

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



FAKULTA STROJNÍ

OBOR 23-17-8

Konstrukce strojů a zařízení

zaměření

Tepelná technika

Katedra energetických zařízení

Numerická simulace aerodynamiky vzduchových clon

Diplomová práce

Pavel Václavík

Liberec 1998

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra: energetických zařízení

Školní rok: 1997/98

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Pavel Václavík

obor 23-17-8 Konstrukce strojů a zařízení
zaměření: Tepelná technika

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Numerická simulace aerodynamiky vzduchových clon

Zásady pro vypracování:

1. Rešeršní studie konstrukce vzduchových clon, jejich aplikace pro různé typy zástaveb s ohledem na druh provozu, topné období a hygienické požadavky.
2. Teorie aerodynamiky zatopených proudů, dynamika plochých volných proudů a dynamika těchto proudů při současném působení paralelního toku externího vzduchu.
3. Numerická simulace interakce proudových polí v prostoru vzduchových vrst s alternativními vstupy.
4. Formulace systému konstrukčních doporučení pro volbu výkonových typů vzduchových clon z hlediska optimálního využití energie a tepelné pohody prostředí při různých způsobech aerace pracovních prostorů.

Rozsah grafických prací : do 15 stran grafických průběhů polí rychlostí
další v příloze
Rozsah průvodní zprávy : do 50 stran

Seznam odborné literatury :

1. Chyský, I., Hemzal, K. a kol.: Větrání a klimatizace. ČMT,
Praha 1993.
2. Taliev, V.N.: Aerodynamika ventilácií. Strojizdat, Moskva 1951.
3. Schlichting, M.: Grenzschicht - Theorie, Karlsruhe 1951.
4. Idelčik, I.E.: Spravočnik po gidravličeskim soprotivenijam.
GEI, Moskva 1960.
5. Recknagel - Sprenger : Vykurovanie, vetranie, klimatizácia.
ALFA Bratislava 1971.
6. Firemní literatura GEA.
7. Algor - Fluid Flow. Pittsburgh, 1992.

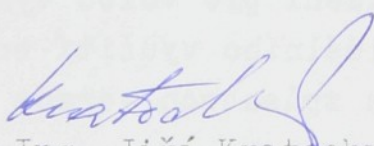
Vedoucí diplomové práce : Doc. Ing. Jiří Unger, CSc.

Konzultant : Ing. Jiří Hulička

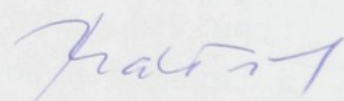
Zadání diplomové práce : 31.10.1997

Termín odevzdání diplomové práce : 29.05.1998




Prof. Ing. Jiří Kratochvíl, CSc.

Vedoucí katedry


Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.

Děkan

31.10.97

ANOTACE

Téma : Numerická simulace aerodynamiky vzduchových clon

Tato diplomová práce vytváří orientační směrnici pro vhodnou volbu vzduchových clon v závislosti na jejich parametrech a geometrii vrat chráněného prostoru. Tato směrnice je sestavena na základě výsledků numerické simulace vzájemného působení proudových polí vzduchové clony a externího proudu vzduchu. Numerická simulace byla provedena metodou konečných prvků (MKP) prostřednictvím softwarového produktu *Algor*. Na závěr jsou výsledky numerické simulace porovnány s hodnotami experimentálního měření.

ANNOTATION

Theme : Numerical simulation aerodynamics of air curtains

This thesis creates an orientational directive for a suitable options of air curtains depending on their parameters and the geometry gate of protected precinct. The directive is composed according to the results of a numerical simulation of the interaction flow fields of an air curtain and external current of air . The numerical simulation was carried out by the Finite Element Analysis (FEA) using *Algor* software product. The conclusion includes results of a numerical simulation compared with values of an experimental measurement.

Prohlášení :

Jsem si vědom, že tato diplomová práce je majetkem Technické univerzity, že s ní sám bez svolení Technické univerzity nemohu volně disponovat, a že může být zapůjčena nebo objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po pěti letech si mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně TU v Liberci, kde je uložena.

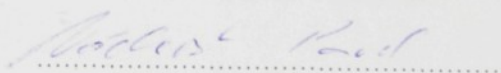
Jméno a příjmení

Pavel Václavík

Adresa

Školní 805

530 06 Pardubice



Podpis

Poděkování

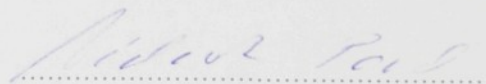
Na tomto místě bych chtěl vyjádřit poděkování Doc. Ing. Jiřímu Hrubému, který mi poskytl všechny potřebné informace a rady k řešení diplomové práce a zejména předmětné, rovněž a také k její obhajobě. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Hrubému za rady a podporu při zpracování této práce v programu Word.

Místopřísežné prohlášení

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

V Liberci dne

25.5.1998



Pavel Václavík

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl velmi poděkovat Doc. Ing. Jiřímu Ungrovi za vedení diplomové práce a za cenné připomínky, náměty a rady k její obsahové stránce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Huličkovi za rady a podporu při numerické simulaci v programu *Algor*.

2.3. Obecné základy pro používání clon	7
2.4. Emergentní přenos	6
3. ZATOPENÉ PROUDY	12
3.1. Základní vzpělení	12
3.2. Vlny turbulentní proud	13
3.2.1. Prandtlův teorie vlnit turbulent	13
3.2.1.1. Píseční Prandtlův teorie	14
3.2.1.2. Míra Prandtlův teorie	15
3.2.2. Píseční turbulentní proud	22
3.2.3. Výpočtové vzorce pro plyný vlnit turbulent proud	23
3.3. Interakce s vlnitými proudy	24
3.4. Proud vlnitové clony	25
4. NUMERICKÁ SIMULACE	33
4.1. Metoda konečných prvků (MKEP)	33
4.2. Algor	37
4.2.1. Popis prostředí	37
4.2.2. Prvky	37
5. VÝSLEDKY NUMERICKÉ SIMULACE	39
5.1. Částečná nelineární zjednodušení	39
5.1.1. Gouletis model	39
5.1.2. Numerické výsledky	39

OBSAH

	strana
SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ	3
1. ÚVOD	6
2. VZDUCHOVÉ CLONY	7
2.1. Význam	7
2.2. Konstrukce	7
2.3. Obecné zásady pro používání clon	8
2.4. Energetický přínos	9
3. ZATOPENÉ PROUDY	12
3.1. Základní rozdělení	12
3.2. Volný turbulentní proud	12
3.2.1. Prandtlovy teorie volné turbulence	13
3.2.1.1. <i>Původní Prandtlůva teorie</i>	14
3.2.1.2. <i>Nová Prandtlůva teorie</i>	18
3.2.2. Plochý izotermní proud	22
3.2.3. Výpočtové vztahy pro plochý volný izotermní proud	23
3.3. Interakce s unášivými proudy	24
3.4. Proud vzduchové clony	28
4. NUMERICKÁ SIMULACE	31
4.1 Metoda konečných prvků (MKP)	31
4.2 Algor	32
4.2.1. Popis prostředí	32
4.2.2. Prostředky	32
5. VÝSLEDKY NUMERICKÉ SIMULACE	34
5.1. Částečná infiltrace zadní stěnou	35
5.1.1. Geometrie modelů	35
5.1.2. Numerické výsledky	36

5.2. Částečná infiltrace zadní stěnou a stropem	46
5.2.1. Geometrie modelů	46
5.2.2. Numerické výsledky	46
6. DISKUSE NUMERICKÝCH VÝSLEDKŮ	49
6.1 Porovnání s teoretickými podklady	49
6.2 Porovnání s experimentem	52
7. SMĚRNICE PRO VOLBU VZDUCHOVÝCH CLON	56
8. ZÁVĚR	59
Literatura	62
Příloha	

E	[J]	kinetická energie
g	[m s ⁻²]	gravitační zrytklost
A	[m]	výška
A_c	[m]	výška samostatné rovné stěny
l	[m]	osvětlovací délka
M	[kg m ⁻³]	hmotnostní průtok
m	[kg]	hmotnost samostatného rovného stěny
N	[m]	osvětlovací délka
O	[m]	osvětlovací délka
p	[Pa]	tlak
p_d	[Pa]	dynamický tlak
p_o	[Pa]	barometrický tlak
Q	[W]	tepelný výkon
r	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	měra plynové konstanta
	[m]	poloměr proudnice
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
	[m]	vzdálenost
	[°C]	teplota
	[K]	absolutní teplota
	[m s ⁻¹]	rychlost gravitačního volného pádu

SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ

a	[1]	součinitel výřivosti
A	[m ²]	plocha
	[m]	rozměr
b	[m]	šířka poloviny proudu
B	[m]	rozměr
c	[1]	experimentální konstanta
	[m]	rozměr
c_n	[1]	experimentální konstanta
d_{ch}	[m]	charakteristický rozměr
D	[m]	rozměr
E	[J]	kinetická energie
g	[m s ⁻²]	tíhové zrychlení
h	[m]	výška
h_n	[m]	výška neutrální roviny vrat
l	[m]	směšovací délka
$\dot{M}$	[kg s ⁻¹]	hmotnostní průtok
n_{2u}	[1]	koefficient nerovnoměrnosti rychlostního pole
N	[N]	normálová síla
O	[m]	obvod
p	[Pa]	tlak
p_d	[Pa]	dynamický tlak
p_B	[Pa]	barometrický tlak
Q	[W]	tepelný výkon
r	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	měrná plynová konstanta
	[m]	poloměr proudnice
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
s	[m]	vzdálenost
t	[°C]	teplota
T	[K]	absolutní teplota
u	[m s ⁻¹]	rychlost unášivého vnějšího pole

U_{lim}	$[m\ s^{-1}]$	mezní rychlost
$\dot{V}$	$[m^3\ s^{-1}]$	objemový průtok
w	$[m\ s^{-1}]$	rychlost proudu clony
x	$[m]$	souřadnice
y	$[m]$	souřadnice
z	$[m]$	délka osy proudu, souřadnice
α	$[^\circ]$	úhel clony
κ	$[1]$	empirická konstanta
ϑ	$[^\circ]$	úhel rozšíření proudu
λ	$[1]$	penalty parametr
μ	$[1]$	součinitel průtoku
	$[Pa\ s]$	dynamická viskozita
μ_T	$[Pa\ s]$	turbulentní viskozita
ν	$[m^2\ s^{-1}]$	kinematická viskozita
ξ	$[1]$	bezrozměrná souřadnice
ρ	$[kg\ m^{-3}]$	hustota
σ	$[1]$	experimentální konstanta
τ	$[Pa]$	tečné napětí
Φ	$[N]$	odstředivá síla
φ	$[1]$	bezrozměrná souřadnice
χ	$[1]$	konstanta nerovnoměrnosti rychlostního pole

Dolní indexy

c	osa proudu
cl	clona
v	vrata
o	otvor
s	směs
i	interní
e	externí
0	v ústí clony
x	souřadnice

y	souřadnice
h	vzdálenost
A	průřez
H	hybnost
j	jádro proudu
$stř$	střední
u	vnější unášivé pole
w	proud clony

Horní indexy

x'	flukтуаční hodnoty
$\bar{x}$	časově středované hodnoty

1. ÚVOD

Proudění tekutiny člověka doprovází prakticky na každém kroku. Typickým příkladem je proudění vzduchu. Při pozorování těchto jevů si člověk všiml jistých účinků proudů na své okolí (víření prachu, ohýbání stromů, rozdmýchávání ohně...), a proto se jimi začal zabývat ve snaze využít těchto účinků ve svůj vlastní prospěch (větrné mlýny, plachetnice, ...).

V první fázi se člověk zabýval základními zákonitostmi popisujícími šíření zatopených proudů a základními parametry, které na šíření proudů mají vliv (geometrie výusti, počáteční rychlost, stav počátečního rychlostního pole, ...). Na základě toho vznikly teorie popisující šíření volných proudů např. teorie L. Prandtla, G. J. Taylora, H. Görtlera, H. Schlichtinga a pokusy, které tyto teorie ověřují, např. ty které provedly T. Trüpel, M. L. Albertson, W. Tollmien, H. Reichardt.

Dále bylo také zkoumáno vzájemné působení mezi jednotlivými proudy, které se od sebe lišily některými svými parametry (směr a rychlost proudění, teplota, ..). Tímto problémem se zabývali např. G. S. Šandorov, J. V. Ivanov, I. A. Šepelev, M. S. Volinský, G. N. Abramovič, V. V. Baturin.

