme zanedbat ve všech užitých teoriích. Počítáme jen se složkou rychlosti proudu w_x (můžeme psát $w \approx w_x$). Tento předpoklad potvrdil Trüpel ve svých výzkumech o rozložení rychlostí v různých průřezích proudu. Jeho práce svědčí o plynulé deformaci profilu rychlostí podél proudu. Čím dále od počátku proudu, tím nižší a širší je profil rychlostí zvoleného průřezu.

K tomuto závěru dojdeme, jestliže sestrojíme obraz rychlostního pole v absolutních souřadnicích (w, y) (**obr.3-3**).



Obr.3-3. Rychlostní pole v absolutních a bezrozměrných souřadnicích

Zajímavější výsledky získáme, jestliže vyneseme též pole v bezrozměrných souřadnicích. Místo absolutních hodnot rychlostí w vynášíme poměr $\frac{w}{w_m}$ a místo absolutních hodnot vzdálenosti od osy proudu y jejich poměr ke vzdálenostem od osy těch bodů, u kterých je rychlost poloviční vůči rychlosti v ose $\frac{y}{y_{0.5w_m}}$ (také **obr.3-3**). Získaný diagram nám ukazuje úplnou podobnost ve všech průřezích hlavního úseku proudu. Tato podobnost spočívá v tom, že v obdobných bodech libovolných dvou profilů hlavního úseku jsou bezrozměrné hodnoty rychlosti stejné. Uvedené výpočty jsou platné nejen pro proud kruhového průřezu, nýbrž platí stejně i pro rovinné proudění (tj. pro proud vytékající z dlouhé štěrbiny – potvrzují Fertmanovy zkoušky).

Existuje funkce f , vyjadřující závislost bezrozměrné rychlosti na bezrozměrné vzdálenosti měřeného bodu od bodu maximální rychlosti:

$$\frac{w}{w_m} = f\left(\frac{y}{R_{mez}}\right) \quad (1)$$

R_{mez} je v hlavním úseku polovina šířky proudu a v počátečním úseku šířka jádra proudu. Funkce f může být určena jednou provždy třeba experimentální cestou. Druhou cestou určení bezrozměrné rychlosti je podle poloempirické rovnice:

1) dle Schlichtinga

$$\frac{w}{w_m} = \left[1 - \left(\frac{y}{R_x} \right)^{1,5} \right]^2 \quad (2)$$

kde $R_x = f(x)$

2) dle Abramoviče

$$\frac{w}{w_m} = \left[1 - 0,16 \left(\frac{y}{ax} \right)^{1,5} \right]^2 \quad (3)$$

Řešení dle Abramoviče obsahuje experimentální konstantu, tzv. *součinitel vířivosti* a , která charakterizuje vliv konstrukce výusti. Její hodnoty jsou tabelovány. V našem případě se velikost součinitele vířivosti pohybuje mezi hodnotami 0,07-0,09. Abramovič dále stanovuje některé další vztahy pro veličiny, které nám určují vlastnosti volného proudu. Platí pro proud kruhového průřezu a jsou uvedeny v následující tabulce:

Veličina	Označení	Vztah
Poloměr proudu	R_x	$3,4ax + R_o$
Délka krajní oblasti	X_p/R_o	$0,67/a$
Osová rychlost	w_m/w_o	$0,96(a\bar{x} + 0,29)^{-1}$
Objemový průtok	V_x/V_o	$2,22(a\bar{x} + 0,29)$
Pomocná veličina	$\bar{x}$	$\bar{x} = x/R_o$

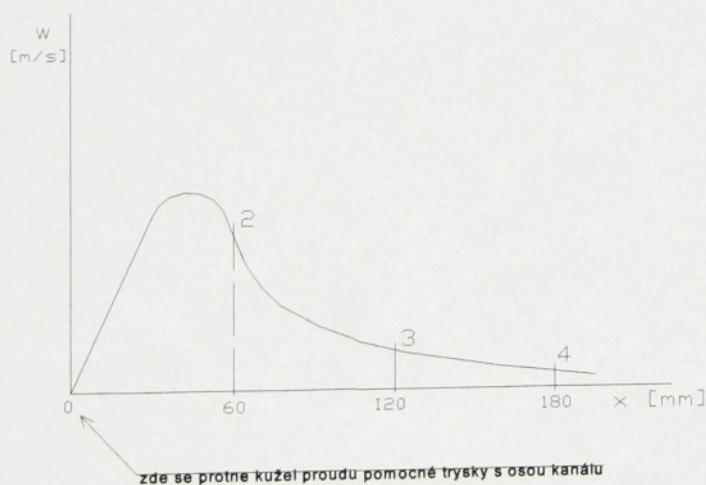
Tab.1. Důležité veličiny volného proudu dle Abramoviče

Spolu s šířením proudu se šíří i teplo. To však není pro náš případ podstatné, a proto jen jedna poznámka. U volného proudu jsou tepelné hranice širší, než hranice dynamické. Znamená to, že turbulentní součinitel přenosu tepla je větší než součinitel turbulentního přenosu hybnosti. Proto je turbulentní Prandtlovo číslo vždy menší než jedna.

3.2. Vliv pomocných trysek na hlavní proud

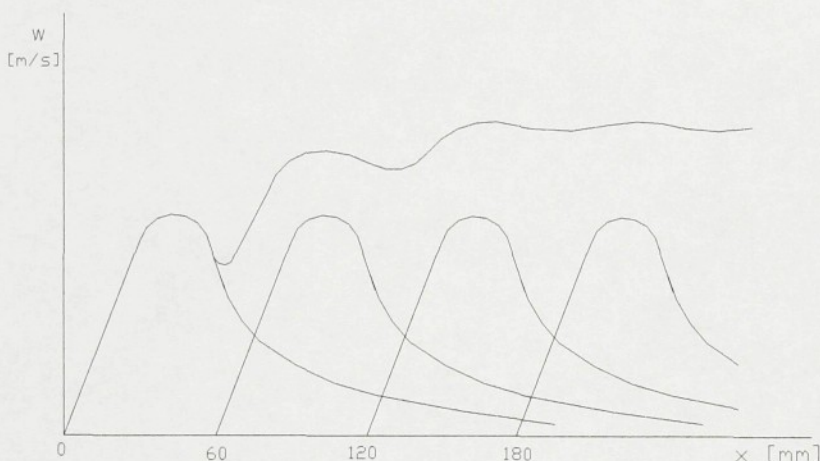
Řešení proudění v celém kanálu není náplní této diplomové práce. Je zde řešena pouze vstupní část kanálu až po přibližně první pomocnou trysku. Nicméně je dobré se o vlivu pomocných trysek na výsledné proudění částečně zmínit.

Protože by samotná hlavní tryška na celý transport vlákna v důsledku disipace energie (viz volné proudy) nestačila, je třeba podél prohozního kanálu rozmístit tzv. pomocné (posilovací) trysky (**obr.2-3**). Jejich vzájemná rozteč je v našem případě 60 mm. Jejich funkce spočívá v udržení rovnoměrného rychlostního profilu podél celého kanálu. Chceme-li pohánět pomocnou tryskou vlákno v prohozním kanálu, pak by úhel mezi osou proudu pomocné trysky a osou kanálu neměl přesáhnout $5-10^\circ$. Rychlostní profil vyvolaný v ose prohozního kanálu pomocnou tryskou je na **obr.3-4**.



obr.3-4. Rychlostní profil jedné pomocné trysky
(jsou znázorněny polohy dalších pomocných trysek)

Řazením trysek za sebou a jejich vzájemným působením vznikne ustálený rychlostní profil patrný z **obr.3-5**. Přestože je průběh rychlosti podél kanálu z počátku nepravidelný, je z praxe ověřeno, že od 4. až 5. pomocné trysky je rychlostní profil nasycený a nadále prakticky konstantní.

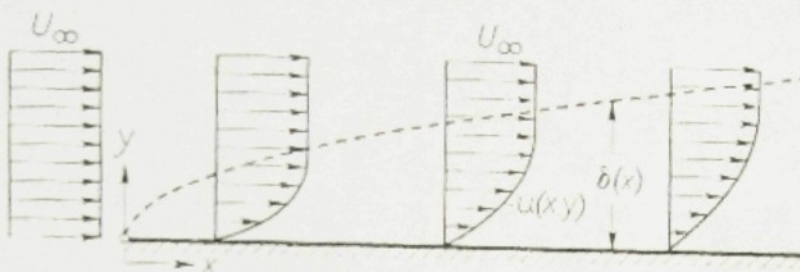


obr.3-5 Výsledný rychlostní profil více pomocných trysek za sebou

3.3. Přístěnný proud

Úlohy řešené v této práci jsou složitou kombinací volného proudu a rozlehlého přístěnného proudu. Navíc je obtékaná stěna (prohozní kanál) tvořena tvarově velmi složitými elementy. Pro řešení úloh je třeba se okrajově zmínit o teorii přístěnného proudu.

Rozlehlý proud šířící se rovnoběžně se stěnou při malé vzdálenosti proudu od stěny se k ní přimkne (**obr.3-6**). Při orientačních výpočtech je možné považovat takový proud za polovinu, který by vycházel z výusti dvojnásobné velikosti, tedy z výusti o průměru $D_0\sqrt{2}$ nebo šířce $4b_0$ a použít pro něj směrné veličiny volných proudů. Z obrázku je patrný vývoj mezní vrstvy.



Obr.3-6. Rychlostní profil přístěnného proudu a vývoj mezní vrstvy

Je-li proud od stěny vzdálen, je jeho šíření v části přiléhající ke stěně omezené. Stržený vzduch musí být nahrazován z okolí proudu. Při jeho přesunu se vytvoří rozdíl tlaků, který způsobí přimknutí proudu ke stěně (tzv. Coandův jev).

4. Důvody numerického modelování

Cílem této diplomové práce je vyřešit provozní problém na tryskovém tkacím stroji. Došlo k němu tak, když z konstrukčních důvodů bylo nutno vyměnit několik prvních lamel z prohozního kanálu za lamely bez spodního „nosu“ (řešená varianta č.2). Po této úpravě však docházelo ke snížení spolehlivosti v tkaní, útek se zpomaloval a hromadil na počátku kanálu. To by ukazovalo na odklon hlavní části proudu mimo prohozní kanál vlivem nové geometrie kanálu. 3D numerické modelování nám umožní nastalou situaci ověřit a prozkoumat. Další modelované varianty jsou pokusem o odstranění problému.

První ukazuje, jaký je průběh proudění ve standardním kanálu při klasickém uspořádání, druhá pak testuje variantu, kdy jsou lamely s nosy vynechány úplně a tryska je tak vlastně od počátku kanálu oddálena. Poslední varianta počítá s možností změny sklonu trysky, tak aby proud směřoval do prohozního kanálu

po předchozím odrazu od jeho horní stěny. Důležité je, aby vlákno plynule překonalo vzdálenost mezi hlavní a první pomocnou tryskou.

4.1. Vlivy konstrukčních elementů na výsledné proudění

Počet konstrukčních parametrů používaných při tvorbě stěny tkacího paprsku je značný. Ve 3D řešení je bylo nutné většinu zanedbat, aby nedošlo k neúnosnému nárůstu doby výpočtu (například pro respektování zaoblení hran lamel, by počet vrstev sítě narostl 11 krát). Na téma vlivu konstrukčních parametrů byla vypracována studie [3], která byla modelována ve 2D. Jedná se v ní o shrnutí a systematické prozkoumání jednotlivých konstrukčních parametrů, které byly sledovány jen podle okamžité konkrétní potřeby na jednoduchých numerických modelech. Byly sledovány i některé jednoduché tvarové změny trysky jako zdroje proudu pro sledovaný model.

4.2. Sledované konstrukční parametry

Ve 2D se sledovaly tyto konstrukční parametry:

- 1) Vliv zaplnění stěny. Šířka mezilamelového kanálu je dána zaplněním dostavy hmotou lamel. Byly zvoleny 3 hodnoty zaplnění 37,5% - 50% - 62,5%. Nejmenší z nich doporučuje výrobce tkacích paprsků pro klasické tkaniny a bylo odzkoušeno, že vyšší hodnoty lze s úspěchem použít pro technické tkaniny.
- 2) Vliv rozteče lamel, tzv. dostava. Bylo zvoleno 5 hodnot, které pokrývají rozsah používaný pro klasické i technické tkaniny.
- 3) Vliv tvaru hrany lamel. Bylo zvoleno 6 různých tvarových variant.
- 4) Vliv úhlu náběhu proudu

4.2.1. Vliv zaplnění stěny a rozteče lamel

Ze všech modelovaných variant vyplývá shodný závěr:

- Na velikost průtoku stěnou, tvořenou lamelami a mezerami, má vliv jen relativní zaplnění stěny, a to bez ohledu na absolutní velikost lamel a mezer mezi nimi.
- Rozteč sousedních lamel, tzv. dostava, má vliv jen na detailní obraz proudového pole v mezilamelové mezeře a v těsné blízkosti před vstupem do mezery a za výstupem z ní.
- Při velmi hustých lamelách se proudové pole vyrovná velmi brzy po průchodu mezerami.
- Při velmi řídkých lamelách je proud v mezerách mezi nimi špatně vedený, v oblastech odtržení po vstupu do mezer vznikají vírová pole. Za lamelou je poměrně dlouhá oblast, než v proudu zaniknou narušení způsobená širokými mezilamelovými kanály.
- Délka oblasti před a za lamelou by neměla být volena konstantní pro všechny případy, ale jako určitý násobek šířky kanálu tak, aby na hranici oblasti již bylo proudové pole v každém případě vyrovnané. Všeobecně by délka oblasti za lamelou měla být asi 3,5 násobkem šířky mezi lamelami.

4.2.2. Vliv tvaru hrany lamel

Pro sledování výše uvedeného vlivu byly zvoleny následující tvary hran: pravoúhlá, konvergentní, divergentní, zaoblená, dále pak lamela vytvořená ze dvou zaoblených lamel o poloviční tloušťce (označení A) a tvar hrany, který se nejvíce blíží skutečnosti (označení B), tj. konvergentní tvar (způsobený deformací při vystřihování tvaru lamely) se zaoblenými rohy (zapříčiněno omíláním výstřižku). Rychlostní profily se pak u jednotlivých hran (rozteč 1,6 mm, zaplnění 0,6/1,6 mm) vyvíjely takto:

Složka rychlosti u – vodorovná, má největší hodnotu před lamelami pro zaoblenou variantu, nejmenší pro varianty pravoúhlou a konvergentní. Ostatní jsou prakticky shodné. Po průchodu lamelami je u všech patrné mírné zpětné proudění kromě varianty zaoblené, kde je proudění ve stejném směru jako před lamelami.