Jedním z autorů, kteří tyto základní poznatky shrnul byl např. G. N. Abramovič (*Abramovič, G. N. : Teorija turbulentnyh struj*).

Na základě poznatků těchto a dalších autorů došlo k využívání účinků proudů tekutin k různým účelům. Jedním z nich je oddělení dvou prostorů s různými fyzikálními parametry, které jsou často spojovány prostřednictvím otevřených dveří či vrat. Nejrozšířenějším způsobem oddělení takovýchto prostor je prostřednictvím instalace vzduchové clony.

Tato práce se zabývá numerickou simulací interakce proudu vzduchové clony a externího proudu vzduchu. K numerické simulaci je použito softwarového produktu *Algor*, který řeší simulované problémy metodou konečných prvků (MKP). Vzhledem ke koncepci tohoto programu jde však pouze o řešení problému proudění bez řešení problému sdílení tepla. Cílem této práce je numerická optimalizace návrhu vzduchových clon VIENTO v závislosti na rychlosti externího proudu vzduchu, výstupního vektoru rychlosti ze vzduchové clony a geometrii vrat při různých případech infiltrace interního prostoru. Výsledkem, na základě numerické simulace, by měla být směrnice pro projektanty při návrhu různých typů vzduchových clon VIENTO A, B, C.

2. Vzduchové clony

2.1. Význam

Provozy některých objektů charakteristických častým otevíráním vnějších dveří (tovární haly, depa, obchodní domy) a provozy speciálního určení (vyšší nároky na klimatické a hygienické požadavky) vyžadují ochranu před vnějšími proudy vzduchu o nežádoucích fyzikálních parametrech. Jedním z nejlepších způsobů ochrany je vzduchová clona.

Vzduchové clony snižují volný průtok vzduchu a tepelné ztráty otevřenými vraty, jimiž v důsledku gravitačních sil a účinkem externího proudu vzduchu vstupuje do chráněných prostor vnější vzduch. Ten zhoršuje tepelnou pohodu prostředí a představuje značnou energetickou ztrátu. Clona produkuje úzký plochý proud vzduchu o dostatečné hybnosti. Proud vzduchu je veden přes výměník tepla výstupními lamelami shora, zdola či ze stran dveřního prostoru. Výstupní lamely směřují proud vzduchu pod určitým úhlem α proti proudu vnikajícího vzduchu do místnosti. Tím dochází k zastavení či omezení pronikání externího proudu vzduchu do chráněného prostoru.

Pro dokonalou funkci vzduchové clony, kdy je dán požadavek aby externí proud byl zcela oddělen od interního prostoru, je třeba vytvořit takovou dynamiku proudu (proud o dostatečné hybnosti), aby v oblasti blízké rovině vrat vznikl stagnační bod eventuelně vír, který oddělí vnitřní prostor od externího prostředí.

2.2. Konstrukce

Vzduchové clony jsou tvořeny vhodně volenou skříní, záleží na prostředí, pro které je clona navrhována (tovární haly, obchodní domy, banky, specializovaná pracoviště a pod.). Jejich velikosti jsou odstupňovány v několika řadách, které lze snadno sdružovat ve větší celky.

Samotná clona se skládá ze sacího filtru, ventilátoru, tepelného výměníku a výstupních lamel (viz. Obr. 2.1).

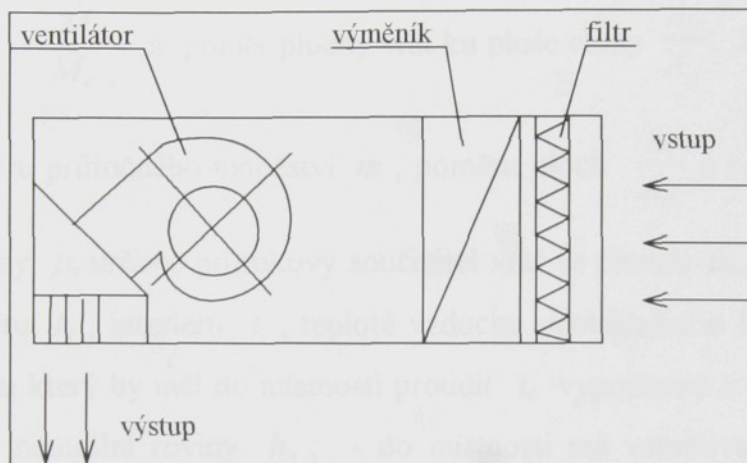
Volba sacího filtru závisí na hygienických požadavcích chráněného prostoru. Důvodem je skutečnost, že vzduchové clony pracují s vnitřním (cirkulačním) znečištěným vzduchem.

Tepelné výměníky lze instalovat v několika provedeních: horkovodní, teplovodní a elektrické. Parní se vzhledem k velké energetické náročnosti již nepoužívají.

Ventilátory se dodávají v závislosti na požadovaném výkonu clony.

U ventilátorů a tepelných výměníků je nutné zajistit možnost regulace - plynulé nebo skokové.

Obr. 2.1 - Schéma vzduchové clony



2.3. Obecné zásady pro používání clon

- 1) - Výstupní lamely clony nastavit vždy minimálně pod úhlem 15° směrem ven z chráněného prostoru. Při zástavbě se závětrím asi 30° , u vstupního koridoru (vstupní chodby) i více.
- 2) - Clonu je nutné umístit co možná nejbližší otevřených vrat a výškově tak, aby ústí výstupních lamel bylo na stejné úrovni jako horní rovina vrat.
- 3) - Celková šířka instalovaných vzduchových clon musí být větší, nejméně však shodná se skutečnou šířkou vrat.
- 4) - Zajistit dostatečný prostor pro sání clony.
- 5) - Ovládání vzduchové clony vhodně spojit s ovládáním vrat.
- 6) - Vhodnou regulací zajistit přiměřený průtok clonou (výkonové stupně) a teplotní spád na výměníku v závislosti na interních a externích podmínkách.
- 7) - Minimální teplotní spád tj. rozdíl teplot vzduchu na výstupu a vstupu do clony by neměl poklesnout pod 5 K.

8) - Převážná část přivedeného vzduchu clonou musí být vtačována externím proudem dovnitř.

2.4. Energetický přínos

Při návrhu clony se vychází z počtu dnů v otopného období. V závislosti na ní se volí hodnoty ; $m = \frac{\dot{M}_{cl}}{\dot{M}_{v,cl}}$ a poměr plochy vrat ku ploše clony $\frac{A_v}{A_{cl}}$. Ze zvoleného úhlu clony α_0 , poměru průtočného množství m , poměru ploch $\frac{A_v}{A_{cl}}$ a součinitele průtoku otvorem bez clony μ_0 určíme průtokový součinitel vrat se clonou $\mu_{v,cl}$. V závislosti na teplotách exteriéru t_e , interiéru t_i , teplotě vzduchu odcházejícího horními otvory t_o a teplotě vzduchu který by měl do místnosti proudit t_s vypočteme z aerace (princip na Obr. 2.2) výšku neutrální roviny h_n ; - do místnosti má vstupovat stejné množství vzduchu jako vystupovat. Z rozdílu hustot v prostoru vrat určíme tlakový spád v prostoru vrat Δp_v a následně průtočné množství vraty $\dot{M}_{v,cl}$. Z definice poměru m určíme průtočné množství clonou $\dot{M}_{cl}$. Do chráněného prostoru vstupuje pak proud složený z proudu clony, externího proudu $\dot{M}_e$ a vzduchu přísávaného z vnitřku $\dot{M}_i$. Přičemž platí předpoklad, že $\dot{M}_e = \dot{M}_i$. Vraty tedy vtéká

$$\dot{M}_{v,cl} = \dot{M}_e + 2 \dot{M}_e = 1.69 \beta \dot{M}_{cl}, \text{ kde } \beta = 1.69 \sqrt{\frac{a}{b} z + 0.2}; \quad a - \text{součinitel vířivosti,}$$

b - šířka šterbiny, z - délka osy proudu - $z \approx \frac{\pi \alpha_0 H}{180 \sin \alpha_0}$, H - výška vrat. Ze vztahu pro proteklé množství vraty určíme teplotu proudu vzduchu z clony t_{cl} . Následně určíme tepelný výkon potřebný na ohřátí vzduchu v cloně a porovnáme s nutným instalovaným výkonem bez clony.

Pro délku otopného období 250 dnů $\Rightarrow m = \frac{\dot{M}_{cl}}{\dot{M}_{v,cl}} = 0.7$, $\frac{A_v}{A_{cl}} = 15$ (šířka štěrbiny 40÷200 mm)

$\alpha_0 = 30^\circ$ (nechráněný prostor)

$$A_v = 3 \cdot 3 = 9 \text{ m}^2$$

teploty $\rightarrow$ externí - $t_e = -18^\circ\text{C}$

interní - $t_i = 18^\circ\text{C}$

teplota směsi - $t_s = 16^\circ\text{C}$

teplota - $t_o = 20^\circ\text{C}$

Průtokový součinitel $\rightarrow$ bez clony - $\mu_v = 0.64$

$\rightarrow$ s clonou - $\mu_{v,cl} = 0.301$

Za předpokladu, že rozdíl hustot je dán rozdílnými teplotami. Za normálního stavu

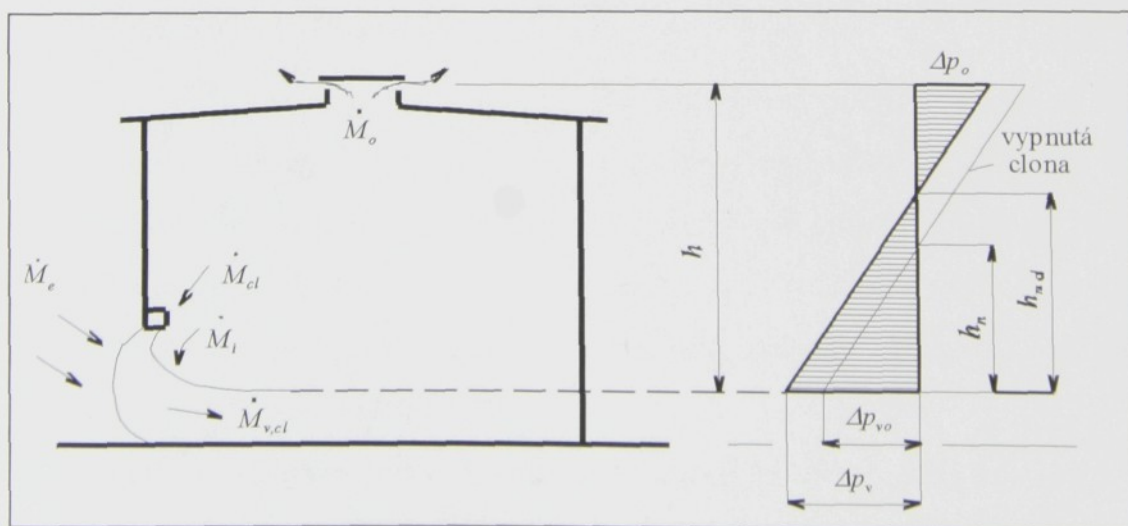
$$p = p_B \text{ určíme hustotu ze stavové rovnice } \rho = \frac{p}{r T} = \frac{10^5}{287.2 T} \Rightarrow \rho_e = 1.365 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_i = 1.196 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_s = 1.204 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_o = 1.188 \text{ kg m}^{-3}$$

Obr. 2.2 - Průtoky a tlakové poměry v objektu se vzduchovou clonou



Průtok vraty - $\dot{M}_{v,cl} = \mu_{v,cl} A_v \sqrt{2 \rho_s \Delta p_v}$, kde Δp_v se určí z aerace

$$\Delta p_v = g \Delta \rho h_n = g \Delta \rho h \left(1 + \left(\frac{\mu_{v,cl} A_v}{\mu_v A_o} \right)^2 \frac{\rho_s \rho_e - \rho_s}{\rho_o \rho_e - \rho_o} \right)^{-1} = \underline{9.31 \text{ Pa}}$$

$$\dot{M}_{v,cl} = \underline{12.82 \text{ kg s}^{-1}}$$

Průtok vraty bez clony $\dot{M}_v = \dot{M}_{v,cl} \frac{\mu_v}{\mu_{v,cl}} \sqrt{\frac{h_{n0}}{h_n}}$, kde h_{n0} výšku neutrální roviny určíme

z aerace - stejně jako h_n . $h_{n0} = \underline{1.83 \text{ m}}$

$$\dot{M}_v = \underline{15.18 \text{ kg s}^{-1}}$$

Průtok clonou $\dot{M}_{cl} = m \dot{M}_{v,cl} = \underline{8.98 \text{ kg s}^{-1}}$

Z množství proteklého vraty podle výše uvedeného vztahu vypočteme teplotu na cloně

$$t_{cl} = \beta t_s - \frac{t_e - t_i}{2} (\beta - 1) = \underline{53.8^\circ\text{C}}$$

Tepelný výkon clony $Q_{cl} = \dot{M}_{cl} c_p (t_{cl} - t_s) = \underline{307.2 \text{ kW}}$

Tepelný výkon bez clony $Q = \dot{M}_{v,cl} \frac{\mu_v}{\mu_{v,cl}} \sqrt{\frac{h_{n0}}{h_n}} c_p (t_i - t_e) = \underline{551 \text{ kW}}$

Energetická úspora v důsledku užití clony činí 44.2%. !!!

3. ZATOPENÉ PROUDY

3.1. Základní rozdělení

Proudem tekutiny se nazývá proud kapaliny či plynu s konečnými příčnými rozměry. Rozlišujeme proudy volné, stísněné, izotermní, neizotermní, laminární, turbulentní.

Volným proudem se rozumí proud, který není tísněn žádnými hranicemi.

Izotermní proud má v celém svém objemu pouze jednu teplotu. Tedy v případech, kdy se proud neúčastní přenosu tepla prouděním s okolním prostředím. To znamená, že teplota na okraji proudu je stejná jako teplota okolí. V okamžiku kdy dochází k ohřívání či ochlazování proudu stává se proud neizotermním.

Laminární nebo turbulentní proud je charakterizován odpovídajícím režimem proudění (laminárním, turbulentním). O tom, zda je proud laminární, či turbulentní rozhoduje Reynoldsovo číslo Re proudu na výstupu z trysky $Re = \frac{w_0 \cdot d_{ch}}{\nu}$. Ve větrání se v převážné míře využívá proudů turbulentních.

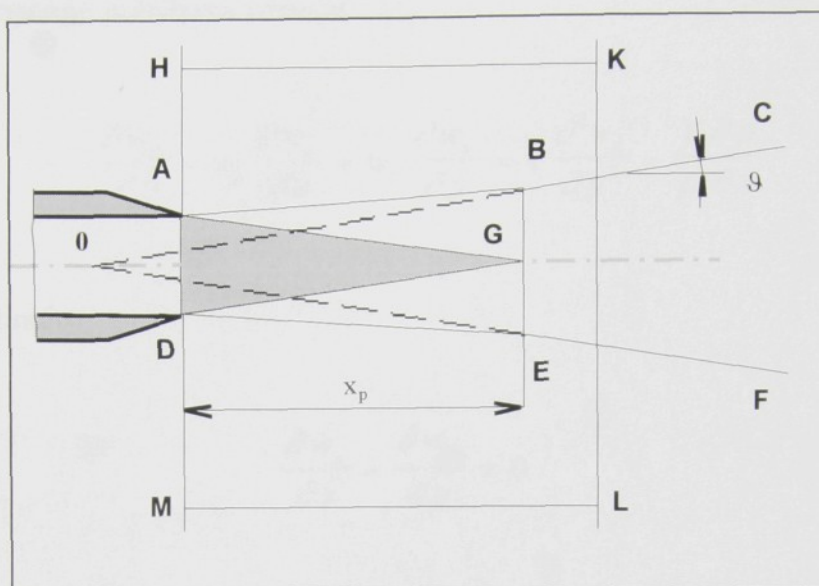
Další rozdělení proudu je závislé na tvaru výstupních výustek vzduchovodů. Nejčastěji rozlišujeme dva základní druhy proudů. Proud kruhového průřezu a proud plochý.

3.2. Volný turbulentní proud

Turbulentní proudy jsou charakteristické intenzivním příčným přesunem shluků částic. Následkem toho v okrajových vrstvách proudu dochází k strhávání částic okolního klidného vzduchu, který se nachází v těsné blízkosti proudu. To má za následek vznik směšovací vrstvy, která se ve směru proudu postupně zvětšuje. Tímto způsobem se ve směru proudění zvětšuje také velikost samotného proudu - roste objem proudu a snižuje se jeho rychlost (viz. Obr. 3.1).

Vzduch vytékající z trysky získává tvar ohraničený křivočarými hranicemi ABC a DEF, které můžeme přibližně nahradit přímkami AB; BC a DE; EF. Proud je dělen na dvě části; počáteční ABED a hlavní CBEF oblast. Průřez BE nazýváme přechodovým průřezem.

Obr. 3.1 - Shéma volného turbulentního proudu



Počáteční část proudu dělíme na jádro proudu s konstantním rychlostním polem s rychlostí rovnou rychlosti proudu ve výustce AGD a směšovací vrstvu ABG a DGE. Délka počáteční části proudu je rovna délce jádra proudu.

V hlavní části proudu je již pole rychlostí nerovnoměrné. Hranice hlavní oblasti BC a EF se při prodloužení protnou v bodě O, který se nachází na ose proudu. Bod O nazýváme pólem proudu. Vzniklý úhel se nazývá úhlem rozšíření hlavního proudu a podle Abramoviče je nezávislý na poměrech výustky proudu.

Měření tlaku v ukázalo, že statický tlak v proudu tekutiny je stejný jako statický tlak okolního vzduchu. V oblasti HKLM (viz. Obr. 3.1) lze tedy zanedbat malé rychlosti existující v okolním vzduchu. Tlak v proudu tekutiny je tedy konstantní, což vede k závěru, že konstantním zůstává i průtočné množství.

3.2.1. Prandtlovy teorie volné turbulence

Prandtlovy teorie jsou jedny z nejrozšířenějších teorií volné turbulence pro volné proudy tekutin. Mnoho dalších hypotéz volné turbulence na tyto teorie navazují. Liší se od nich pozměněnými předpoklady zákonitostí šíření turbulentních proudů.

3.2.1.1. Původní Prandtlova teorie

Případ dvourozměrného proudění nestlačitelné tekutiny v mezní vrstvě podél podélné osy popisuje pohybová rovnice

$$\frac{\partial w_x}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.1)$$

a rovnice kontinuity

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

Rychlosti i tlak se skládají ze složky střední rychlosti v čase a flukтуаční složky rychlosti $w_x = \bar{w}_x + w_x'$, $w_y = \bar{w}_y + w_y'$ a $p = \bar{p} + p'$. Časově středované hodnoty flukтуаčních složek jsou rovny nule $\overline{w_x'} = \overline{w_y'} = \overline{p'} = 0$.

Charakteristickou vlastností volných turbulentních proudů je nepřítomnost pevných hranic proudu a tedy i laminární podvrstvy. To umožňuje ve všech případech volné turbulence zanedbat vliv vazkosti vlivem existence pevných hranic a vysvětluje to i automodelnost proudových toků. Nezávislost rozšiřování toku pro široký rozsah Re .

Jak bylo uvedeno v kap. 3.2. volné proudy vytékající do klidného prostoru či nerušeného proudu jsou charakterizovány malými gradienty tlaku a v mnoha případech je lze zanedbat.

Pohybovou rovnici pro dvourozměrný stacionární případ proudění nestlačitelné tekutiny lze přepsat na tvar

$$\frac{\partial \bar{w}_x^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}_x \bar{w}_y}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w_x'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w_x' w_y'}}{\partial y} = 0 \quad (3.3)$$

Po příslušných úpravách rovnice kontinuity (3.2) a jejím dosazením do vztahu (3.3)

a vypuštěním členu $\frac{\partial \overline{w_x'^2}}{\partial x}$, který nabývá zanedbatelných hodnot lze psát :

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w_x' w_y'}}{\partial y} = 0 \quad (3.4)$$

Střední hodnoty v čase již nadále budou označovány symboly w_x a w_y .

Pohybová rovnice pro dvourozměrný stacionární nestlačitelný izobarický proud má tvar

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3.5)$$

V případě čistě vizkozního laminárního toku je výsledkem porovnáním vztahů (3.1)

a (3.5) při $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ známý vztah pro tečné napětí $\tau = \mu \frac{\partial w_x}{\partial y}$. Porovnáním (3.5)

a (3.4) pro čistě turbulentní proudění, získáme základní závislost Prandtlovy teorie pro turbulentní tření (Reynoldsovo napětí)

$$\tau = -\rho \overline{w_x' w_y'} \quad (3.6)$$

Součin $\rho w_y'$ ve vztahu (3.6) popisuje přenos sekundární hmoty tekutiny napříč proudem jednotkovou plochou sousedících vrstev. Vztah (3.6) vypovídá o tom, že Reynoldsovo napětí se projevuje příčným přenosem částic podélného toku tekutiny. Následkem příčného přenosu částic dochází k rozšiřování turbulentního proudu. Za předpokladu, že směšovací délka v příčném směru turbulentního proudu je l dochází ke změně středních rychlostí částic proudu

$$\Delta w_x = l \cdot \frac{\partial w_x}{\partial y} \quad (3.7)$$

Ztráta částice je nutně doprovázena skokovou změnou rychlosti na velikost $w_x' = \Delta w_x$.

Zpravidla se uvažuje, že hodnoty příčných flukтуаčních rychlostí w_y' jsou úměrné flukтуаční složce podélné rychlosti, ale mají opačný smysl

$$-w'_y \sim w'_x \Rightarrow -w'_y \sim l \frac{\partial \bar{w}_x}{\partial y} \quad (3.8)$$

Při nepřítomnosti pevných hranic proudu Prandtl předpokládal konstantní směšovací délku v příčném průřezu proudu $\Rightarrow l(y) = \text{kons.}$ Z mnoha experimentů je sestaven zákon o změně směšovací délky podél hlavní osy proudu v bezrozměrném tvaru :

$$\frac{w_x}{w_{x,c}} = f\left(\frac{y}{b}\right) \quad (3.9)$$

v kterém jsou profily univerzální pro různé druhy proudů. Podle Prandtla zákon zvětšování tloušťky mezní vrstvy podél hlavní osy je podmíněn existencí flukтуаčních složek rychlostí. V důsledku podobnosti rychlostních profilů v různých průřezích a s využitím uvedených úvah získáme zákon rozšiřování tloušťky zatopeného proudu a směšovací délky ve směru toku proudu :

$$\frac{db}{dx} = \text{kons.} \quad (3.10a)$$

$$b = x \cdot \text{kons.} \quad (3.10b)$$

$$l = c \cdot x \quad (3.10c)$$

Z této teorie rozšíření proudu plyne, že flukтуаční složky si jsou úměrné $w'_x \sim \mp w'_y$.

Pro Reynoldsovo napětí pak platí

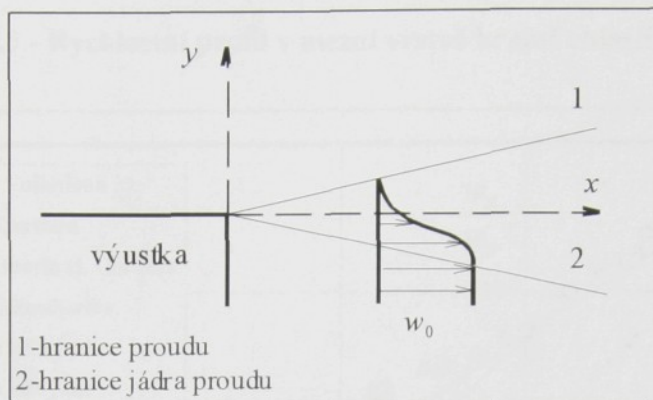
$$\tau = \pm \rho c^2 x^2 \frac{\partial w_x}{\partial y} \left| \frac{\partial w_x}{\partial y} \right| \quad (3.11)$$

Dosazením (3.11) do (3.5) získáme vztah původní Prandtlovy teorie pro řešení rozložení rychlostí mezní vrstvy v krajní oblasti plochého proudu.

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \pm \rho c^2 x^2 \frac{\partial w_x}{\partial y} \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \quad (3.12)$$

Řešením se zabýval například W. Tollmien s umístěním souřadného systému viz Obr. 3.2.