Složka rychlosti v – svislá: Obě oblé varianty (zaoblená a A) mají nepatrně vyšší vstupní rychlost před lamelami. Po průchodu lamelami je ustálená hodnota složky rychlosti nepatrně větší s tím, že varianty pravoúhlá, konvergentní a divergentní se ustalují pomaleji.

Jestliže změníme zaplnění na 1,0 pak je ve vodorovné složce zajímavá varianta B, která se při větším zaplnění prakticky shoduje s podobnou variantou konvergentní. Zároveň se zvýrazní rozdíly mezi zbývajících variantami a to jak ve vodorovné, tak svislé složce rychlosti.

4.2.3. Vliv úhlu náběhu proudu

Byl vyřešen rozsáhlý soubor různých druhů modelů, celkem 24. Byl při nich měněn také úhel náběhu proudu pomocí změny sklonu osy hlavní trysky. Nejpodstatnějším závěrem z těchto pozorování je fakt, že při větším úhlu náběhu proudu roste také průnik proudu stěnou. Z praktického hlediska má smysl měnit úhel v rozmezí $\pm 10^\circ$.

Touto kapitolou je ukončena řešební část diplomové práce a nyní následuje vlastní řešení.

5. Vlastní řešení - numerické modelování

Numerické modelování je trendem současné doby. Díky vysoce výkonným počítačům jsme schopni simulovat pomocí metody konečných prvků prakticky jakýkoliv děj. Nesmíme však zapomínat, že se jedná o pouhý model a ten má k realitě daleko. Nejsme schopni matematicky postihnout úplně všechny jevy, které se kolem nás vyskytují. Můžeme vybrat a popsat pouze takové vlastnosti děje, které jsou pro danou situaci podstatné. Když pak ještě zjednodušíme model z konstrukčního hlediska, vnášíme do celého výpočtu nezanedbatelnou chybu. Výsledky takto získané jsou proto jen určitým vodítkem pro posouzení zkoumané problematiky.

Numerické modelování nám spíše umožňuje posoudit průběh a funkčnost děje, než-li určení reálných velikostí jednotlivých veličin. Pokud jsou výsledky numerického modelování podpořeny experimentem, popřípadě dalším modelováním, pak teprve můžeme hovořit o výrazné podobnosti modelu a reálného děje.

5.1. Použitý 3D program

Numerická modelace byla prováděna ve 3D programu Aper. Tento výpočetní software byl vytvořen speciálně pro modelování interakce volného proudu s komplikovanou porézní stěnou. Jeho tvůrcem je RNDr. Jaroslav Pelant, Csc. z VZLÚ Praha. Principem programu je řešení Navier-Stokesovy rovnice pro stlačitelné vazké nestacionární 3-dimenzionální proudění. Podrobněji je o principu výpočtu psáno ve zprávě [6]. Výsledky jsou uváděny ve formě bezrozměrných veličin a znázorňovány graficky. Číselné vyjadřování výsledků by bylo příliš složité a pro potřeby úlohy i zbytečné. Program byl využíván již dříve v jiných pracích na VÚTS Liberec nebo na VZLÚ Praha a jeho funkčnost je ověřena experimentálně na úloze modelující proudění v zahnutém difuzoru.

K výpočtu byl použit počítač typu PC PII 400 MHz, 128 MB RAM. Konfiguraci uvádím pro představu náročnosti výpočtu, neboť jeden iterační krok trval kolem 7 s. Vzhledem k tomu, že u každého ze čtyř modelů bylo potřeba spočítat kolem 20 000 kroků, jednalo se o časově velmi náročnou práci. Navíc bylo nutno úlohu správně naladit, z hlediska počátečních a okrajových podmínek a také geometrie modelu, což se později ukázalo jako jednoznačně časově nejnáročnější část modelování.

5.2. Tvorba modelu

Pro vytvoření modelu je třeba definovat jeho geometrii (trysku, tvar lamely, rozteč mezi sousedními lamelami, počet lamel klasických, počet lamel bez „nosu“, vzdálenost trysky od počátku kanálu), síť, okrajové a počáteční

(termodynamické) podmínky. Ve všech čtyřech řešených případech však bylo nutné provést podstatná zjednodušení tvaru, především z časových důvodů. Proto bylo rozhodnuto ponechat hranatý tvar kanálu bez obloukových přechodů a také hranatý tvar hran jednotlivých lamel. Podstatně se tím zmenší počet výpočtových elementů a tím také doba řešení. Hrany lamel jsou ve skutečnosti zaoblené jejich omíláním při výrobě.

Rovněž tryska jako zdroj proudění v oblasti byla pro účely modelování podstatně zjednodušena. Její ústí je čtverhranné, jako vstup jsou definovány čtyři elementy v první vrstvě čtyřúhelníkové sítě (viz **obr.5-4**). Velikost plochy čtverhranného ústí je ekvivalentní ploše ústí trysky kruhového průřezu. Toto zjednodušení je možné proto, neboť je známo z teorie volných proudů, že bez ohledu na tvar ústí se volný proud za ústím rychle přetváří do typického tvaru kužele odpovídajícího výtoku z ústí kruhového průřezu.

5.2.1.Geometrie a síť – společné prvky všech řešených modelů

Ústí trysky je dáno čtverhrannou plochou o straně 2,66 mm ekvivalentní kruhovému ústí o průměru 3 mm. Tvar a rozměry skutečné lamely používané k tvorbě prohozního kanálu jsou zřejmé z **obr.5-3**. Schéma modelované lamely je zobrazeno na **obr.5-1**, lamela bez „nosu“ pak na **obr.5-2**.

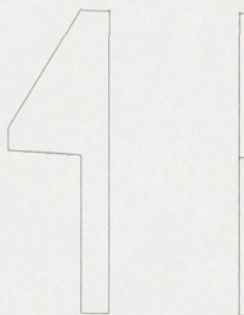
Síť je generována automaticky a je složena ze čtyřhranných elementů. V příčném řezu (viz **obr.5-4**) je vytvořeno $22 \times 24 = 528$ elementů výpočtové sítě a to shodně ve všech vrstvách po délce modelu. V podélném řezu, který je veden v ose trysky, je celkem 83 vrstev (po 528 elementech), vždy jedna vrstva lamela (tloušťka 0,9 mm) a jedna vrstva mezera (tloušťka 0,8 mm). Při takto zvolené rozteči 1,7 mm je délka oblasti celkem 70,6 mm. Delší oblast není sledována, protože to není náplní této práce. Cílem je modelovat interakci proudu se začátkem kanálu a ne proudění dál v kanálu (což by navíc neúměrně prodloužilo dobu výpočtu).

V první vrstvě bylo definované ústí trysky. Dále je pak vždy definováno kolik vrstev bude bez lamel, kolik s lamelami bez nosu, kolik s klasickými lamelami

a na výstup do otevřeného okolí byly ponechány ve všech případech 3 vrstvy. Podélné řezy jsou uvedeny u jednotlivých řešených variant.



Obr.5-1. Schéma modelované lamely



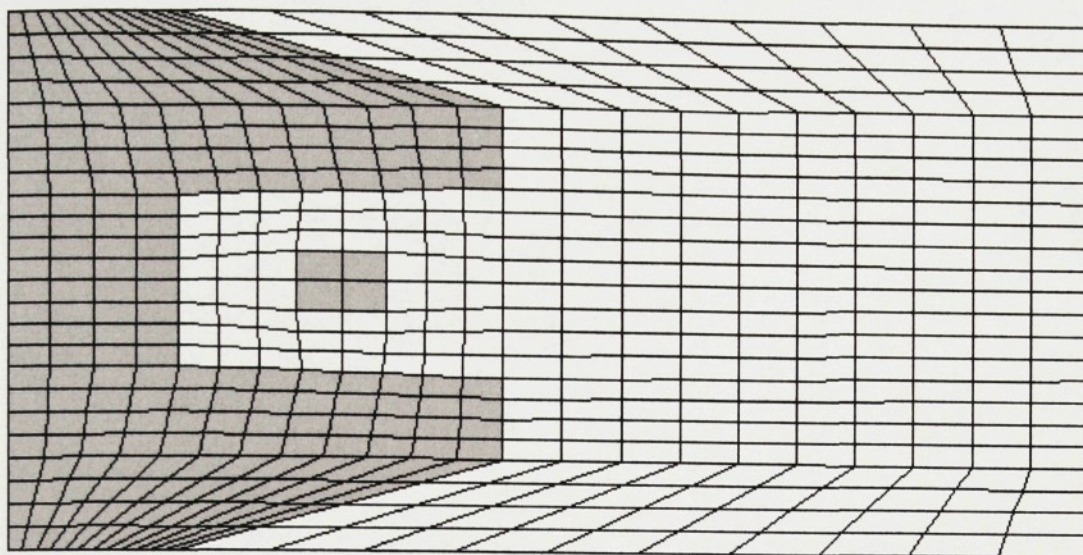
Obr.5-2. Schéma modelované lamely bez nosu

5.2.2. Termodynamické a okrajové podmínky

V ústí trysky je definovaný vstupní tlak 600 kPa a teplota 293 K proti výstupnímu tlaku 100 kPa na vnějším obrysu oblasti. Proudícím médiem je vzduch. Z tlakového poměru vyplývá, že bude teoreticky dosaženo nadkritického proudění podél celého kanálu. Ve skutečnosti je rychlostní pole ovlivněno konkrétním tvarem přívodního kanálu před ústím trysky. Tyto vlivy byly řešeny zvlášť, výpočet by pouze zkomplikovaly, a proto je zde neuvažujeme.

Úloha nevyžaduje řešení dalších tlakových spádů, neboť kvalitativně by se výsledné proudění nezměnilo, pouze by se posunulo v konkrétních hodnotách sledované veličiny (např. rychlosti). Je totiž z teorie známé, že s rostoucím rozdílem tlaků roste také rychlost proudu.

Pomocný vstup do oblasti je v příčném řezu zleva, aby se vymodelovalo přisávání rychlým proudem vzduchu z trysky, výstup do otevřeného okolí vpravo. Nahoře a dole od podélné osy kanálu i po stranách je dostatečný prostor, než aby byl proud ovlivňován jeho hranicemi. Samozřejmě by bylo nejlepší umístit horní a dolní hranice do hodně velké vzdálenosti od osy kanálu, nicméně dobu výpočtu by to neúnosně zvětšilo. Veškeré termodynamické a okrajové podmínky jsou stejné pro všechny modelované varianty, a proto se pro jednotlivé modely neuvádí.



Obr.5-4 Sít' zobrazená v příčném řezu

5.2.3. Vyjádření 3D výsledků

Pro vyjádření výsledků prostorového modelování bylo nutné použít dvou systémů řezů: podélné vodorovné a příčné svislé řezy. Příčné řezy jsou navíc sledovány ve dvou vrstvách. První sledovaná vrstva je těsně za vstupem proudu do kanálu, druhá pak po 50 mm od vstupu do kanálu (10 mm před první pomocnou tryskou). Ve všech řezech jsou sledována rychlostní pole. Pro praktické použití je vhodné zobrazit pouze hlavní složku vektoru rychlosti ve směru osy kanálu.

5.3. Vlastní modelování

Řešeny byly následující varianty:

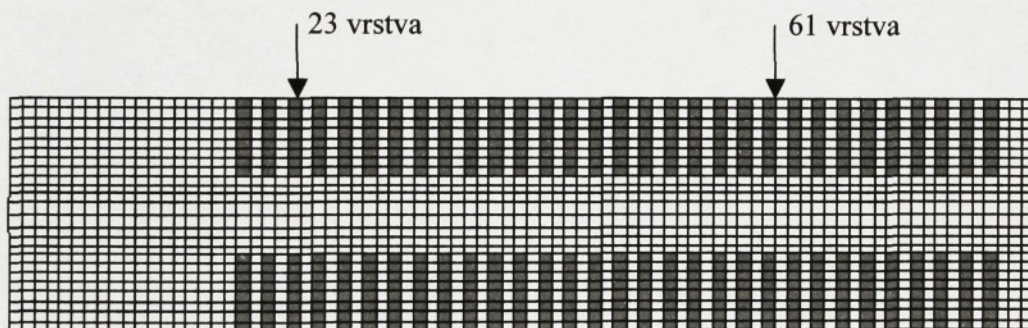
- 1) Standardní provedení, tj. běžně používané provedení prohozního kanálu.
- 2) Provedení s vynechanou spodní stěnou, u kterého docházelo v praxi k odklonu hlavní části proudu mimo osu kanálu
- 3) Provedení s oddálenou tryskou
- 4) Provedení s vynechanou spodní stěnou a změnou sklonu trysky (tato varianta není uvedena v zadání, je řešena navíc)

5.3.1. Standardní provedení

Toto řešení bylo provedeno jako srovnávací, aby byl k dispozici obvyklý rychlostní profil v prohozním kanálu a mohl být porovnán s ostatními výsledky. Zároveň se jím měla ověřit funkčnost dodaného 3D programu.

5.3.1.1. Geometrie a síť – specifika provedení

Model má osu trysky totožnou s osou kanálu. Vzdálenost ústí trysky od první lamely je 18 vrstev, tj. 15,3 mm. Následuje prohozní kanál, který je tvořen klasickými lamelami, a jeho celková délka činí 52,7 mm (62 vrstev). Na konci kanálu jsou ponechány 3 vrstvy na výstup proudu do otevřeného okolí (**obr.5-5**).