Obr. 3.2 - Souřadný systém W. Tollmiena



Řešené vztahy :

$$w_x = w_0 F'$$

$$w_y = a w_0 (\varphi F' - F)$$

$$\tau = \rho \frac{w_0}{2} a F''^2$$

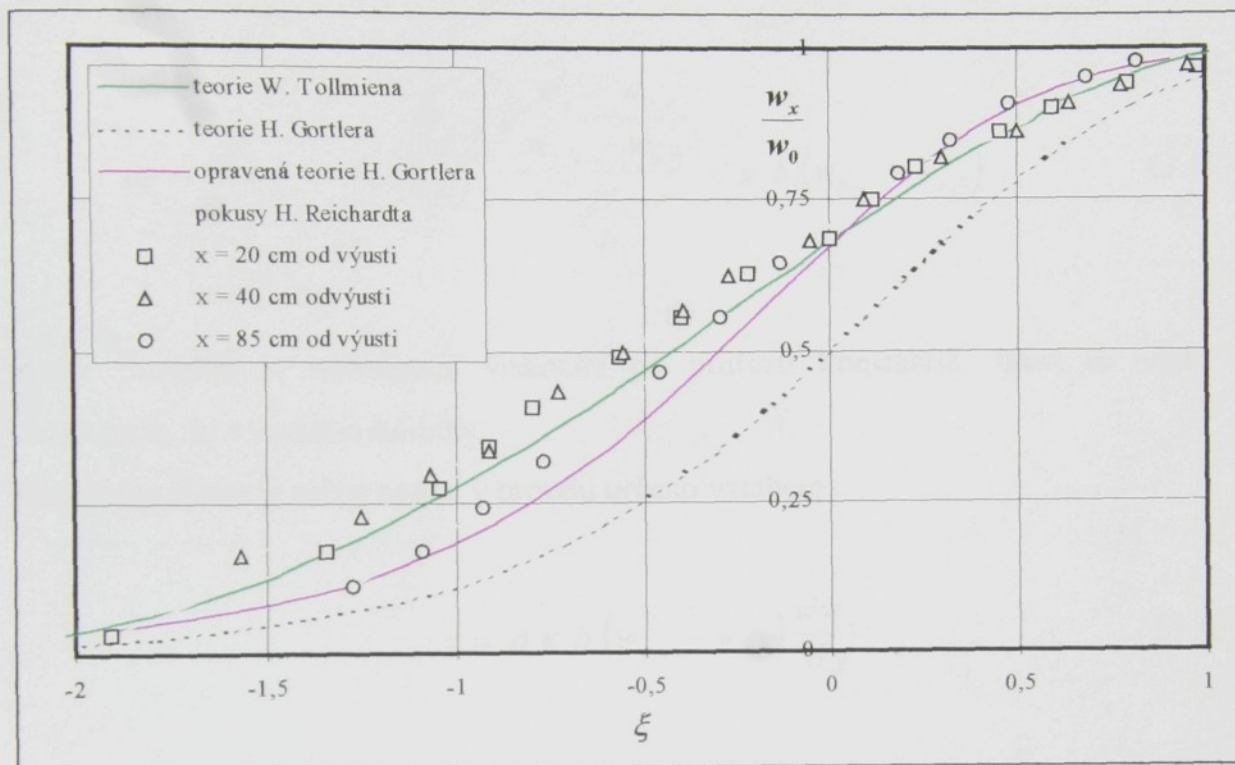
kde $\varphi = \frac{y}{a x}$

Tab. 3.1 - Hodnoty funkcí mezní vrstvy W. Tollmiena pro krajní oblast proudu

φ	$F(\varphi)$	$F'(\varphi)$	$F''(\varphi)$
0.98	0.981	1	0
0.68	0.684	0.961	0.249
0.38	0.410	0.859	0.413
0.08	0.172	0.720	0.499
-0.22	-0.021	0.566	0.520
-0.52	-0.167	0.413	0.491
-0.82	-0.270	0.275	0.424
-1.12	-0.335	0.161	0.333
-1.62	-0.381	0.039	0.151
-2.04	-0.389	0	0

Porovnání výsledků s experimentem H. Reichardta viz. Obr 3.3 , kde součinitel vířivosti proudu a charakterizující turbulentní charakter proudění nabývá hodnoty $a = 0.09$.

Obr. 3.3 - Rychlostní profil v mezní vrstvě krajní oblasti proudu



3.2.1.2. Nová Prandtlůva teorie

V nové teorii Prandtl vyšel ze vztahu T. Bussinesqa v analogii s Newtonovým zákonem o tření v laminárním proudu

$$\tau = \rho \mu_T \frac{\partial w_x}{\partial y} \quad (3.13)$$

Porovnáním s původní teorií vyjádřil turbulentní viskozitu μ_T jako

$$\mu_T = l^2 \frac{\partial w_x}{\partial y} \quad (3.14)$$

kde příčná směřovací délka l je konstantní a turbulentní viskozita μ_T se po průřezu mění až k nule na hranicích směřovací oblasti.

V nové teorii se uvažuje konstantní po průřezu turbulentní viskozita μ_T a ne bezrozměrná směřovací délka. Bezrozměrné rychlostní profily v různých průřezích proudu v dané vzdálenosti od výustky jsou stejné. Pak vzhledem k (3.14)

$$\mu_T = b(w_{x,c} - w_{x,h}) \left(\frac{l}{b}\right)^2 \frac{\partial \frac{w_x - w_{x,h}}{w_{x,c} - w_{x,h}}}{\partial \frac{y}{b}} = \kappa b (w_{x,c} - w_{x,h}) \quad (3.15)$$

Podle Prandtla je turbulentní viskozita po průřezu konstantní, mění se však se vzdáleností od výtokové štěrby.

Podle této teorie je tečné napětí v proudu určeno vztahem :

$$\tau = \rho \kappa b (w_{x,c} - w_{x,h}) \frac{\partial w_x}{\partial y} \quad (3.16)$$

Řešením rovnice (3.5) po dosazení vztahu (3.16) dospěl H. Görtler se stejným souřadným systémem jako W. Tollmien viz. Obr. 3.2, kde $\xi = \sigma \frac{y}{x}$, k výsledkům pro složky rychlostí uvedeným v Tab. 3.2.

Pro přiblížení k experimentálním hodnotám - experimentální konstanta $\sigma = 13.5$ byla ale nutná korekce posunutí profilu o $\varphi_0 = 0.3$. H. Görtler potřeboval pro lepší přiblížení dvě experimentální konstanty. Porovnání výsledků s teorií W. Tollmiena a s experimentem H. Reichardta viz. předchozí Obr. 3.3.

Tab. 3.2 - Bezrozměrné poměry H. Görtlera pro krajní oblast proudu

ξ	$\frac{w_x}{w_0}$	$\sigma \frac{w_y}{w_0}$
∞	1	4.37
1.6	0.998	4.36
1.0	0.953	3.64
0.6	0.832	2.38
0.2	0.619	1.26
-0.2	0.388	1.24
-0.8	0.155	2.72
-1.6	0.039	4.55
$-\infty$	0	5.51

W. Tollmien podle původní Prandtlovy teorie a H. Görtler podle nové Prandtlovy teorie řešily rychlostní profily i v hlavní oblasti proudu. Výsledky W. Tollmiena jsou uvedeny v Tab. 3.3 a výsledky H. Görtlera v Tab. 3.4.

Tab. 3.3 - Výsledky W. Tollmiena pro hlavní oblast proudu

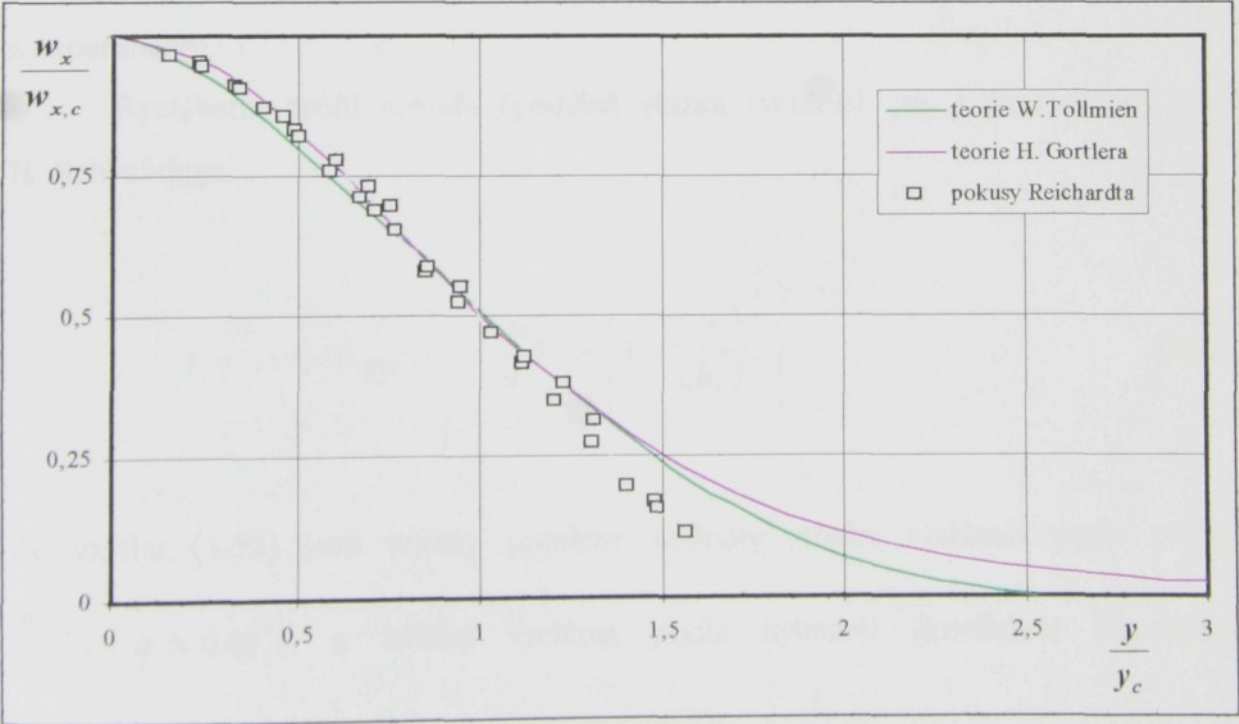
φ	$\frac{w_x}{w_{x,c}}$	$\frac{1}{a} \frac{w_y}{w_{x,c}}$
0	1	0
0.5	0.782	0.166
1	0.474	0.091
1.5	0.200	-0.160
2	0.046	-0.402
2.4	0	-0.498

Tab. 3.4 - Výsledky H. Görtlera pro hlavní oblast proudu

ξ	$\frac{w_x}{w_{x,c}}$	$\sigma \frac{w_y}{w_{x,c}}$
0	1	0
0.5	0.786	0.162
1	0.420	0.039
1.5	0.181	-0.181
2	0.071	-0.341
3.5	0.004	-0.486
∞	0	-0.5

Porovnání teoretických výsledků s experimentem H. Reichardta, z kterých získal H.Görtler experimentální konstantu $\sigma=7.76$ viz. Obr. 3.4.

Obr. 3.4 - Rychlostní profil v hlavní oblasti proudu



3.2.2. Plochý izotermní proud

V oboru větrání a klimatizace se v současnosti vychází hlavně z poloempirických řešení proudů. Vychází se zde z podobnosti proudění z výustek a z bodového zdroje ve vzdálenosti $x > x_k$. Tedy podobnosti proudění v hlavní oblasti proudu. Zde se uplatní zákon Prandtlovy teorie o změně příčné směřovací délky (3.9) - kap.3.2.1.1.

$$\frac{w_x}{w_{x,c}} = f\left(\frac{y}{b_{0.5}}\right) \quad (3.50)$$

Změnu šířky proudu charakterizuje existující příčná rychlost w_y , která určuje přírůstek průtoku proudem

$$w_y = \frac{d\dot{V}}{dA_x} \quad (3.51)$$

Podle G.N. Abramoviče je úhel rozšiřování proudu nezávislý na poměrech výustky $\Rightarrow \vartheta \doteq 12.5^\circ$. Z toho plyne i šířka plochého proudu ve vzdálenosti x od pólu proudu $\Rightarrow Y_x = x \tan \vartheta = 0.22 \cdot x$. Vzdálenost x_0 pólu proudu od výustky se určí z experimentu.