Obr.5-5. Kanál v podélném řezu – standardní provedení

5.3.1.2. Výsledky

Průběh úlohy byl sledován po 1 000 krocích, celkem 20 000 iterací. Řešená varianta měla od počátku plynulý rozběh, proud byl neustále symetrický, nedoformoval se a rychlostní pole bylo rovnoměrné. Vlastnosti proudu byly po celou dobu ideální pro transport vlákna. Z podélných a příčných řezů rychlostním polem (**obr.5-6, 5-7, 5-8**) je patrné, že prakticky veškerá energie

proudu vstupuje do kanálu. Výsledky jsou znázorněny vždy po 5 000 iteracích. Použity jsou tyto typy grafů:

- 1) Izočáry složek rychlosti (izotachy) ve vodorovném podélném řezu. Pohled je zepředu – stěna kanálu je vzadu, nosy lamel spolu s volným okolím směrem k nám. Rychlost je určena pomocí bezrozměrné veličiny λ , přičemž platí

$$\lambda = \frac{w_{PROUDU}}{a}$$

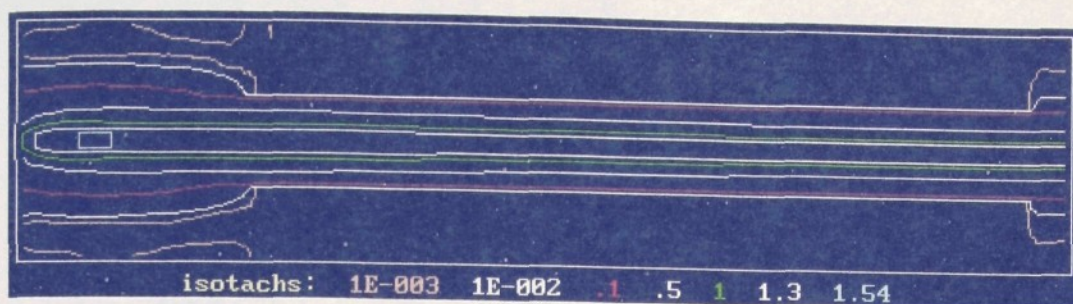
w_{PROUDU} rychlost proudu

a kritická rychlost ve stejném prostředí

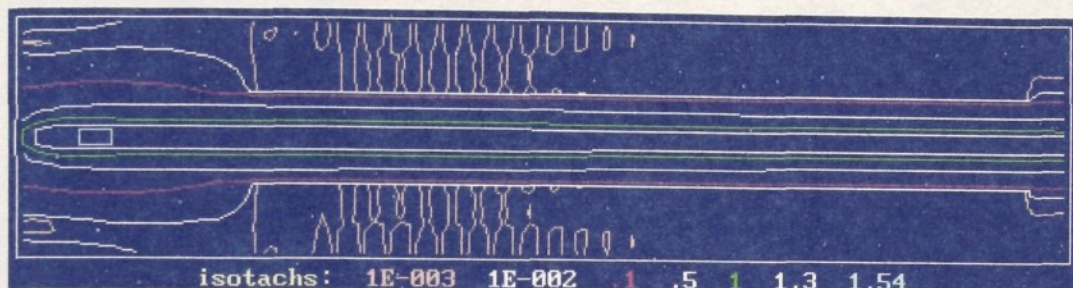
- 2) Izočáry složek rychlosti v příčném směru. Pohled je ve směru proudu (od hlavní trysky). Řezy jsou ve dvou vrstvách č. 23 (vstup do kanálu a č. 61 (poloha první pomocné trysky). Rychlost je znovu vyjádřena pomocí λ .

Zobrazené izotachy jsou pro oba řezy vždy těchto hodnot: 0.001 (tzv. „nulová čára“), 0.01, 0.1, 0.5, 1, 1.3 a maximální hodnota (přibližně 1.5).

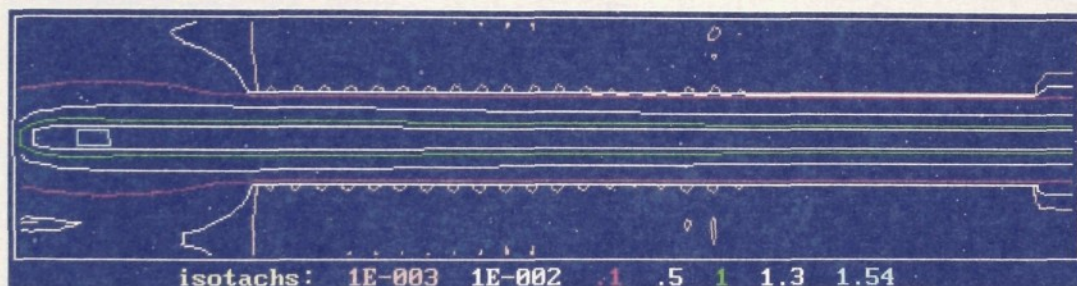
Zvolený 3D program umožňuje vyjádřit výsledky také v dalších bezrozměrných veličinách (např. tlak, teplota, entropie), ale pro potřeby této práce by to bylo zbytečné. Pro posouzení transportních vlastností jednotlivých řešených variant je důležitý rychlostní profil a ten je patrný z následujících obrázků:



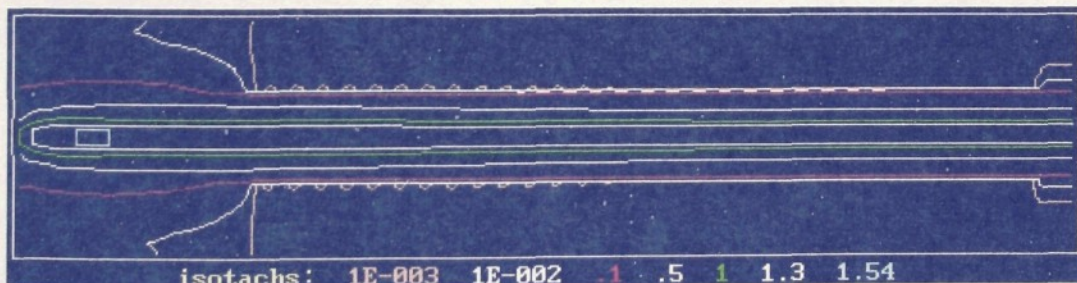
5 000 iterací



10 000 iterací

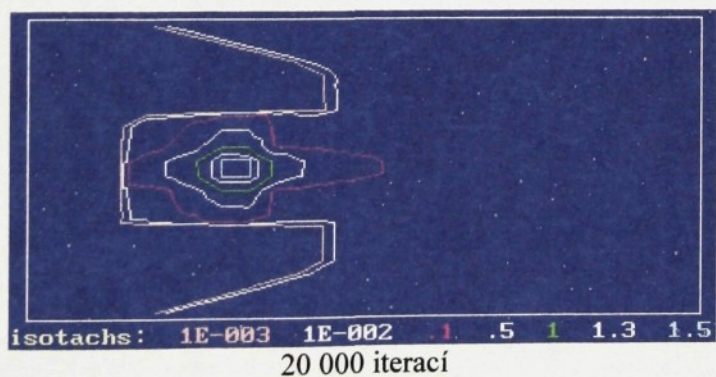
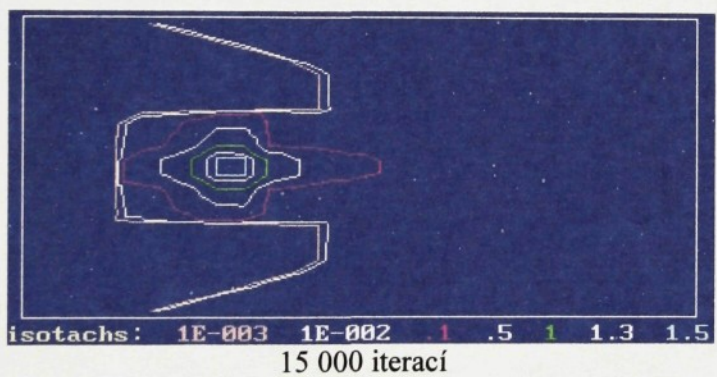
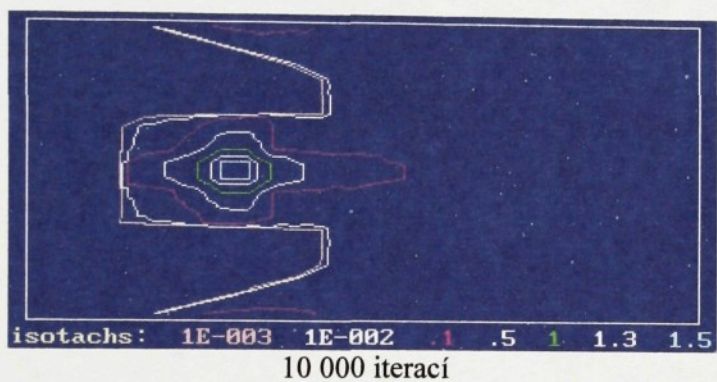
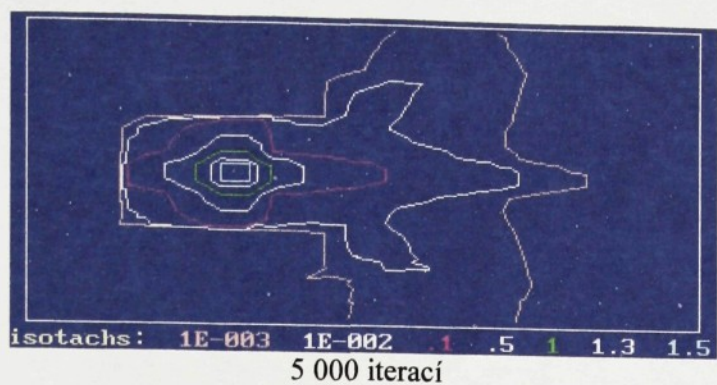


15 000 iterací

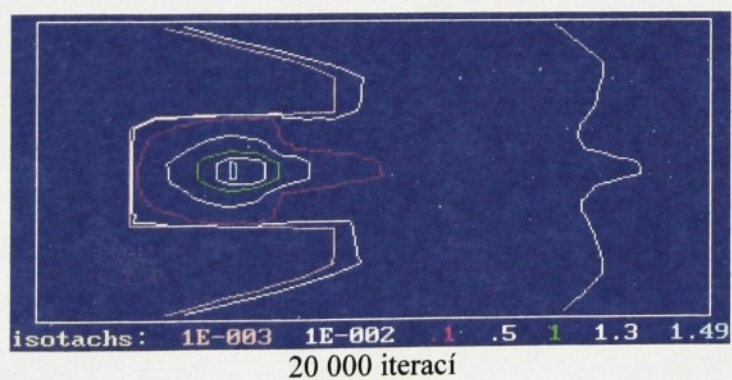
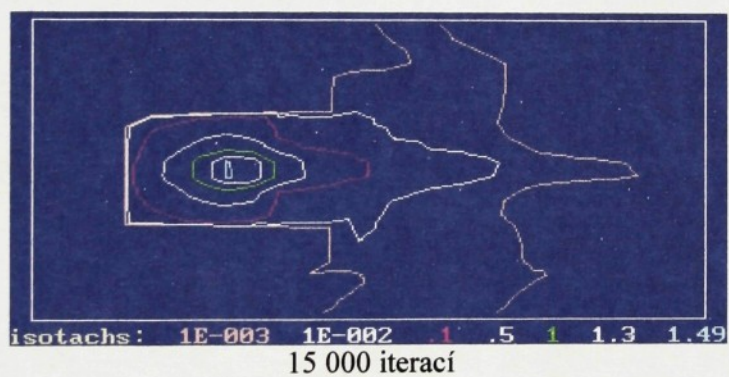
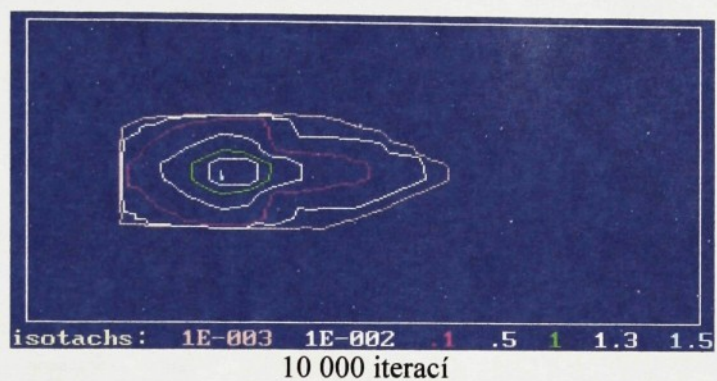
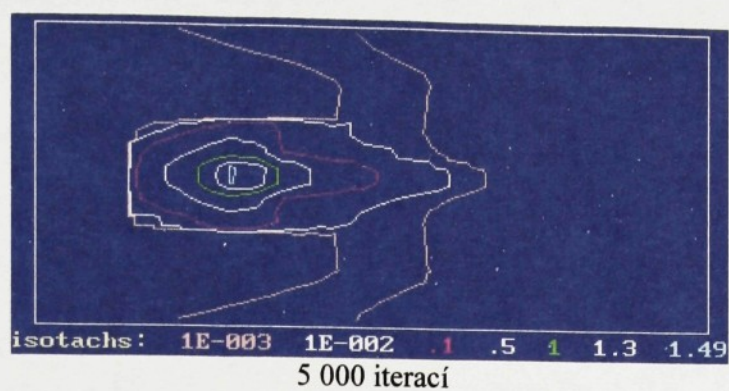


20 000 iterací

Obr.5-6. Podélné vodorovné rychlostní profily v prohozním kanálu pro standardní provedení



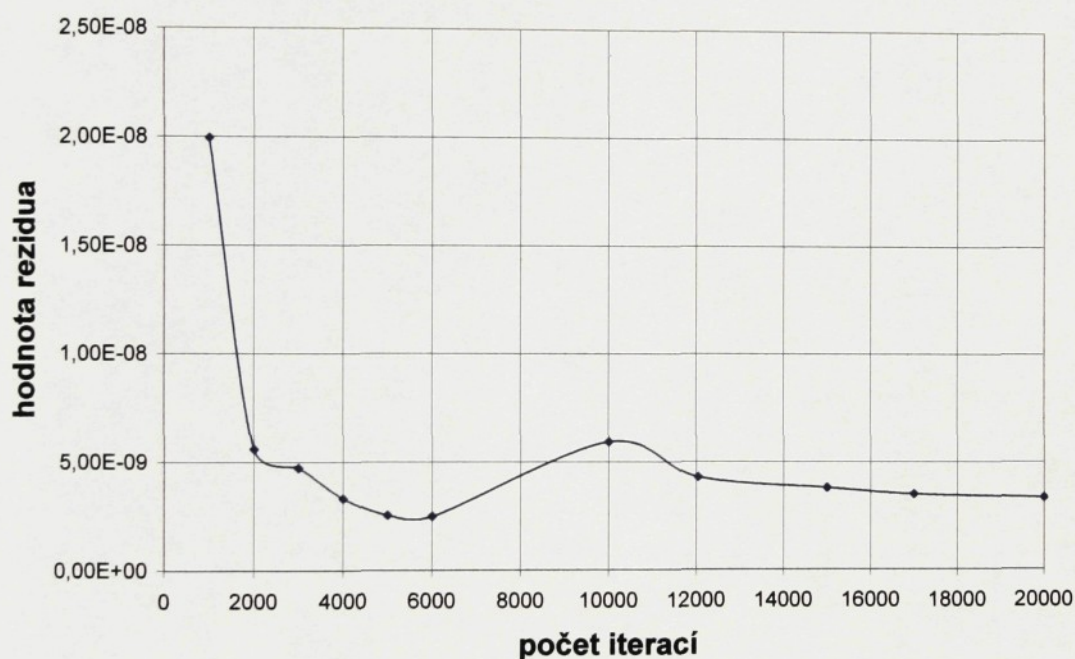
Obr. 5-7 Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu pro standardní provedení (23.vrstva)



Obr. 5-8 Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu pro standardní provedení (61.vrstva)

5.3.1.3. Vyhodnocení

Další sledování úlohy se již neprovádělo, neboť rychlostní profil proudu byl ustálený a k jeho dalším změnám nedocházelo. Bylo dosaženo předpokládaného průběhu proudění. Proud je při 20 000 iteracích plně vyvinutý a jeho veškerá hybnost je využívána k transportu vlákna v prohozním kanálu. Dynamický tlak, který je úměrný druhé mocnině rychlosti, je po délce kanálu také konstantní. Hodnoty rezidua jsou znázorněny na **obr.5-9**.