Rychlostní profil proudu (podélná složka rychlosti w_x) jsou určeny podle H. Schlichtinga

$$\frac{w_x}{w_{x,c}} = \left[1 - \left(\frac{y}{b_x} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2 \quad (3.52)$$

Ze vztahu (3.52) jsou určeny poměrné hodnoty střední rychlosti podle průřezu

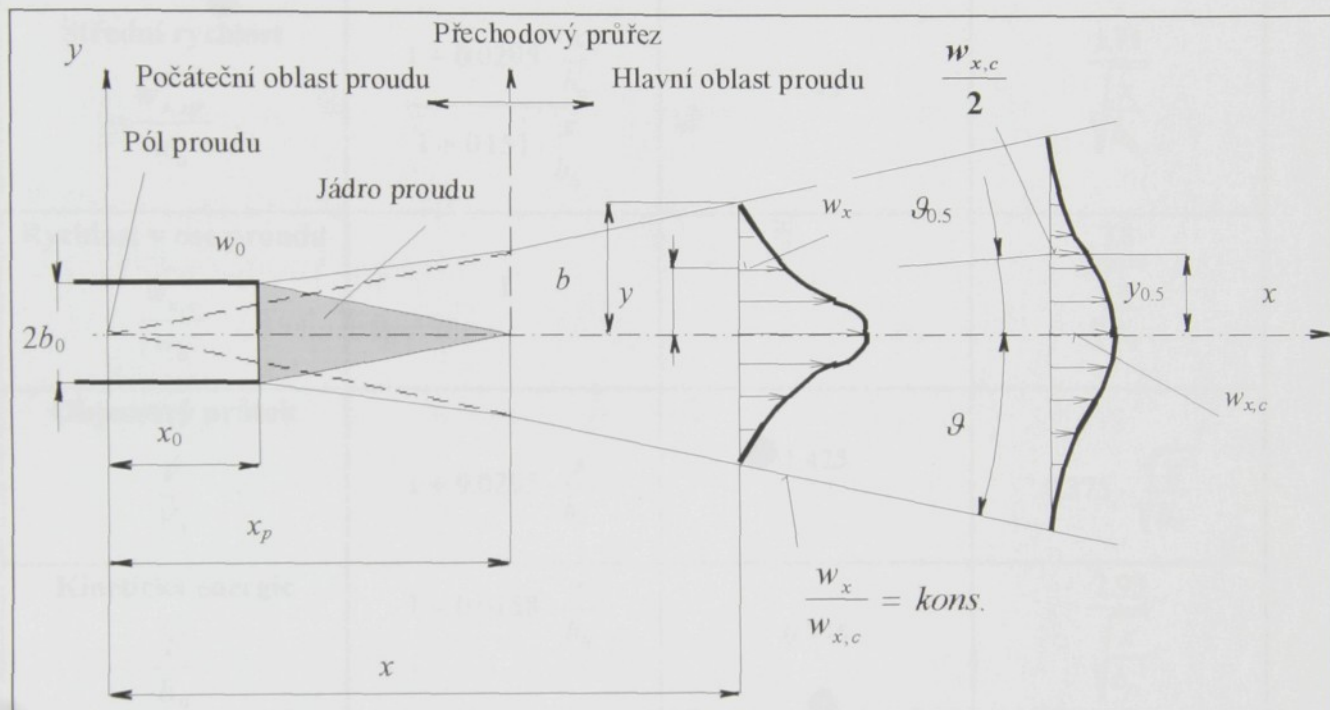
$$\frac{w_{x,A}}{w_{x,c}} = q = 0.45 \quad \text{a střední rychlost podle hybnosti (koeficient Bussinesqa)}$$

$$\frac{w_{x,H}}{w_{x,A}} = \beta = 1.56, \text{ které výrazně zjednoduší vztahy pro plochý volný proud.}$$

Stejným způsobem jako v hlavní oblasti proudu je vyjádřena i rychlost v mezní vrstvě krajní oblasti proudu

$$\frac{w_x}{w_0} = \left[1 - \left(\frac{y}{b_x - b_j} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2 \quad (3.52)$$

Obr. 3.5 - Schéma plochého volného proudu



3.2.3. Výpočtové vztahy pro volný plochý izotermní proud

Podrobné odvození poměrných vztahů volného proudu je uvedeno v [7]. Geometrické veličiny proudu jsou vztaženy k počátečnímu parametru výustky b_0 . Ostatní fyzikální hodnoty proudu jsou vztaženy na příslušné hodnoty veličin na počátku proudu. Vztahy jsou uvedeny v Tab. 3.5.

Tab. 3.5 - Vztahy pro plochý volný proud

Poměrná veličina	Vzorec poměrné veličiny		
	počáteční oblast	přechodový průřez	hlavní oblast
Vzdálenost od otvoru $\frac{x}{b_0}$	≤ 14.4	14.4	>14.4
Šířka poloviny proudu $\frac{b}{b_0}$	$1 + 0.151 \cdot \frac{x}{b_0}$	3.16	$0.22 \cdot \frac{x}{b_0}$
Střední rychlost $\frac{w_{x, stř}}{w_0}$	$\frac{1 + 0.0295 \cdot \frac{x}{b_0}}{1 + 0.151 \cdot \frac{x}{b_0}}$	0.45	$\frac{1.71}{\sqrt{\frac{x}{b_0}}}$
Rychlost v ose proudu $\frac{w_{x, c}}{w_0}$	1	1	$\frac{3.8}{\sqrt{\frac{x}{b_0}}}$
Objemový průtok $\frac{\dot{V}}{\dot{V}_0}$	$1 + 0.0295 \cdot \frac{x}{b_0}$	1.425	$0.375 \cdot \sqrt{\frac{x}{b_0}}$
Kinetická energie $\frac{E}{E_0}$	$1 - 0.0158 \cdot \frac{x}{b_0}$	0.775	$\frac{2.93}{\sqrt{\frac{x}{b_0}}}$
Tangenta úhlu ϑ	$\tan \vartheta_K = 0.151$	—	$\tan \vartheta = 0.22$

3.3. Interakce s unášivými proudy

Jsou velmi časté případy, kdy proud vzduchu vstupuje pod úhlem do unášivého pole vnějšího prostředí. Účinkem vnějšího proudového pole dochází k zakřivení osy vystupujícího proudu vzduchu. Čím je rychlost vnějšího pole vyšší, tím větší je zakřivení osy proudu a je kratší krajní oblast proudu.

Tvar osy proudu vzduchu, který vytéká do bočního vnějšího proudu může být popsán experimentálním vztahem G. S. Šandora

$$\frac{x}{d_{ch}} = \frac{P_{d\ 0u}}{P_{d\ 0w}} \left(\frac{y}{d_{ch}} \right)^{2.55} + \frac{y}{d_{ch}} \left(1 + \frac{P_{d\ 0u}}{P_{d\ 0w}} \right) \cot \alpha \quad (3.17)$$

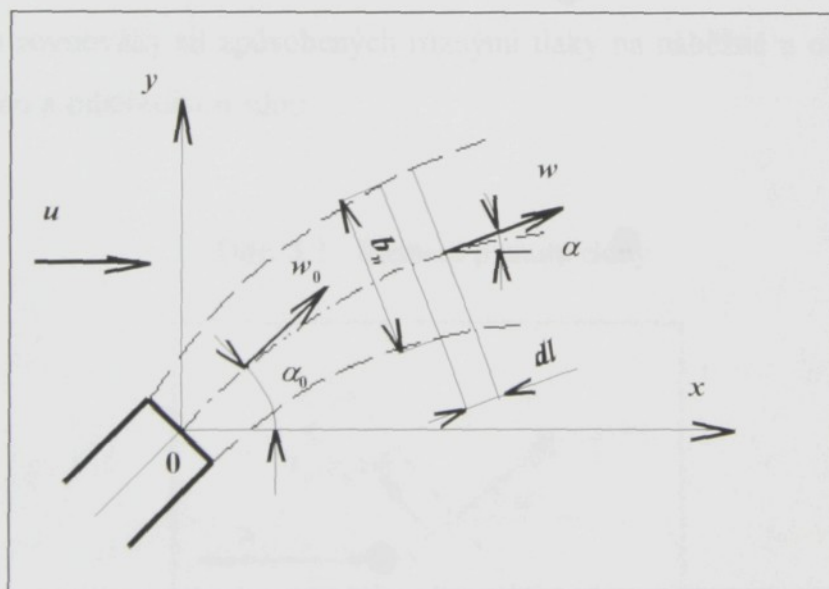
kde $P_{d\ 0u} = \rho_u \frac{u^2}{2}$, $P_{d\ 0w} = \rho_w \frac{w_0^2}{2}$ jsou dynamické tlaky vnějšího proudového pole a proudu vzduchu. Pokusy byly provedeny za podmínek :

$$\frac{P_{d\ 0w}}{P_{d\ 0u}} \in (2, 22) , \quad \alpha \in (45^\circ, 90^\circ)$$

Pokusy s rozdílnými teplotami $\frac{T_{0u}}{T_{0w}} \in (1, 3)$ ukázali, že parametr $\frac{P_{d\ 0w}}{P_{d\ 0u}}$ má vliv na

zakřivení nejen působením rychlostí, ale i rozdílných teplot proudů. Vztah (3.17) se tedy hodí i pro neizotermní proudy.

Obr. 3.6 - Schéma proudu ve vnějším unášivém poli pro teoretické odvození



Tvar osy proudu vzduchu, který vytéká do bočního vnějšího proudu sestavil na základě experimentu i J. V. Ivanov

$$\frac{x}{d_{ch}} = \left(\frac{P_{d\ 0u}}{P_{d\ 0w}} \right)^{1.3} \left(\frac{y}{d_{ch}} \right)^3 + \frac{y}{d_{ch}} \cot \alpha \quad (3.18)$$

sestaveným za podmínek : $\alpha \in \langle 60^\circ, 120^\circ \rangle$

$$\frac{P_{d\ 0w}}{P_{d\ 0u}} \in (12, 100)$$

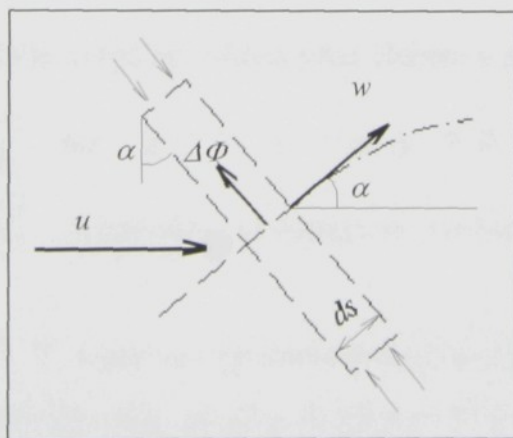
Pokusy prováděl nejdříve s proudem kruhového průřezu a pak i s proudem pravoúhlého průřezu (s poměrem stran 1:5 a 5:1). Dospěl k závěru, že pro první přiblížení lze použít obou výrazů (3.17) i (3.18). Za charakteristický rozměr d_{ch} je třeba dosadit :

$$d_{ch} = \frac{4A}{O}.$$

Teoretická řešení problému byla prováděna několika způsoby. Podstatou prvního (V. V. Baturin) bylo geometrické skládání rychlosti na ose proudu z vektoru rychlosti vnějšího pole s vektorem střední rychlosti proudu vztažené na plochu proudu v každém jejím průřezu. Dalším řešením (G. N. Abramovič) bylo skládání vektoru vnějšího pole s vektorem střední rychlosti proudu vztažené na průtok v daném průřezu. Další metodou (I. A. Šepelev) je skládání proudových funkcí. Všechna řešení se však dala použít pouze pro ideální tekutiny. Pro reálné tekutiny jsou to řešení pouze hrubě přibližná.

Dobré schéma řešení vytvořil M. S. Volinský. Závislost křivky osy spočívá v podmínkách rovnováhy sil způsobených různými tlaky na náběžné a odvrácené straně povrchu proudu a odstředivou silou.

Obr. 3.7 - Element proudu clony



$$dN = -d\Phi \quad (3.19)$$

Dále jsou známy vztahy poloměru křivky a úhlu náklonu proudu $\tan \alpha = y'$

$$r = \frac{(1 + y'^2)^{1.5}}{y''} \quad \sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{y'}{(1 + y'^2)^{0.5}} \quad (3.20)$$

Další řešení úlohy M. S. Volinského spočívá v předpokladu konstantních hodnot hustoty, střední rychlosti a plochy průřezu v proudu $\Rightarrow \rho_w = \text{kons.}, w = \text{kons.}, A_n = \text{kons.}$

Mnohem lepší představou pro řešení úlohy je však předpoklad, že v proudu tekutiny zůstává konstantní složka absolutního tlaku kolmá ke směru nerozrušeného proudu, než představa, že v proudu plynu unášeného vnějším bočním polem zůstávají konstantní hodnoty rychlosti, plochy proudu a hustoty při $\rho_w \neq \rho_u$.