Obr.5-9 Průběh rezidua pro standardní kanál

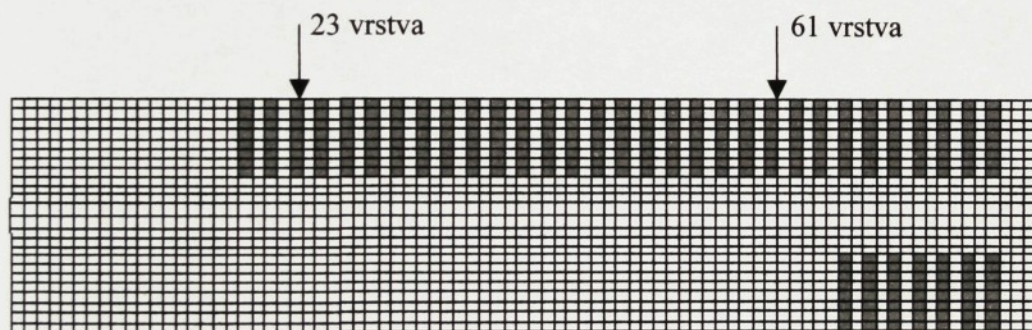
5.3.2. Provedení s vynechanou spodní stěnou

U řešené varianty docházelo v praxi k chybnému transportu vlákna. Došlo k němu z důvodu výměny několika prvních lamel klasických za lamely bez spodního „nosu“. Bylo tak učiněno na základě konstrukčních požadavků. Po té však docházelo k méně spolehlivému chodu stroje, neboť se zvýšil počet tzv.

útkových nedoletů. Předpokládá se, že únikem části proudu mimo osu kanálu se zpomalí transportní rychlost. Numerické modelování umožní zobrazit rychlostní pole a předpoklady ověřit.

5.3.2.1. Geometrie a síť – specifika provedení

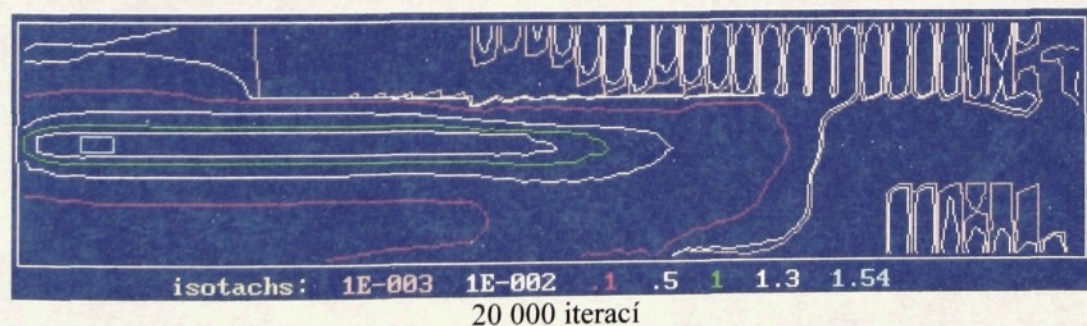
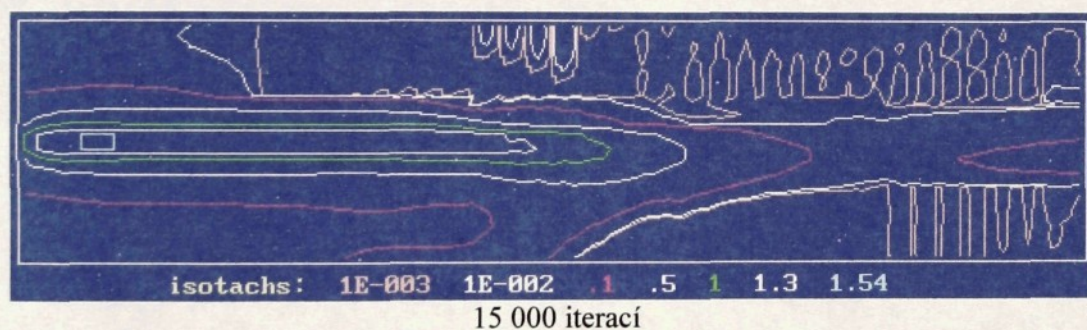
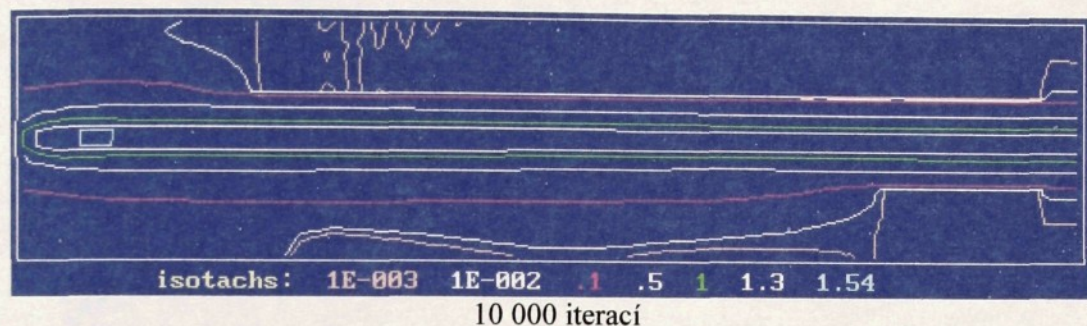
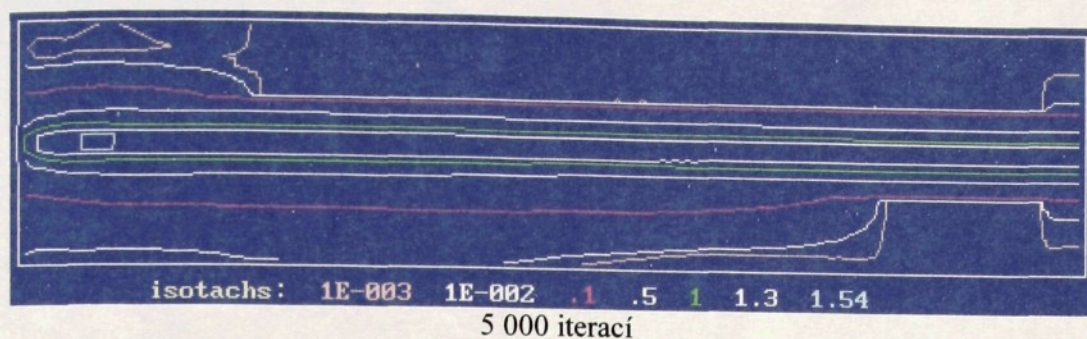
Model má osu trysky totožnou s osou kanálu. Vzdálenost ústí trysky od první lamely je 18 vrstev, tj. 15,3 mm. Následná oblast je tvořena nejprve lamelami bez spodního „nosu“ (24 ks), jejich celková délka činí 41,7 mm (49 vrstev). Dále navazuje 7 lamel klasických, celkem 13 vrstev o délce 11 mm. Na konci kanálu jsou opět ponechány 3 vrstvy na výstup proudu do otevřeného okolí (**obr.5-10**).



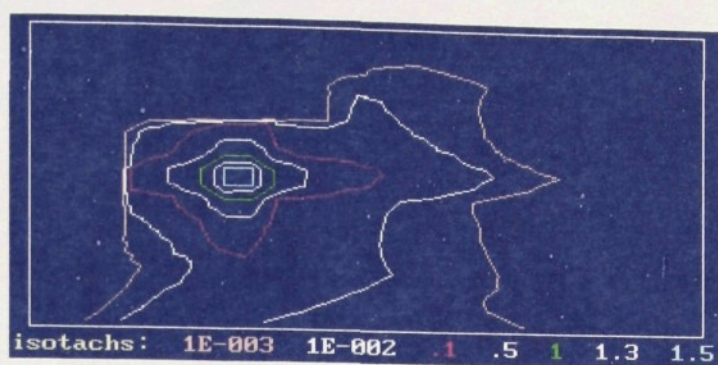
Obr.5-10. Kanál v podélném řezu – provedení s vynechanou spodní stěnou

5.3.2.2. Výsledky

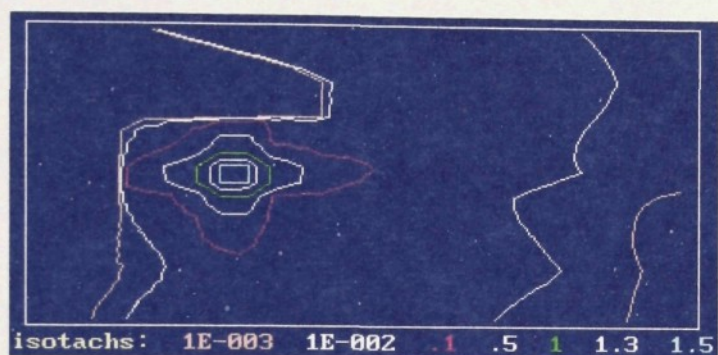
Výsledky jsou znázorněny po 5 000 iteracích v podélných a příčných řezech rychlostním polem (**obr.7-11, 7-12, 7-13**). Průběh úlohy byl sledován po 1 000 krocích, celkem 20 000 iterací. Rychlost je opět určena pomocí bezrozměrné veličiny λ (poměr konkrétní rychlosti vůči rychlosti kritické) a znázorněna izotachami.



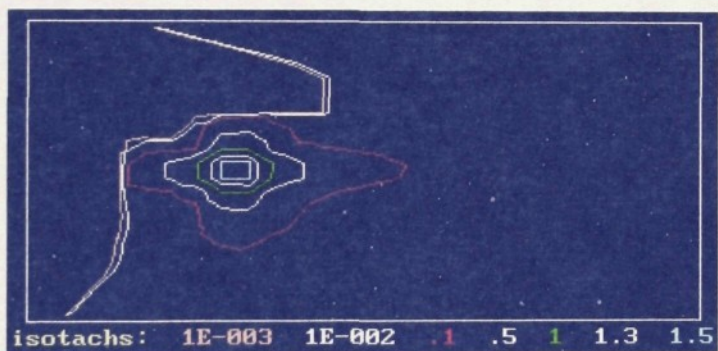
Obr.5-11. Podélné vodorovné rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s vynechanou spodní stěnou



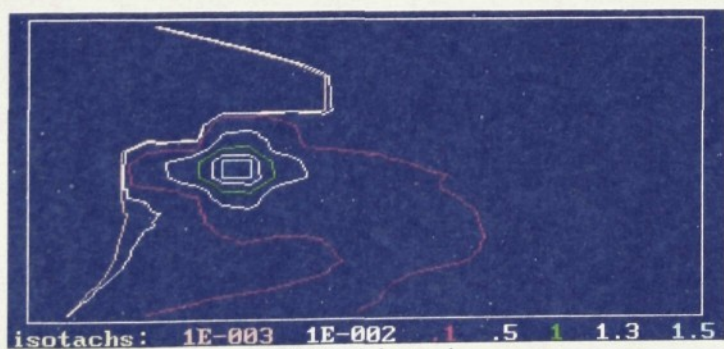
5 000 iterací



10 000 iterací

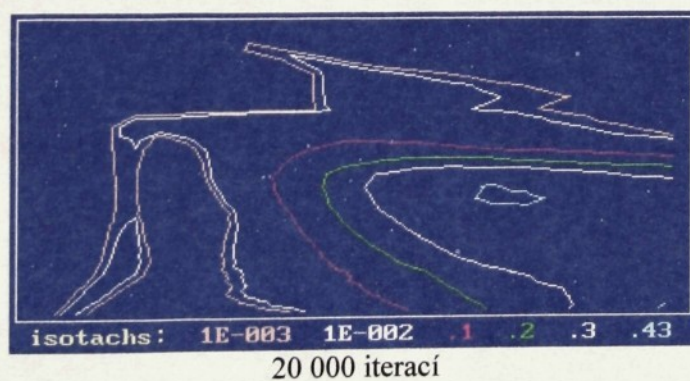
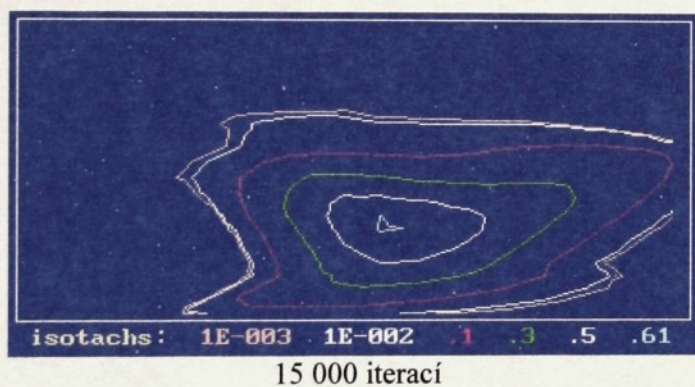
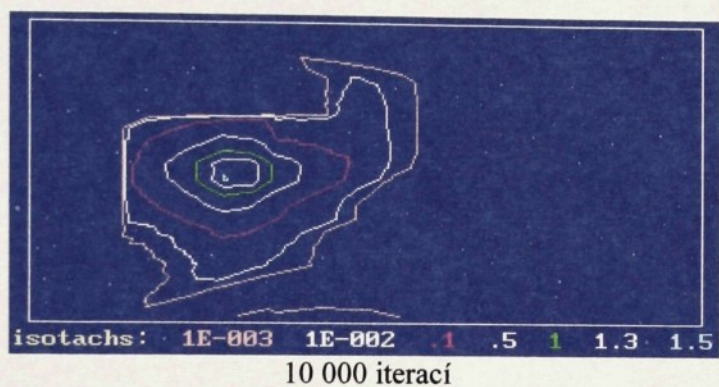
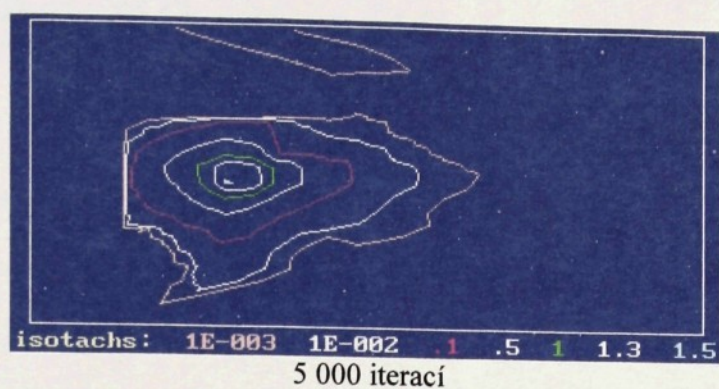


15 000 iterací



20 000 iterací

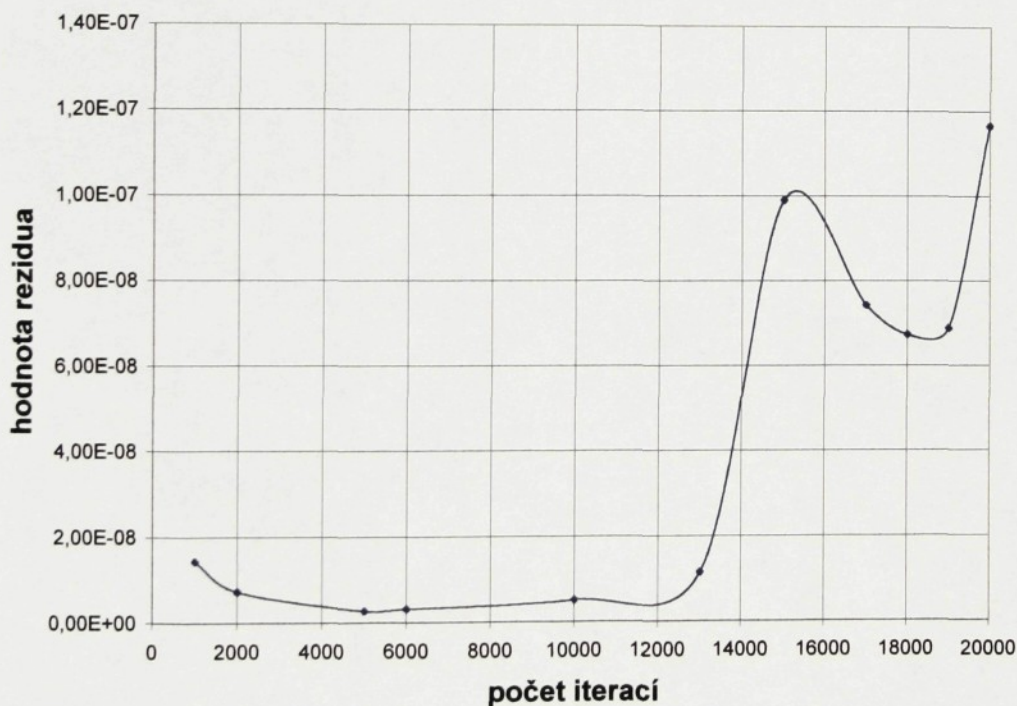
Obr. 5-12. Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s vynechanou spodní stěnou (23.vrstva)



Obr. 5-13. Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s vynechanou spodní stěnou (61.vrstva)

5.3.2.3. Vyhodnocení

V řešené variantě dojde vlivem geometrie kanálu k odklonění proudu od původního směru osy kanálu. V podélném řezu se odkloní směrem dolů a zároveň, jak je patrné z příčného řezu, směrem k nám. Po počátečním symetrickém a plynulém rozběhu proudu se při 13 000 krocích začala zřetelně projevovat nesymetričnost geometrie prohozního kanálu. Proud se postupně stácel, ztrácel na symetričnosti a síle. Nakonec se prakticky veškerá energie proudu dostala mimo oblast kanálu. Pomocná tryska by v tomto případě nepomohla. Výše uvedené předpoklady se tak potvrdily, a proto nebylo potřebné v úloze pokračovat. Hodnoty rezidua jsou znázorněny na **obr.5-14**. Z jeho průběhu je patrné, že při 13 000 iteracích se řeší už něco jiného, tj. únik proudu mimo kanál.



Obr.5-14. Průběh rezidua, provedení s vynechanou spodní stěnou

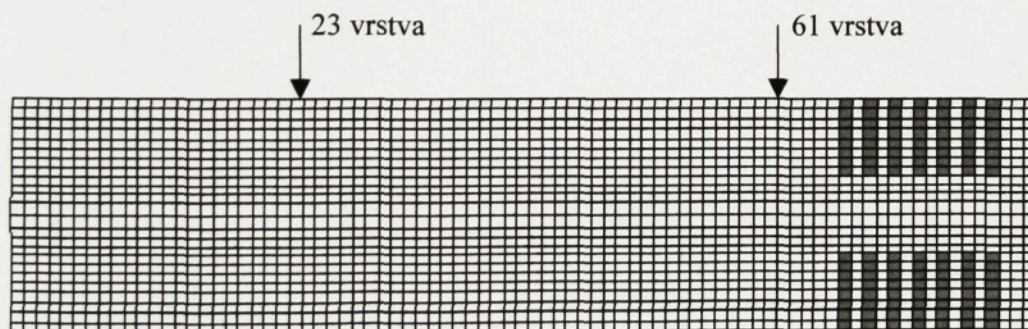
5.3.3. Provedení s oddálenou tryskou

Tato varianta je jedním ze dvou řešení provedení č.2 (provedení s vynechanou spodní stěnou). Vychází z výsledků získaných numerickým modelováním standardního provedení, kde je rychlostní pole rovnoměrné a veškerá energie proudu vstupuje do kanálu ve směru jeho osy.

Předpokládá se, že úplným vynecháním lamel bez spodního „nosu“, bude proudění v kanálu podobné standardnímu provedení a tudíž bude vhodné pro transport vlákna. Oddálena vlastně není tryska, ale počátek kanálu. Očekává se vyšší disipace energie proudu na vstupu do kanálu, neboť průřez plochy volného proudu bude vyšší než u standardního provedení.

5.3.3.1. Geometrie a síť – specifika provedení

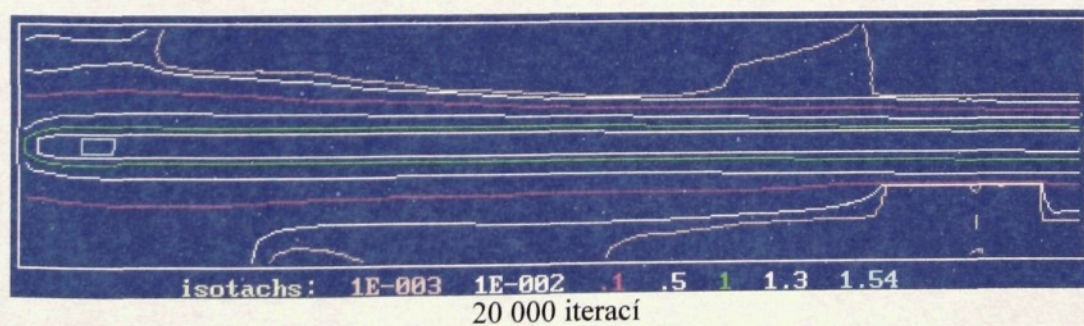
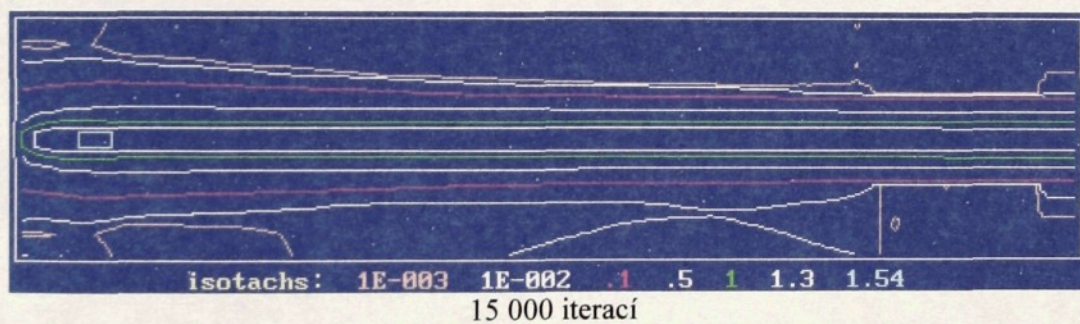
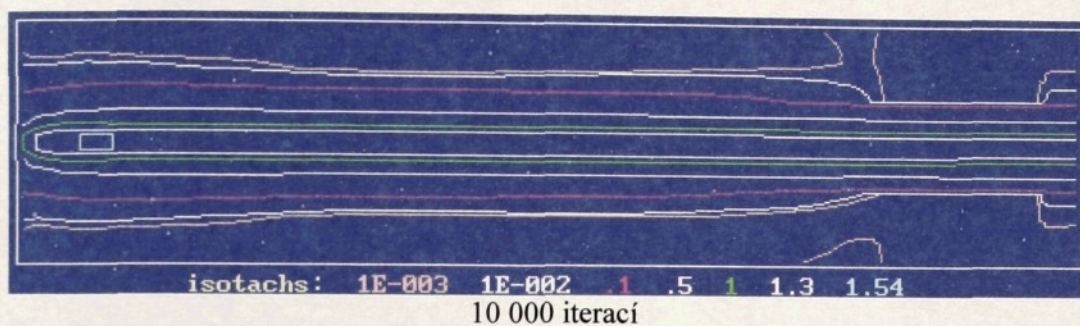
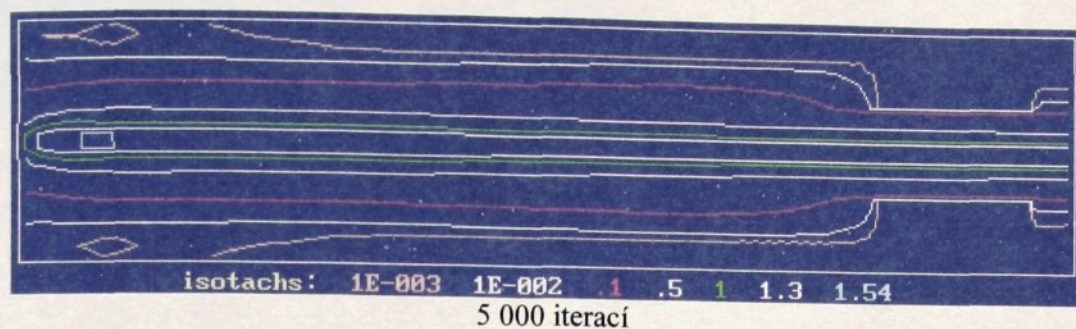
Model má osu trysky totožnou s osou kanálu. Vzdálenost ústí trysky od první lamely je 67 vrstev, tj. 57 mm. Dále navazuje 7 lamel klasických, celkem 13 vrstev o délce 11 mm. Na konci kanálu jsou opět ponechány 3 vrstvy na výstup proudu do otevřeného okolí (**obr.5-15**).