S využitím rovnic (3.19), (3.20) a uvedených předpokladů spolu s okrajovými podmínkami $\Rightarrow y = 0, x = 0, \left(\frac{dy}{dx}\right)_0 = \tan \alpha_0$, a za předpokladu o vnějším unášivém poli $\Rightarrow \rho_u = \text{kons.}, u = \text{kons.}$, dostaneme rovnici osy plochého proudu

$$y = \frac{2}{k} \left(\pm \sqrt{k \cdot x + \cot^2 \alpha_0} - \cot \alpha_0 \right) \quad (3.21)$$

kde

$$k = \frac{c_n \cdot \rho_u \cdot u^2}{b_0 \cdot \rho_{w0} \cdot w_0^2 \sin^2 \alpha_0} \quad (3.22)$$

Oba kořeny rovnice (3.21) jsou reálné. Minus před členem v závorce je reálným řešením pro případ $\Rightarrow \alpha_0 > \frac{\pi}{2}$ při $x = 0, y_1 = 0, y_2 > 0$. Koeficient c_n je určen experimentálními výsledky odvozením ze sestavené rovnice teoretické křivky osy proudu (3.21).

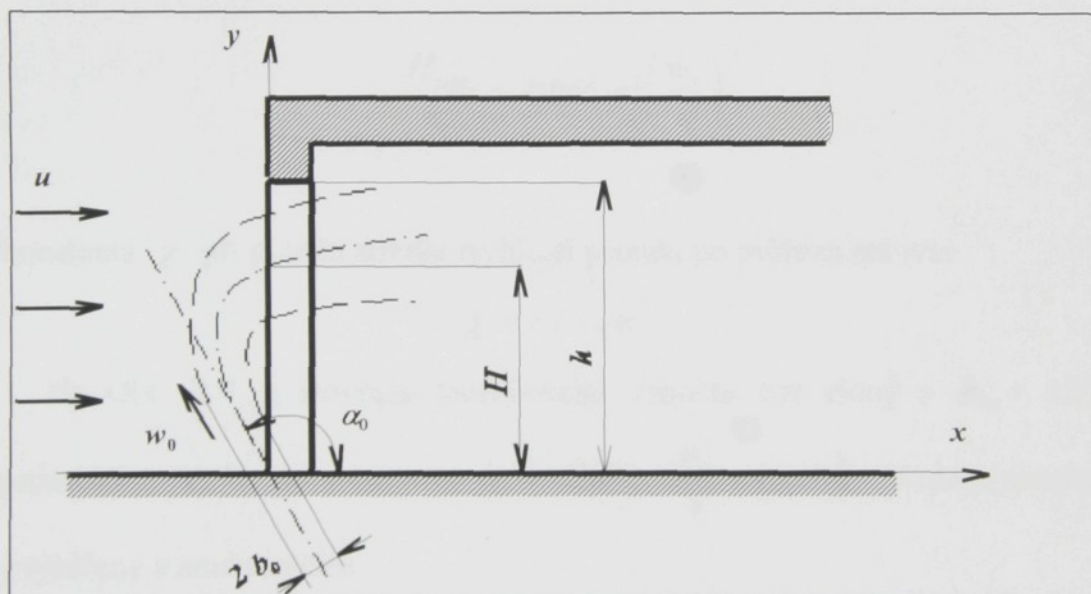
Výsledky pokusu J. V. Ivanova s plochým proudem při poměru stran $b_0 : h = 1:5$ jsou blízké teoretické závislosti tvaru osy proudu při $c_n = 1 \div 3$.

3.4. Proud vzduchové clony

Clona řešena podle schématu viz. Obr. 3.8. Dosazení konstanty k (3.22) za předpokladu stejných hustot vnějšího unášivého pole a proudu vzduchu $\Rightarrow \rho_u = \rho_{w0}$ do teoretického vztahu (3.21) a vyjádřením řešení pro bod $x = 0$ (rovina vrat) získáme dvě řešení

$$y_{10} = 0, \quad y_{20} = -\frac{4 \cdot b_0 \cdot \cos \alpha_0}{c_n} \left(\frac{w_0}{u} \right)^2 \quad (3.23)$$

Obr. 3.8 - Schéma pro teoretický výpočet vzduchové clony



Obě tato řešení vyjadřují průsečíky osy proudu s rovinou vrat. Kdy y_{20} je dosahem proudu clony $\Rightarrow y_{20} = H$. Závislost (3.23) je však silně diskutabilní, protože s narůstajícím úhlem $\alpha \nearrow \pi$, stoupá dosah clony až do svého maxima.

Proto je proud vzduchové clony řešen za předpokladu konstantní velikosti vertikální složky rychlosti proudu clony závislé pouze na počátečním úhlu clony α_0 . Horizontální složka proudu se algebraicky skládá s rychlostí vnějšího unášivého pole. Řešením nastíněného problému je nový bezrozměrný vztah pro zakřivenou osu proudu.

$$\frac{x}{b_0} = \frac{y}{b_0} \cot \alpha_0 + \frac{2}{3\chi} \frac{u}{w_0} \left(\frac{y}{b_0 \sin \alpha_0} \right)^{1.5} \quad (3.24)$$

následně dosah proudu

$$\frac{H}{b_0} = \frac{9\chi^2}{4} \left(\frac{w_0}{u} \right)^2 \cos^2 \alpha_0 \sin \alpha_0 \quad (3.25)$$

Řešením extrému (3.25) dává úhel clony při jejím maximálním dosahu $\Rightarrow \alpha_{max} = 144^\circ 40'$. Zpětným dosazením do (3.25) i maximální dosah při daných parametrech výusti a rychlosti clony při rychlosti unášivého vnějšího pole

$$\frac{H_{max}}{b_0} = 0.865 \chi^2 \left(\frac{w_0}{u} \right)^2 \quad (3.26)$$

kde konstanta χ při použití střední rychlosti proudu po průřezu má tvar

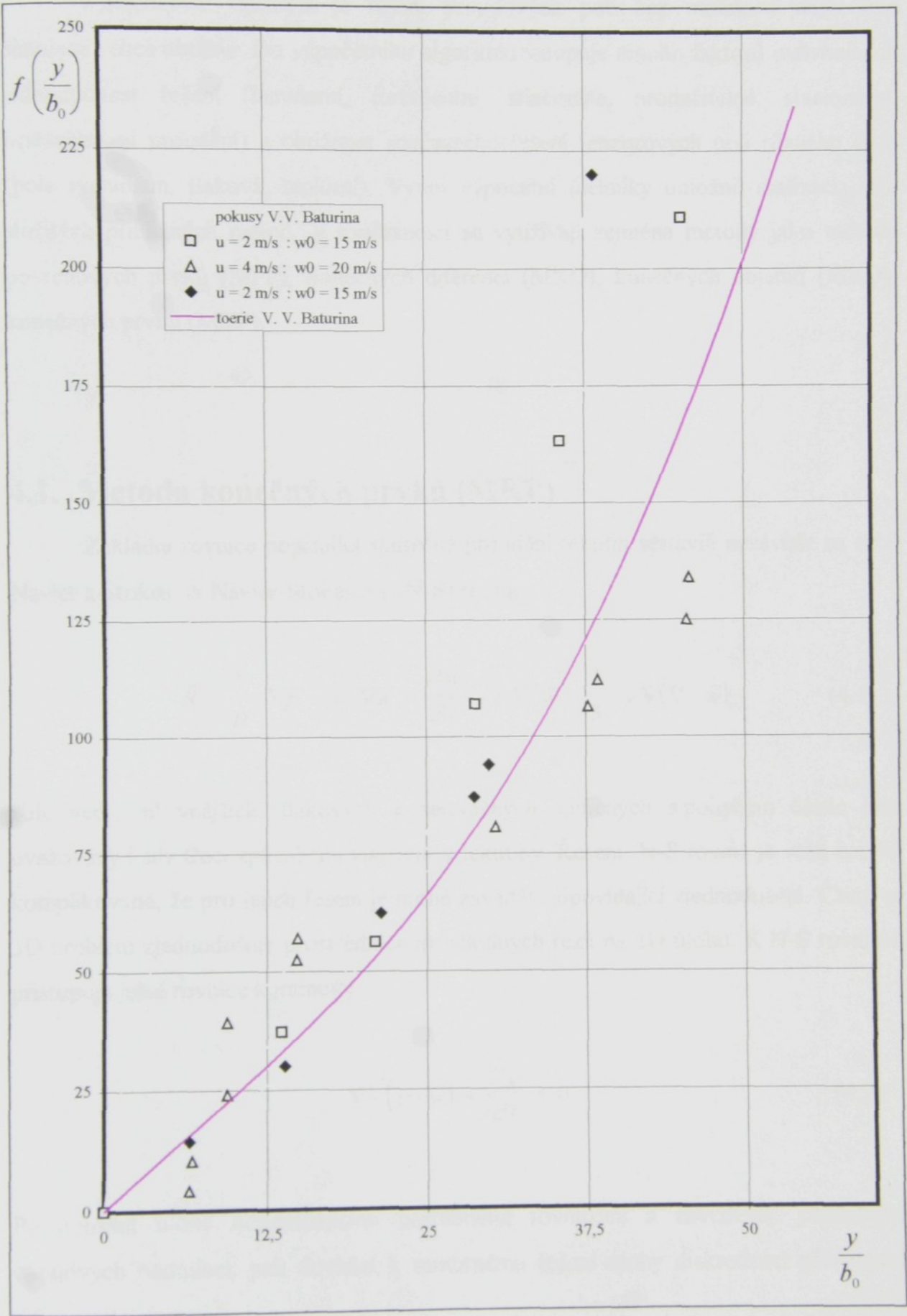
$$\chi = 1.7 \cdot \sqrt{n_{2u}}$$

Na Obr. 3.9 je srovnání teoretického výpočtu osy clony s $b_0 = 12.5$ mm s experimentem V. V. Baturina pro $\alpha_0 = 120^\circ$, $\frac{w_0}{u} \in (5, 10)$. Experimentální body jsou vyjádřeny v souřadnicích

$$\frac{y}{b_0}, \quad f\left(\frac{y}{b_0}\right) = \left(\frac{x}{b_0} - \frac{y}{b_0} \cot \alpha_0 \right) \frac{w_0}{u}$$

Při výpočtu byl zohledněn turbulentní charakter vytékajícího proudu $n_{2u} = 0.78$.

Obr. 3.9 - Srovnání teorie s pokusy V. V. Baturina



4. NUMERICKÁ SIMULACE

V mechanice kontinua je řešení proudových polí bez možnosti numerické simulace velice obtížné. Do výpočetního algoritmu vstupuje mnoho faktorů ovlivňujících jednoduchost řešení (laminární, turbulentní, stlačitelné, nestlačitelné, stacionární, nestacionární proudění) a obtížnost současného řešení tenzorových polí různého řádu (pole rychlostní, tlaková, teplotní). Vývoj výpočetní techniky umožnil realizaci jinak složitých přibližných metod. V současnosti se využívají zejména metody jako metoda povrchových prvků (MPP), konečných diferencí (MKD), konečných objemů (MKO), konečných prvků (MKP).

4.1. Metoda konečných prvků (MKP)

Základní rovnice popisující skutečné proudění tekutin sestavili nezávisle na sobě Navier a Stokes $\Rightarrow$ Navier-Stokesovy (N-S) rovnice :

$$\vec{R} - \frac{1}{\rho} \cdot \nabla p = \vec{w} \cdot \nabla \vec{w} + \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} - \nu \nabla^2 \vec{w} - \frac{1}{3} \cdot \nu \nabla (\nabla \cdot \vec{w}) \quad (4.1)$$

Kde vedle sil vnějších, tlakových a setrvačných spojených s pohybem částic jsou uvažovány i síly třecí způsobeny viskozitou tekutiny. Řešení N-S rovnic je však natolik komplikované, že pro jejich řešení je nutné zavádět odpovídající zjednodušení. Často se 3D problém zjednodušuje prostřednictvím vhodných řezů na 2D úlohu. K N-S rovnicím přistupuje ještě rovnice kontinuity :

$$\nabla \cdot (\rho \cdot \vec{w}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

Po popsání úlohy odpovídajícími potřebnými rovnicemi a zavedením příslušných okrajových podmínek pak dochází k samotnému řešení úlohy diskretizací příslušných diferenciálních rovnic.