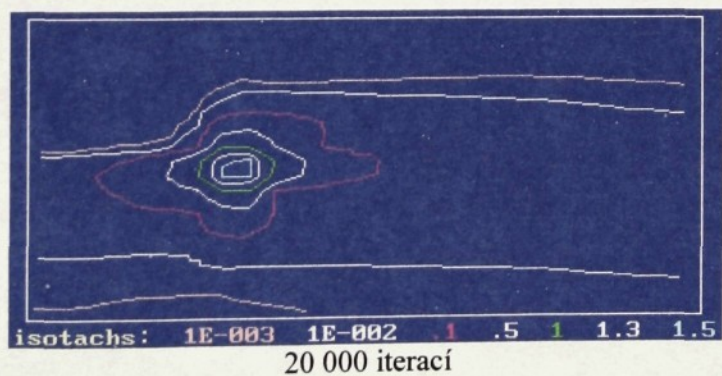
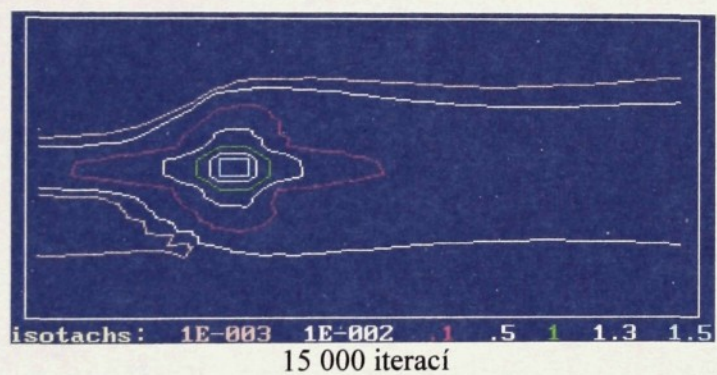
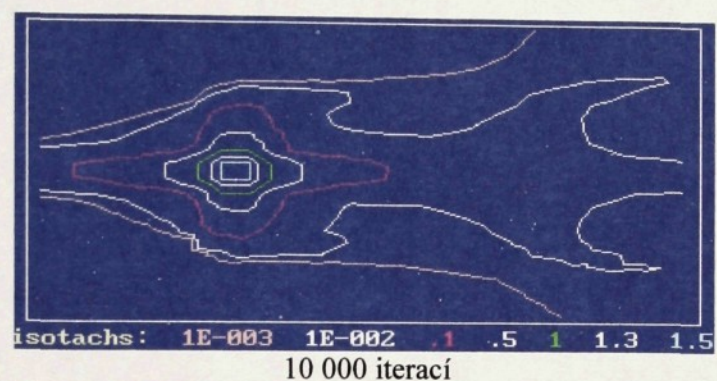
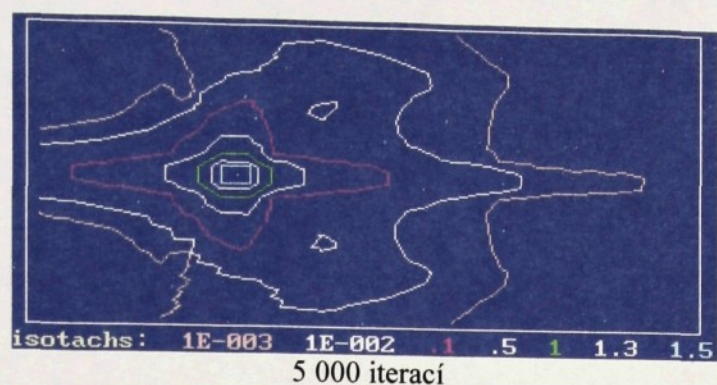
Obr.5-15. Kanál v podélném řezu – provedení s oddálenou tryskou

5.3.3.2. Výsledky

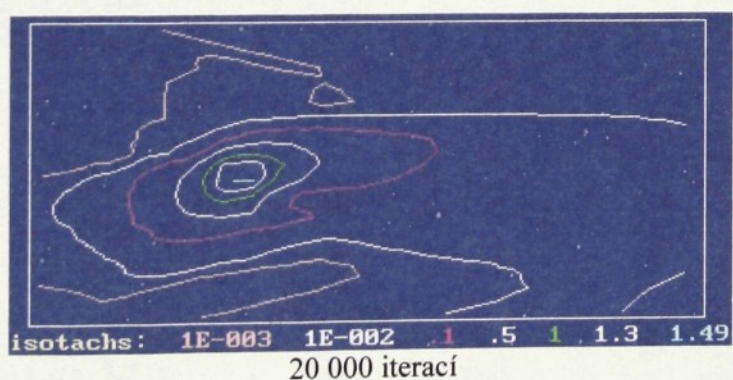
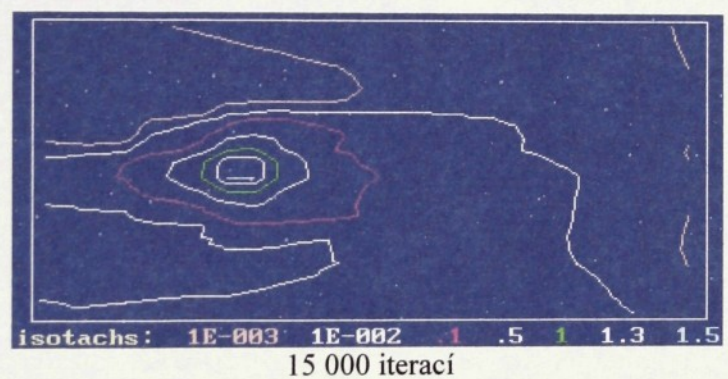
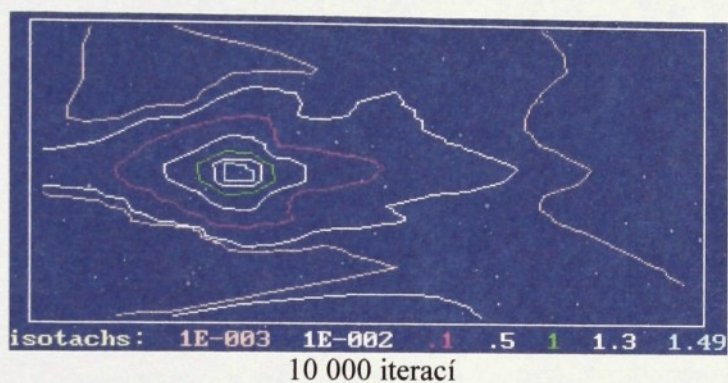
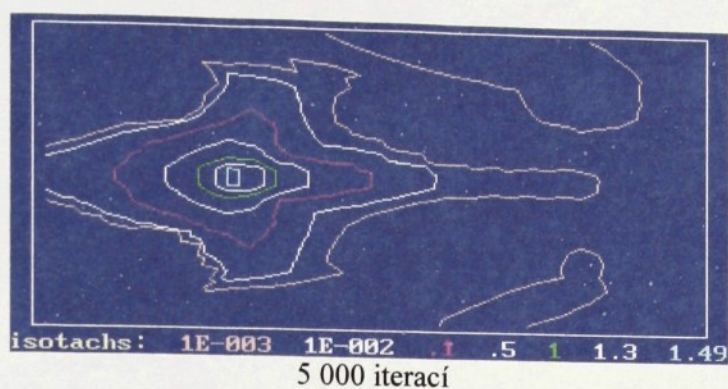
Výsledky jsou znázorněny opět po 5 000 iteracích v podélných a příčných řezech rychlostním polem (**obr.5-16, 5-17, 5-18**). Průběh úlohy byl sledován po 1 000 krocích, celkem 20 000 iterací. Rychlost je opět určena pomocí bezrozměrné veličiny λ a znázorněna izotachami.



Obr.5-16. Podélné vodorovné rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s oddálenou tryskou



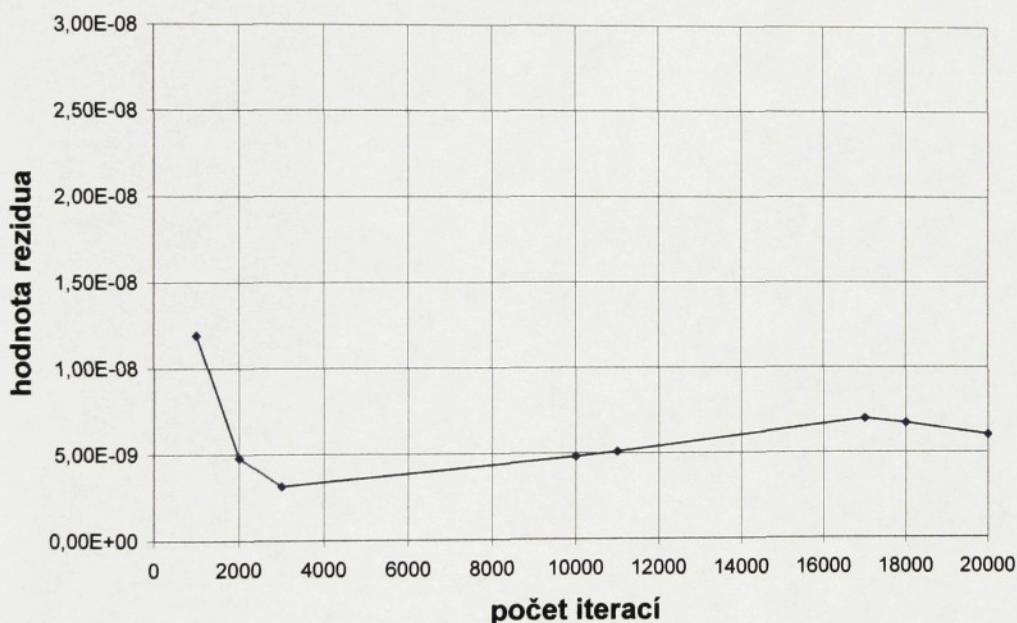
Obr. 5-17. Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s oddálenou tryskou (23.vrstva)



Obr. 5-18. Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s oddálenou tryskou (61.vrstva)

5.3.3.3. Vyhodnocení

Řešením této varianty byl potvrzen předpoklad o podobnosti proudění standardního provedení a provedení s oddálenou tryskou. Prakticky veškerá energie proudu je využívána na transport vlákna. Proud se nestáčí a ani významně neztrácí na síle. Malá nesymetričnost, patrná hlavně v příčných řezech, je způsobena odrazem proudu na čele kanálu. Vzniká zde slabé zpětné proudění, které však ovlivní pouze pomalejší část původního proudu. Varianta s oddálenou tryskou je úspěšným řešením problému s odklonem proudu vzduchu od osy kanálu z úlohy č.2. Hodnoty rezidua jsou znázorněny na **obr.5-19**.



Obr.5-19. Průběh rezidua, provedení s oddálenou tryskou

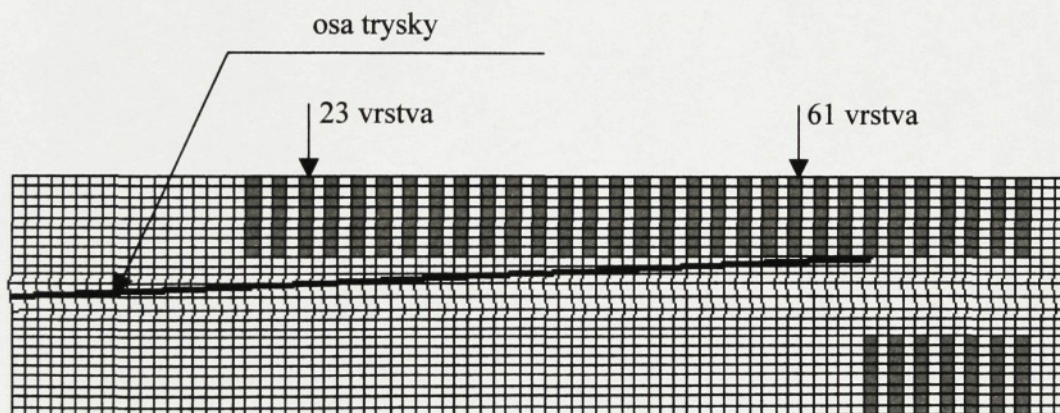
5.3.4. Provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky

Posledním řešeným modelem je provedení, u kterého je vynechána nejen spodní stěna, ale je také pozměněn sklon trysky tak, aby se proud dostal do kanálu po předchozím odrazu od jeho horní stěny. Tím se snad předejde

nadměrnému stáčení proudu a dosáhne se lepšího rychlostního profilu. Podmínkou spolehlivého provozu stroje je, aby vlákno překonalo bezproblémově vzdálenost mezi ústím trysky a první pomocnou tryskou.

5.3.4.1. Geometrie a síť – specifika provedení

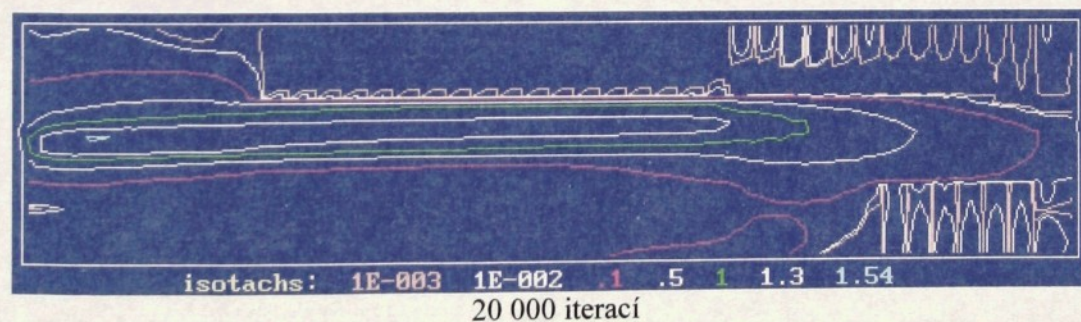
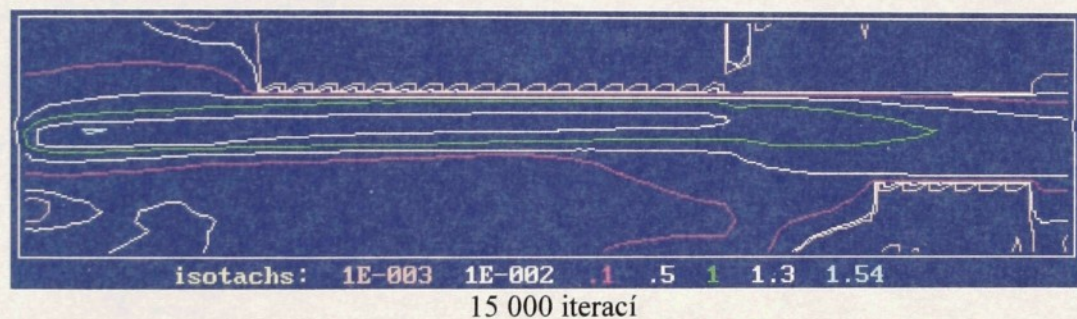
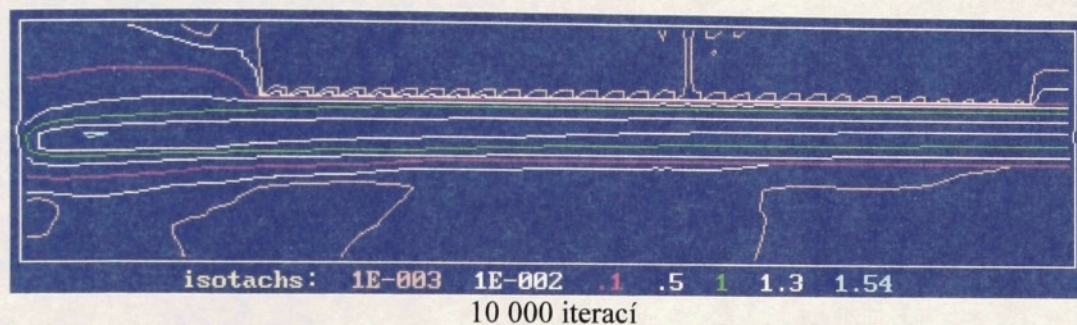
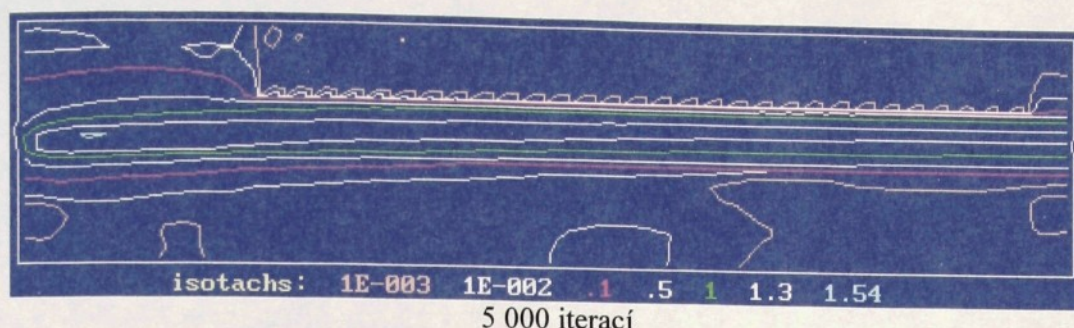
Model nemá osu trysky totožnou s osou kanálu. Osa trysky svírá s osou kanálu úhel $4,035^\circ$ směrem nahoru při pohledu na podélný řez oblastí. Úhel je vypočítaný tak, aby se proud odrazil od horní stěny kanálu v místě, kde začínají klasické lamely. Geometrie kanálu je shodná s úlohou č.2. (**obr.5-20**). Natočení trysky deformuje střední část sítě.



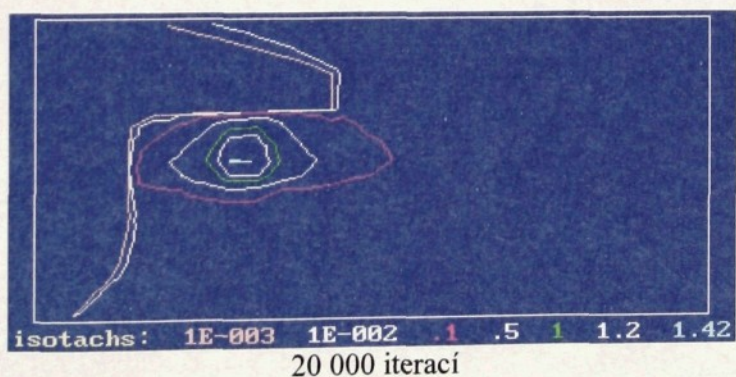
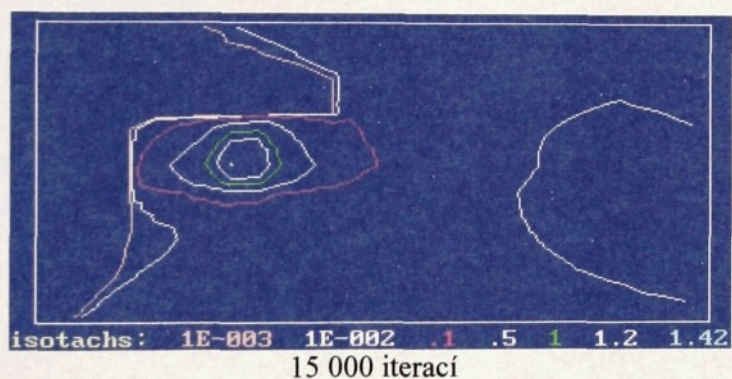
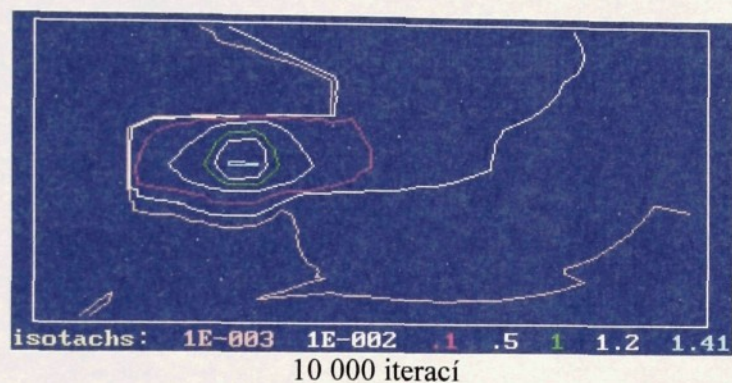
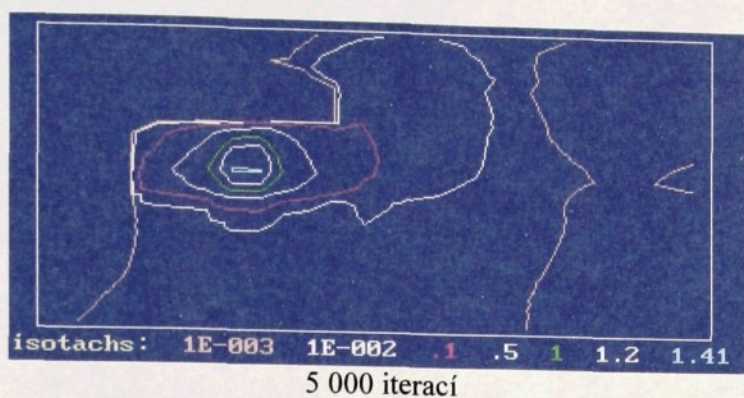
Obr.5-20. Kanál v podélném řezu – provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu vstupní trysky

5.3.4.2. Výsledky

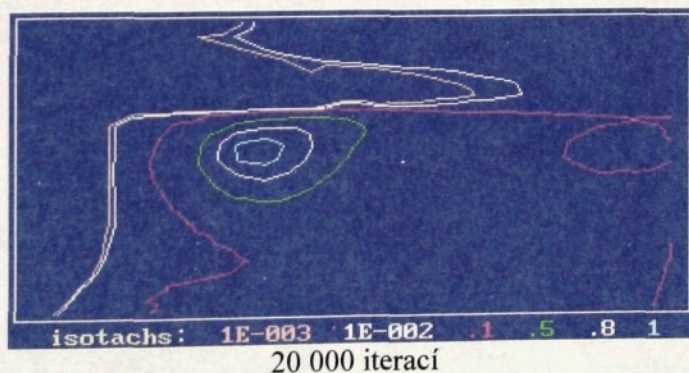
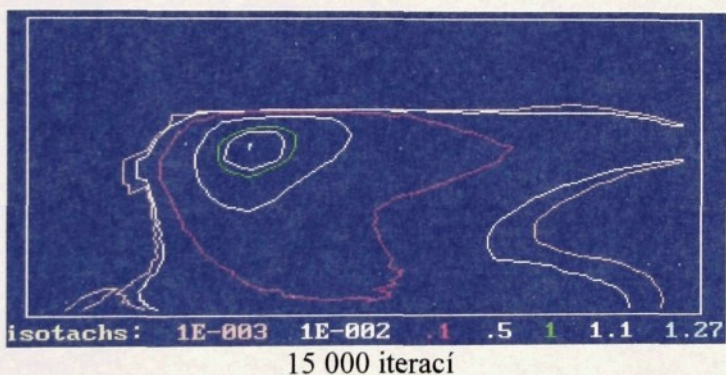
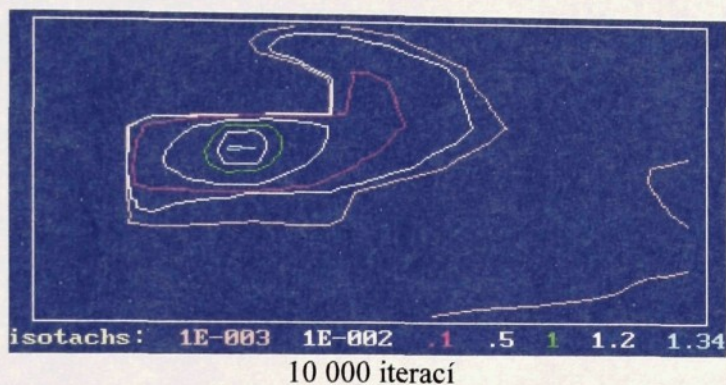
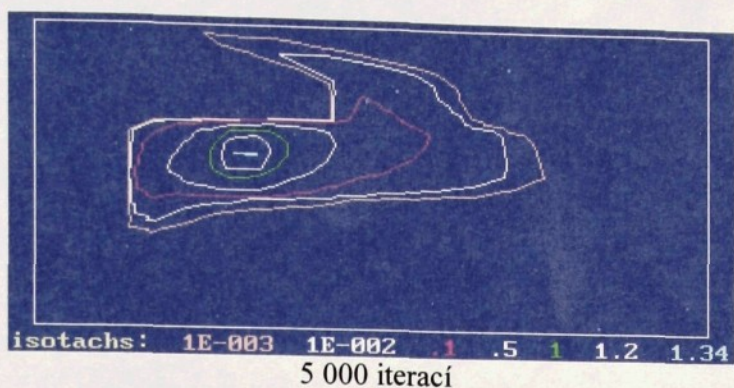
Výsledky jsou standardně znázorněny po 5 000 iteracích v podélných a příčných řezech rychlostním polem (**obr.5-21, 5-22, 5-23**). Opět byl průběh úlohy sledován po 1 000 krocích, celkem 20 000 iterací. Rychlost je určena pomocí bezrozměrné veličiny λ .



Obr.5-21. Podélné vodorovné rychlostní profily v prohozném kanálu, provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky



Obr.5-22. Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky (23.vrstva)

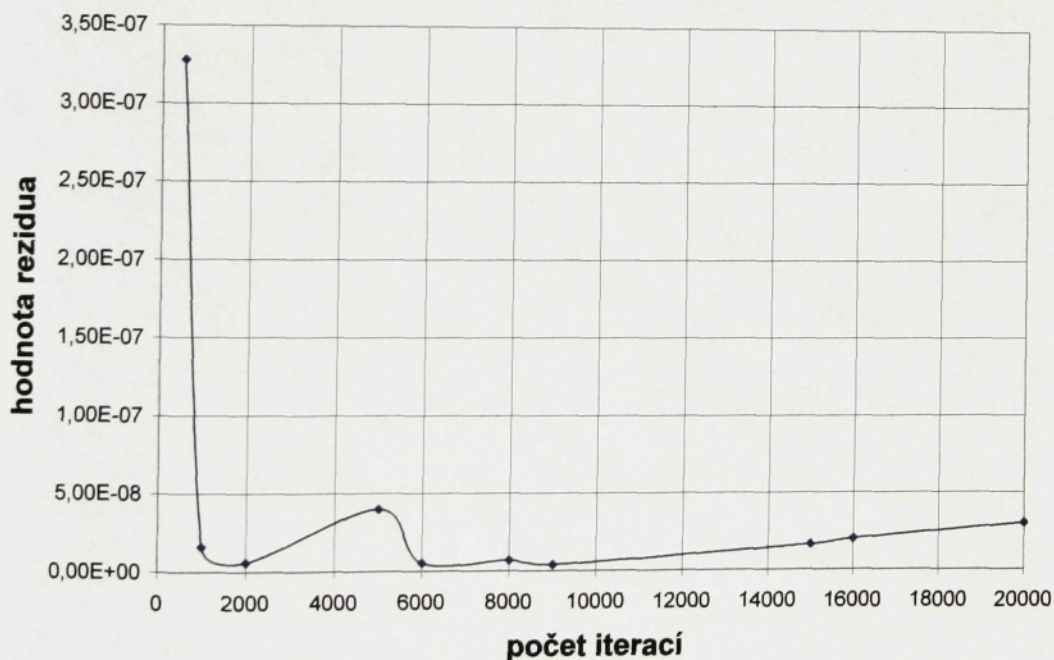


Obr.7-23. Příčné svislé rychlostní profily v prohozním kanálu, provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky (61.vrstva)

5.3.4.3. Vyhodnocení

Změnou sklonu trysky se rychlostní profil proudu oproti úloze č.2 výrazně zlepšil. Nedochází ohýbání proudu směrem dolů (v podélném řezu), pouze nepatrně směrem vpravo (v příčné řezu). Proud sice ztrácí na mohutnosti, protože v kanálu dochází k částečnému odklonu proudu, ale pomocné trysky by měly zajistit spolehlivý transport unášeného vlákna. V místě první pomocné trysky je rychlostní profil rovnoměrný a proud je dostatečně silný. V kombinaci s posilovací tryskou se celkový rychlostní profil určitělepší.

Přesto nejsou dosažené výsledky dostatečně uspokojivé, abychom mohli říct s naprostou jistotou, že bude tato varianta absolutně bezproblémová. Změnou sklonu trysky bylo sice zamezeno výraznému ohybu proudu, nicméně to bylo na úkor ztráty energie proudu. Pokud není osa trysky totožná s osou kanálu, nutně dochází k tlakovým ztrátám vyplňováním mezilamelového prostoru částí proudu (nárůst příčné složky rychlosti). Hodnoty rezidua jsou znázorněny na obr.5-24.



Obr.5-24. Průběh rezidua, provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky

5.4. Celkové vyhodnocení

Řešením jednotlivých úloh bylo získáno velké množství poznatků. Na modelu standardního provedení kanálu byla ověřena funkčnost a spolehlivost výpočetního softwaru. Zároveň jsme získali obraz rychlostního pole v klasickém prohozním kanálu, které je svými vlastnostmi ideální pro transport unášeného vlákna. Modelováním úlohy s vynechanou spodní stěnou byl potvrzen výrazný odklon proudu od osy kanálu jako pravděpodobná příčina provozních problémů. Ze dvou variant, které měly vzniklou poruchu proudění řešit, se jako lepší jeví provedení s oddálenou tryskou. Jeho rychlostní profil je velmi podobný standardnímu provedení. Horší vlastnosti má úloha s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky. Dochází u ní k mírnému vybočení proudu z kanálu a k podstatné ztrátě energie proudu. Zda-li tuto ztrátu nahradí pomocná tryska tak, aby byl transport útku bezporuchový, nelze tvrdit s absolutní jistotou. Proto by bylo dobré ověřit výsledky této úlohy experimentálně.