Jsou dvě základní techniky používané pro simulaci úloh proudění. První technika užívá *smíšené metody*, která zahrnuje současné řešení tlaku i rychlosti. Druhou je *penalty metoda*, v které je tlak eliminován lehce stlačitelnou formou nestlačitelnosti proudící tekutiny prostředím užitím *penalty parametru*.

4.2. Algor

Jedním z programů využívajících k řešení problémů MKP je *Algor*. Jde o softwarový produkt, který slouží k řešení úloh proudění vazkých nestlačitelných tekutin. Dále řeší i úlohy z oblastí pružnosti a pevnosti a termokinetiky.

4.2.1. Popis prostředí

Program se skládá z částí : 1. - *PREPROCESING* -*SUPERDRAW*
-*FLUID FLOW DECODER*
2. - *PROCESING*
3. - *POSTPROCESING* -*SUPERVIEW*

PREPROCESING - slouží k tvorbě výpočetního modelu v *SUPERDRAW* a k zadání okrajových podmínek modelu. Ve *FLUID FLOW DECODERU* se zadávají podmínky charakterizující druh proudění, vlastnosti tekutiny a podmínky výpočtu (přesnost, počet iterací, ...) a dochází k dekodování úlohy pro *PROCESING*.

PROCESING - řešitel modelované úlohy

POSTPROCESING - *SUPERVIEW*, umožňuje kontrolu správnosti dekodovaného modelu a analýzu výsledků výpočtu.

4.2.2. Prostředky

V oblasti proudění je *Algor* softwarový produkt řešící nestlačitelné proudění ve 2D i 3D prostoru. Jak bylo uvedeno výše (kap. 4.1.), řešení úloh se provádí prostřednictvím soustavy N-S rovnic (4.1) a rovnice kontinua (4.2) upravených pro nestlačitelné proudění :

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + \vec{w} \cdot \nabla \vec{w} \right) + \nabla p - \mu \cdot \nabla^2 \vec{w} = 0 \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{w} = 0 \quad (4.4)$$

K řešení úloh *Algor* používá zmíněnou *penalty methodu*. Oblast proudění je pokryta sítí konečných prvků užitých k řešení stacionárního problému nestlačitelného vizkozního toku.

Nestlačitelnost proudící tekutiny $\nabla \cdot w = 0$ je eliminováno prostřednictvím *penalty parametru*. K výpočtu se použijí pouze složky rychlosti. Hodnota tlaku je následně vypočtena vztahem:

$$p = -\lambda \nabla \cdot \vec{w} \quad (4.5)$$

Uzly prvků jsou užity pouze k výpočtu rychlosti. Tlak je vypočten vždy v těžištích jednotlivých prvků a poté zpřesněn metodou nejmenších čtverců. Na hranicích elementů jsou hodnoty tlaku tedy nespojité. Podobná technika je použita i k určení vířivosti. Odhad přiměřené sítě je založen na vířivosti. Ta je mírou lokálního gradientu vířivosti prostřednictvím globálního maxima vířivosti.

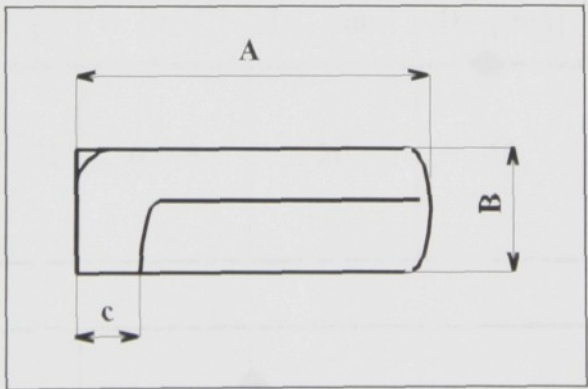
Z toho vyplývá, že zpřesnění metodou nejmenších čtverců je přesné uvnitř prvků sítě, ale dosti neefektivní na hranicích uzlů. Proto je třeba opatrnosti při analýze hodnot tlaku a vířivosti na hranicích a v její těsné blízkosti. Přesto pro nízká Re nabývají výsledky reálných hodnot.

Ze vztahu (4.5) plyne, že hodnota *penalty parametru* λ musí být tak velká, aby stlačitelnost a tlaková chyba byly zanedbatelné, přesto ne zas tak velká, aby vznikla numericky chybná úprava. Hodnota *penalty parametru* by měla být volena v závislosti na vztahu $\lambda = c \mu$. Kde c je konstanta závislá pouze na délce slova ve výpočetní technice a hlavně je nezávislá na parametrech sítě. Numerické studie ukázali, že vhodná volba konstanty c je 10^7 (tato volba se zdá být nezávislá na řešeném problému). Na závěr je nutno zdůraznit, že problémy okolo volby *penalty parametru* λ jsou poměrně zbytečné, protože λ lze měnit i o několik řádů bez významnějšího vlivu na numerické výsledky.

5. VÝSLEDKY NUMERICKÉ SIMULACE

Výsledky numerická simulace byly podmíněny volbou geometrie navrženého prostoru. Byla provedena dvě základní schémata modelového prostoru. V prvním případě byla umožněna infiltrace celou zadní stěnou modelovaného prostoru a v druhém byla umožněna infiltrace celou zadní stěnou a stropním otvorem o velikosti výšky zadní stěny modelovaného prostoru. Vždy šlo o infiltraci bez modelování samovolné či nucené aerace. Numerická simulace se týkala řady vzduchových clon VIENTO A2, B2 a C2, vždy pro nejvyšší výkonový stupeň příslušné clony. Výkonový stupeň je charakterizován rychlostí w_0 v ústí clony - rozměr $c \equiv 2 b_0 \equiv d_{ch}$ (Obr. 5.1 a Tab. 5.1). Rychlost je určena z objemového průtoku příslušnou clonou. Reynoldsovo číslo Re proudu clony $Re = \frac{w_0 \cdot d_{ch} \cdot \rho}{\mu}$ je uvedeno také v Tab. 5.1, kde pro všechny modely je stejná hustota proudícího média $\rho = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$ a dynamická viskozita $\mu = 0.2 \text{ Pa s}$ a *penalty* parametr $\lambda = 1.2 \cdot 10^7$.

Obr. 5.1 - Rozměrové schéma clon VIENTO



Tab. 5.1 - Rozměry clon VIENTO

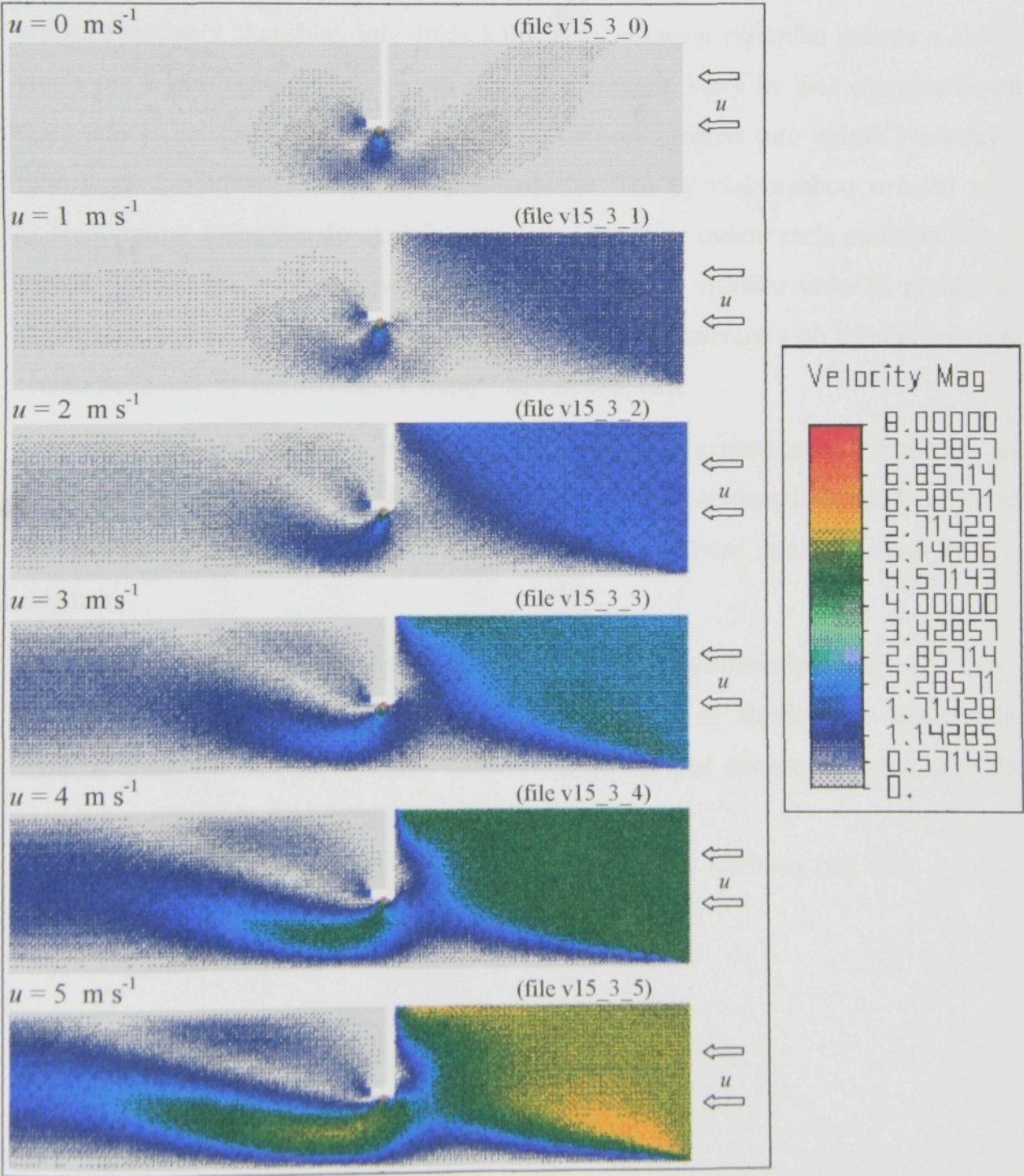
Clona	A [mm]	B [mm]	c [mm]	w_0 [m s ⁻¹]	Re
VIENTO A2	485	285	61	7.3	5.35
VIENTO B2	485	285	77	8	7.39
VIENTO C2	700	415	112	9.7	13.04

5.1.2. Numerické výsledky

Před vyhodnocením je nejdříve nutné upozornit na počátek souřadného systému, který je ve všech modelech shodně umístěn na úrovni podlahy v rovině clony. Viz Obr. 5.2, kladný smysl osy y je proti směru externího proudu.

Jak se vyvíjí proudění v oblasti vrat při zvyšující se externí rychlosti pro parametry clony - výška vrat $h = 3\text{ m}$; úhel clony $\alpha_0 = 15^\circ$ clony VIENTO B2 je na Obr. 5.3.

Obr. 5.3 - Modelová řada clony VIENTO B2 pro $h = 3\text{ m}$ a $\alpha_0 = 15^\circ$



Pro všechny další řady této clony jsou vývoje proudění pro zvyšující se externí rychlost uvedeny v příloze P 1.1 ÷ P 1.9. Při bližším zkoumání výsledkových souborů jednotlivých modelů se pro nízké rychlosti clona ukazuje jako neekonomická. Dochází zde totiž k přísávání vzduchu zadní stěnou modelu, což je poměrně zřetelné na modelu pro externí rychlost $u = 1 \text{ m s}^{-1}$. Je zde také vidět, že se ještě část proudu odděluje a vytváří v prostoru vrat vír a část proudu uniká i ven z haly. S tím dochází i k úniku teplého vzduchu a zbytečným ztrátám. Tento jev je dobře pozorovatelný na vektorovém rychlostním poli Obr. 5.5 pro rychlost $u = 1.5 \text{ m s}^{-1}$.

Za ideálních podmínek by nemělo docházet k úniku teplého vzduchu ven, ale celý proud by se měl účinkem externího proudění ohýbat do vnitřních prostor. Tento stav je nejlépe vystižen v okamžiku, kdy dojde k úplnému zastavení externího proudu v oblasti vrat a tím k jeho úplnému odklonění. Nejlepším znakem, který by jistě charakterizoval tento stav je existence víru v oblasti vrat. Vír by zcela uzavřel tuto oblast. Následkem toho dojde k odklonění vnějšího proudu vzduchu. Ten by však s sebou strhával teplý vzduch vratové clony ven do okolního prostoru. Tím by se ovšem zcela opomíjel účinek teplého proudu který má schopnost jistou část studeného vnějšího vzduchu prohřát na přijatelnou teplotu. Vzduchová clona by tedy byla předimenzována a při jejím provozu za těchto podmínek by nedocházelo k odpovídajícím úsporám.