Pro detailnější vzájemné porovnání řešených úloh, jsou na **obr.5-25** znázorněny podélné řezy ve finální podobě - při 20 000 iteracích a na **obr.5-26** příčné řezy v 61. vrstvě vodícího kanálu, také při 20 000 iteracích. Z obou obrázků jsou patrné tyto výsledky:

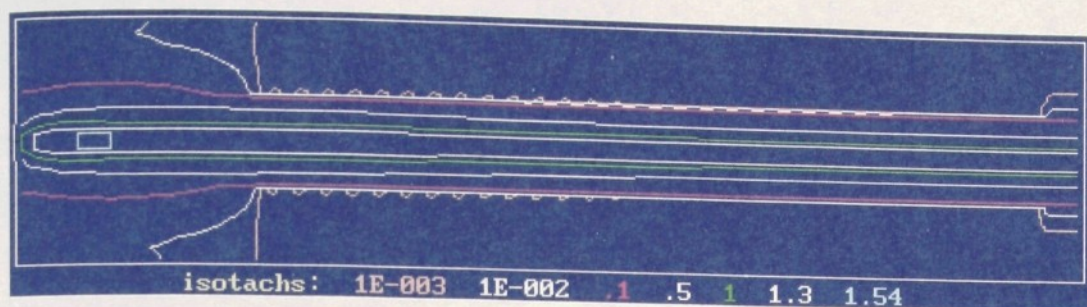
- 1) Standardní provedení prohozního kanálu má rovnoměrně vyvinutý rychlostní profil, na počátku dochází k nepatrnému vyplňování mezilamelového prostoru, tento jev však kolem 45 vrstvy ustává a proudění je nadále podél stěn hladké. Proud je po celé délce kanálu symetrický, veškerá energie proudu je využívána na transport vlákna. Z příčného řezu je zřejmé, že osa proudu je totožná s osou kanálu a nedochází tak k odklonu proudu. Také z průběhu hodnot rezidua je patrné, že proudění je v kanálu ustálené. Podmínky pro transport vlákna prohozním kanálem jsou jednoznačně ideální.
- 2) U provedení s vynechanou spodní stěnou (původní provozní provedení) se projevil odklon hlavní části proudu, což bylo způsobenou novou geometrií prohozního kanálu (zařazením lamel bez spodního „nosu“). Z průběhu hodnot rezidua je patrné, že k tomuto jevu dochází už při 13 000

iteracích.

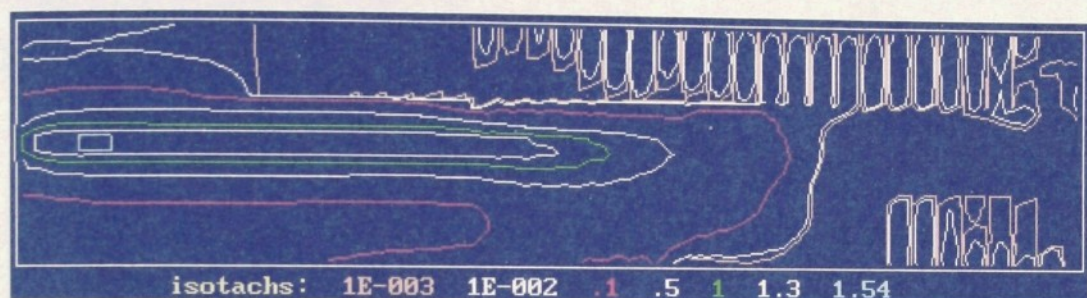
V podélném řezu je dobře patrné, že problémy s rovnoměrností proudění nastávají už kolem 25 vrstvy (6 lamela), proud postupně ztrácí na mohutnosti, vyplňuje zcela mezilamelové prostory, a stáčí se směrem dolů. Do části kanálu tvořené klasickými lamelami proudí minimum energie původního proudu. V důsledku odklonu proudu je patrné silné přisávání vzduchu z okolí na horní straně kanálu v mezilamelovém prostoru. V příčném pohledu je vidět, že proud se nestáčí pouze směrem dolů, ale i na pravou stranu (z kanálu ven). Jádru proudu se nachází zcela mimo osu prohozního kanálu. Takovéto rychlostní pole musí nutně působit problémy v provozu, které se projevovaly tak, že se útek hromadil na počátku kanálu, nebo v důsledku malých silových účinků slabého proudu nedolétl až na jeho konec (tzv. útkový nedolet).

- 3) Ve třetí úloze byla řešena varianta kanálu s oddálenou tryskou. Vychází z výsledků proudění získaných ve standardním kanálu. Předpokládá, že úplným vynecháním lamel bez spodního „nosu“ bude vzniklé proudění výrazně podobné proudění u standardního provedení. Numerickým modelováním byl tento předpoklad potvrzen. Proud je na vstupu do kanálu rovnoměrně vyvinutý a dostatečně silný pro transport útku. Proudění podél stěn v klasické části kanálu je hladké. V porovnání se standardním provedením je méně symetrické, neboť průřez kuželové plochy volného proudu je zde větší, a proto slabé proudění vzniklé po odrazu proudu na čele kanálu způsobí větší ovlivnění původního proudu, než jak je tomu v provedení č.1. Z obou řezů je zřejmé, že osa proudu je víceméně totožná s osou prohozního kanálu. Hodnoty rezidua ukazují na to, že proudění je plně vyvinuté. Toto provedení úspěšně řeší problémy s prouděním v kanálu vzniklé v úloze č.2.
- 4) Poslední modelovanou úlohou bylo provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky. Tato varianta je druhým řešením situace vzniklé v úloze č.2. Byla ponechána původní geometrie kanálu, ale osa trysky byla natočena tak, aby se proud vzduchu dostal do klasické části kanálu

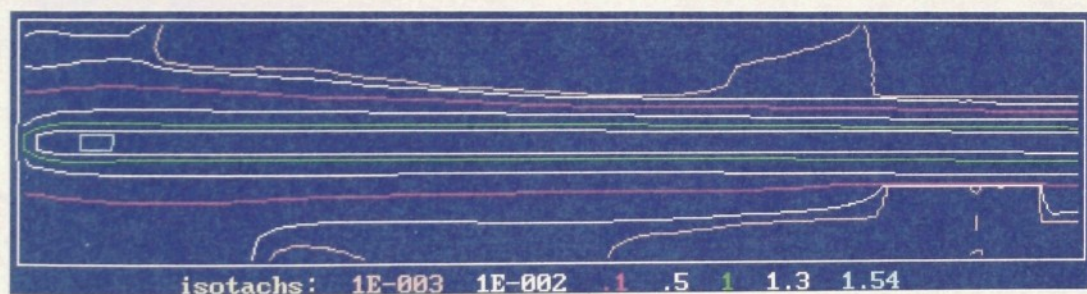
po předchozím odrazu od jeho horní stěny (v místě první klasické lamely). Toto řešení není tak úspěšné jako v předchozí úloze. Proud se sice neodklání od původního směru (alespoň jeho hlavní část), dochází však k velké tlakové ztrátě proudu. Ta je způsobena nejen geometrií kanálu, ale také natočením osy hlavní trysky. Nutně tak dochází k nezanedbatelným ztrátám vyplňováním mezilamelového prostoru částí proudu. V příčném řezu je patrné malé odklonění proudu směrem ven z kanálu (vpravo). Stejně jako v úloze č.2 i zde dochází k přisávání vzduchu z okolního prostředí v důsledku odklonu proudu. Přisávání není tolik rozsáhlé, vyskytuje se ve větší vzdálenosti od počátku prohozního kanálu než u varianty č.2. Dochází zde také k výraznému zlepšení rychlostního profilu proudu, hlavně v příčném řezu. Proud začíná ztrácet na mohutnosti přibližně v místě polohy první pomocné trysky, a proto by nemělo docházet k provozním problémům, ale lepší by bylo úlohu experimentálně ověřit. Jako lepší řešení problému z úlohy č.2 se jeví provedení č.3.



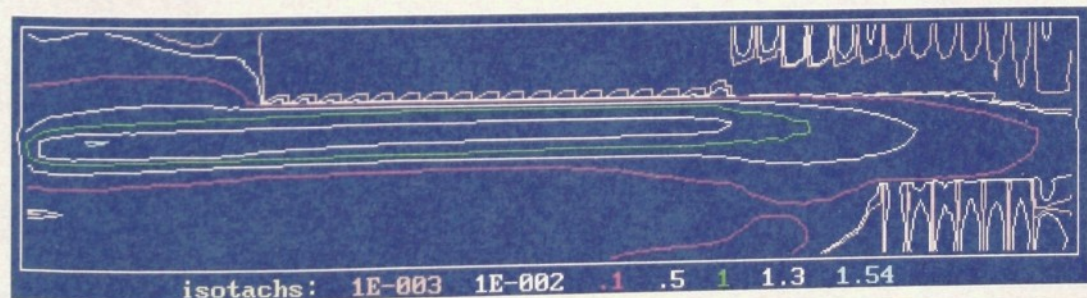
1) standardní provedení



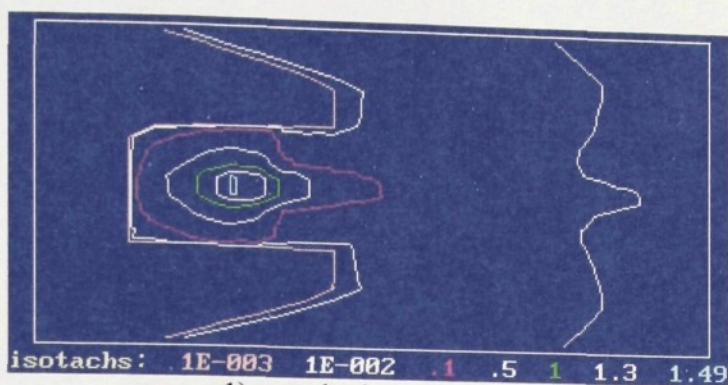
2) provedení s vynechanou spodní stěnou



3) provedení s oddálenou tryskou



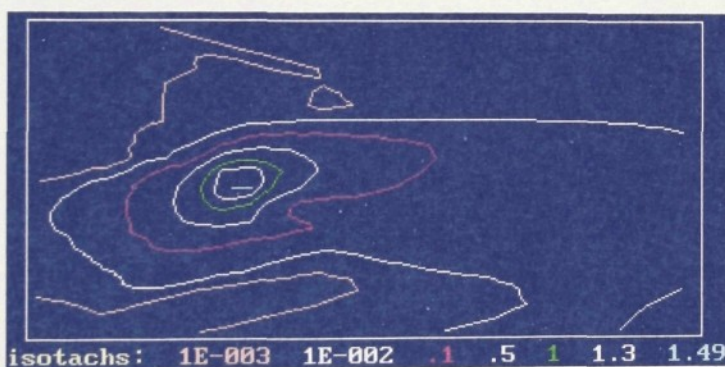
3) provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky



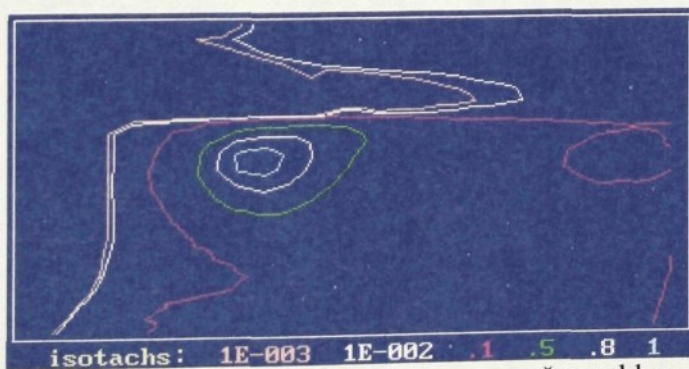
1) standardní provedení



2) provedení s vynechanou spodní stěnou



3) provedení s oddálenou tryskou



4) provedení s vynechanou spodní stěnou a se změnou sklonu trysky

6. Závěr

Podrobné výsledky získané numerickým modelováním a jejich diskuse jsou uvedeny v předchozí kapitole (5.4). Komplexní model 3D proudění v prohozním kanálu tkacího paprsku vzduchového tkacího stroje se ukázal být natolik složitý, že reálná možnost řešení je pouze za cenu značných zjednodušení. Zanedbáním musel být z časových důvodů reálný tvar lamely (zaoblení hran) a kruhový průřez hlavní trysky. Zjednodušeny byly také počáteční a okrajové podmínky, vše z časových důvodů. Numerické modelování s reálným tvarem lamely by se současným hardwarovými možnostmi trvalo celé měsíce. Zanedbání kruhového průřezu trysky bylo možné na základě ověřené teorie, že se rychlostní profil proudu za výstupem z čtverhranného hrdla rychle mění v klasický kuželový profil, typický pro kruhový průřez ústí trysky. Zanedbání zaoblení hran lamel bylo možné na základě výsledků z práce [3] (viz kap.4.1). V ní byl ve 2D modelován vliv hrany lamel. Pro získání výsledků byl proto použit první stupeň přesnosti, spolu s největšími elementy sítě. Nespornou výhodou numerického modelování je fakt, že získané výsledky jsou přímo použitelné při konstrukční úpravě prohozního kanálu.

Jednotlivá řešení modelovaných úloh se prakticky shodují s výsledky, které byly získány 2D modelováním. Bylo by vhodné pro další modelování použít výkonnější hardware k respektování zanedbaných jevů (hlavně zaoblení hran) a ověřit získané výsledky také v jiném 3D softwaru. Zvolený program totiž neumožňuje řešit složitější uspořádání lamel v prohozním kanálu (např. variantu s vlepenými lamelami, která se ve 2D ukázala být také úspěšným řešením problému z úlohy č.2).

7. Použitá literatura

- [1] ABRAMOVIČ, G.N.: *Aplikovaná dynamika plynů*, Technicko-vědecké vydavatelství Praha, 1952
- [2] ADÁMEK, K.: *Tkací paprsek Vega*, zpráva VÚTS Liberec, 2000
- [3] ADÁMEK, K.: *Vlivy konstrukčních parametrů tkacího paprsku na obraz proudění v prohozním kanálu*, zpráva VÚTS Liberec, 2000
- [4] CHYSKÝ, J., OPLL, L.: *Větrání a klimatizace*, SNTL Praha, 1973
- [5] PELANT, J., ADÁMEK, K.: *3D Proudění v prohozním kanálu vzduchového tkacího stroje*, zpráva VÚTS Liberec, 2000
- [6] PELANT, J.: *Aerodynamics of air jet weaving system*, zpráva VZLÚ Praha, 2000
- [7] PELANT, J.: *Rukopis manuálu k programu*, Praha, 2000
- [8] SCHLICHTING, H.: *Grenzschicht Theorie*, G.Braun Karlsruhe, 1965

8. Seznam příloh

1. Kopie DP na CD nosiči, formát Microsoft Word 97