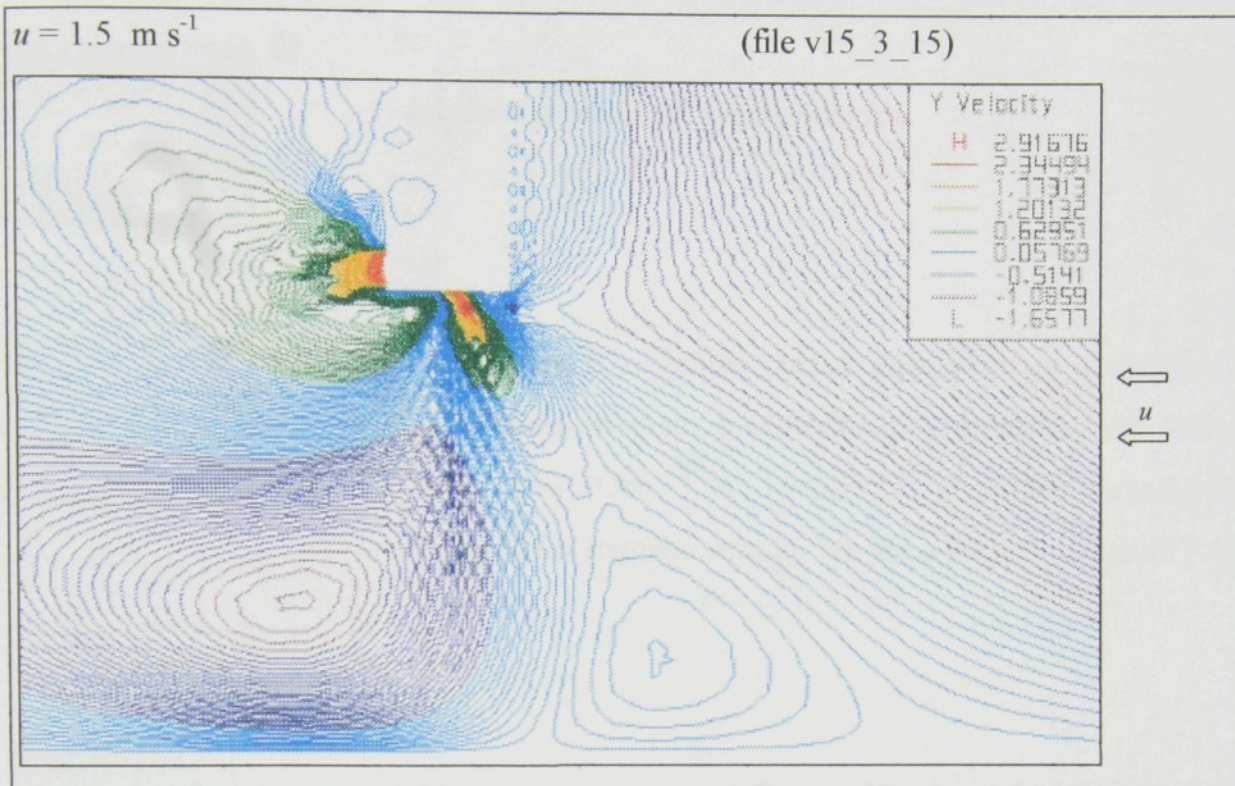
Z tohoto hlediska by bylo dostačující zabrzdit externí proud vzduchu jen částečně. Takto zpomalený proud by se v prostoru vzduchové clony ještě před vniknutím do vnitřního prostoru stačil alespoň částečně prohřát a tepelné ztráty do okolí by byly minimální.

Na Obr. 5.4 ,kde jsou znázorněny izočáry rychlostního pole ve směru osy y - paralelně s rovinou podlahy. V tomto případě je zřetelné, že část teplého vzduchu clony odchází do okolního prostoru. Tento případ dokazuje předešlou úvahu o možném nebezpečí předimenzování vzduchové clony.

Ještě lépe tento stav charakterizuje vektorové pole rychlostí (viz Obr. 5.5) pro stejný případ jako na Obr. 5.4.

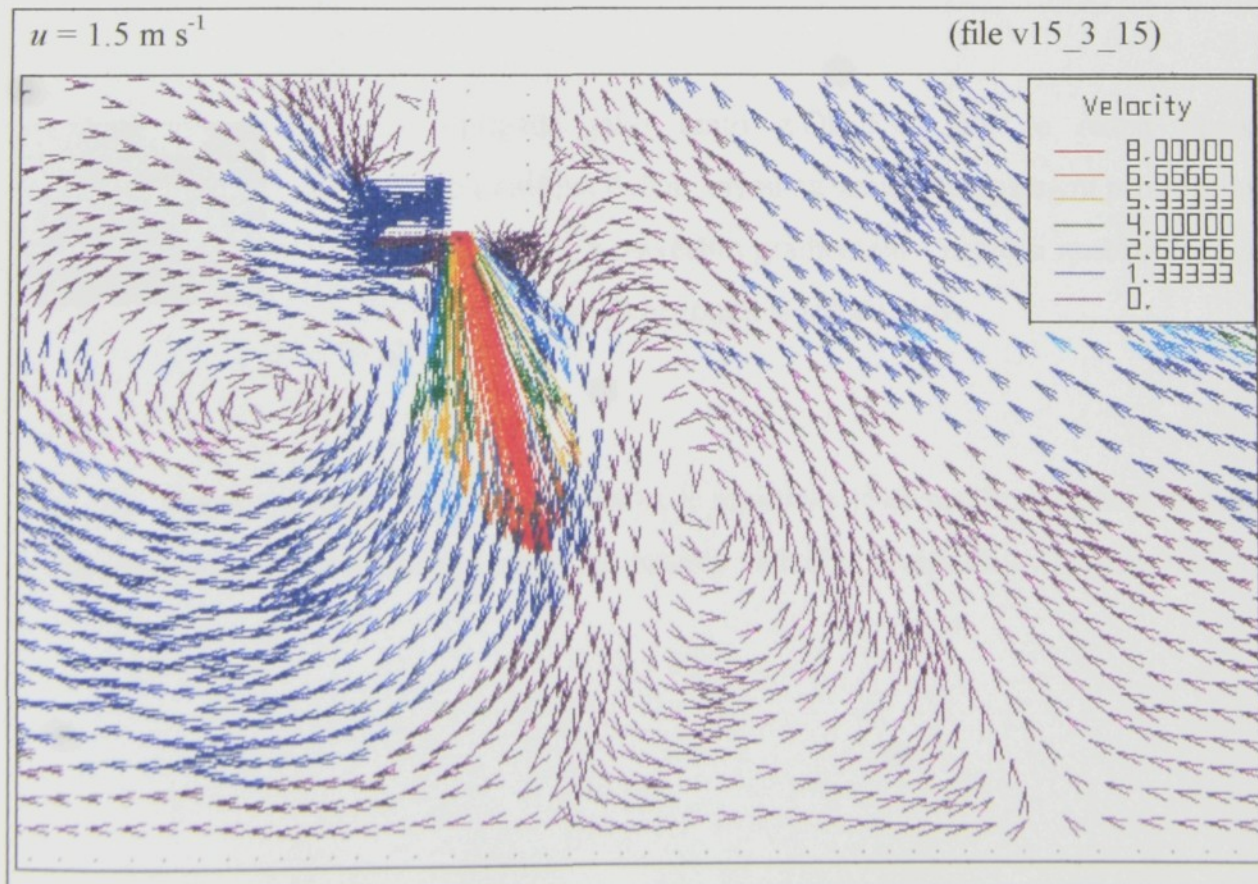
Obr. 5.4 - Izočáry rychlostí clony VIENTO B2

parametry : $h = 3 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$; $u = 1.5 \text{ m s}^{-1}$



Obr. 5.5 - Vektorové pole rychlostí modelu

parametry : $h = 3 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$; $u = 1.5 \text{ m s}^{-1}$



Na Obr. 5.4 je vidět několik charakteristických bodů, které po konfrontaci s vektorovým polem rychlostí (viz. Obr. 5.5) byly následně určeny jako:



- lokální maximum příslušné rychlosti



- jestliže jde o označení oblasti jejíž okolí je oboustranně ohraničeno stejným protisměrným prouděním, pak jde o střed víru (Obr. 5.4). Jestliže jde o oblast ohraničenou prouděním stejného smyslu, tak jde o lokální minimum (viz Obr. 5.6)



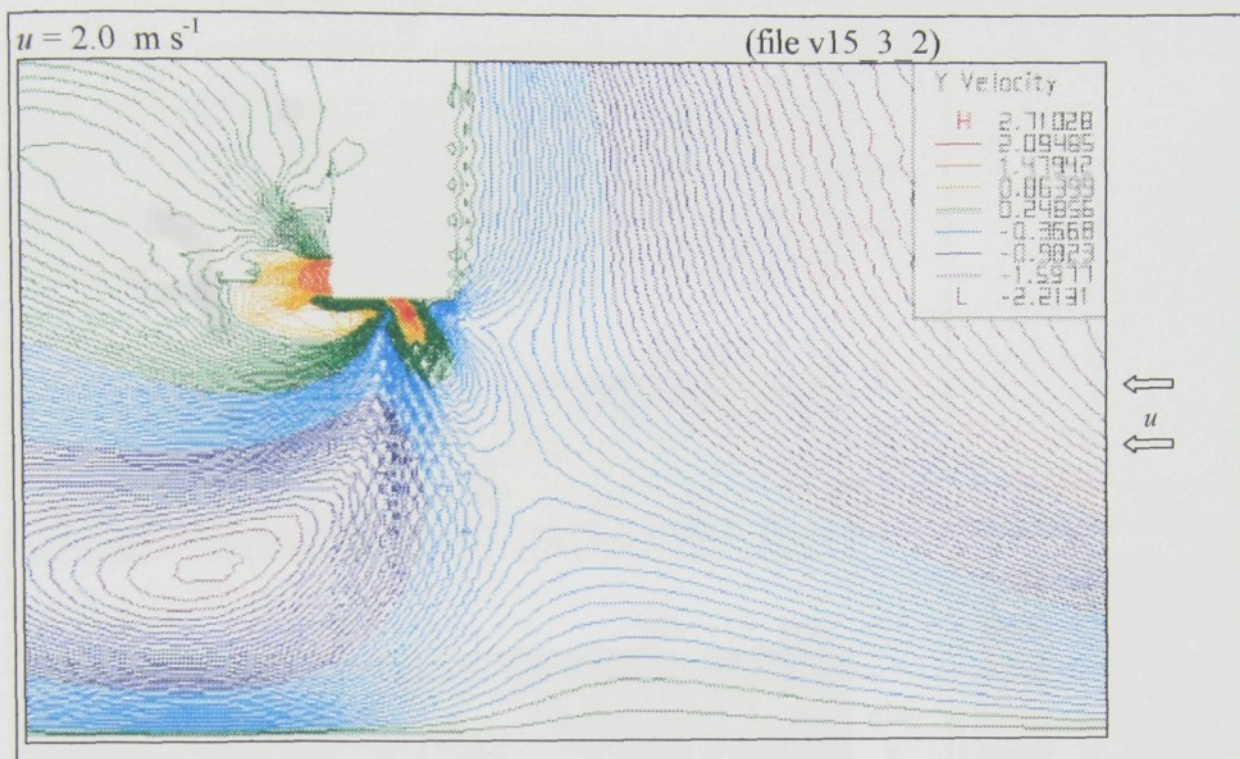
- změna orientace proudění - rozdělení, spojení proudového pole, tento bod má vazbu na existující vír v blízké oblasti



- v případě jako tento z Obr.5.4, kdy je jedna oblast ohraničena dvěma jinými se vzájemně opačným prouděním, tak místo s největším gradientem - největší hustota izočar, charakterizuje přítomnost středu víru

Obr. 5.6 ukazuje případ, kde externí rychlost je prakticky ještě nad hranicí, kdy dochází k úplnému zastavení a odklonění externího proudu vzduchu vlivem víru v prostoru vrat..

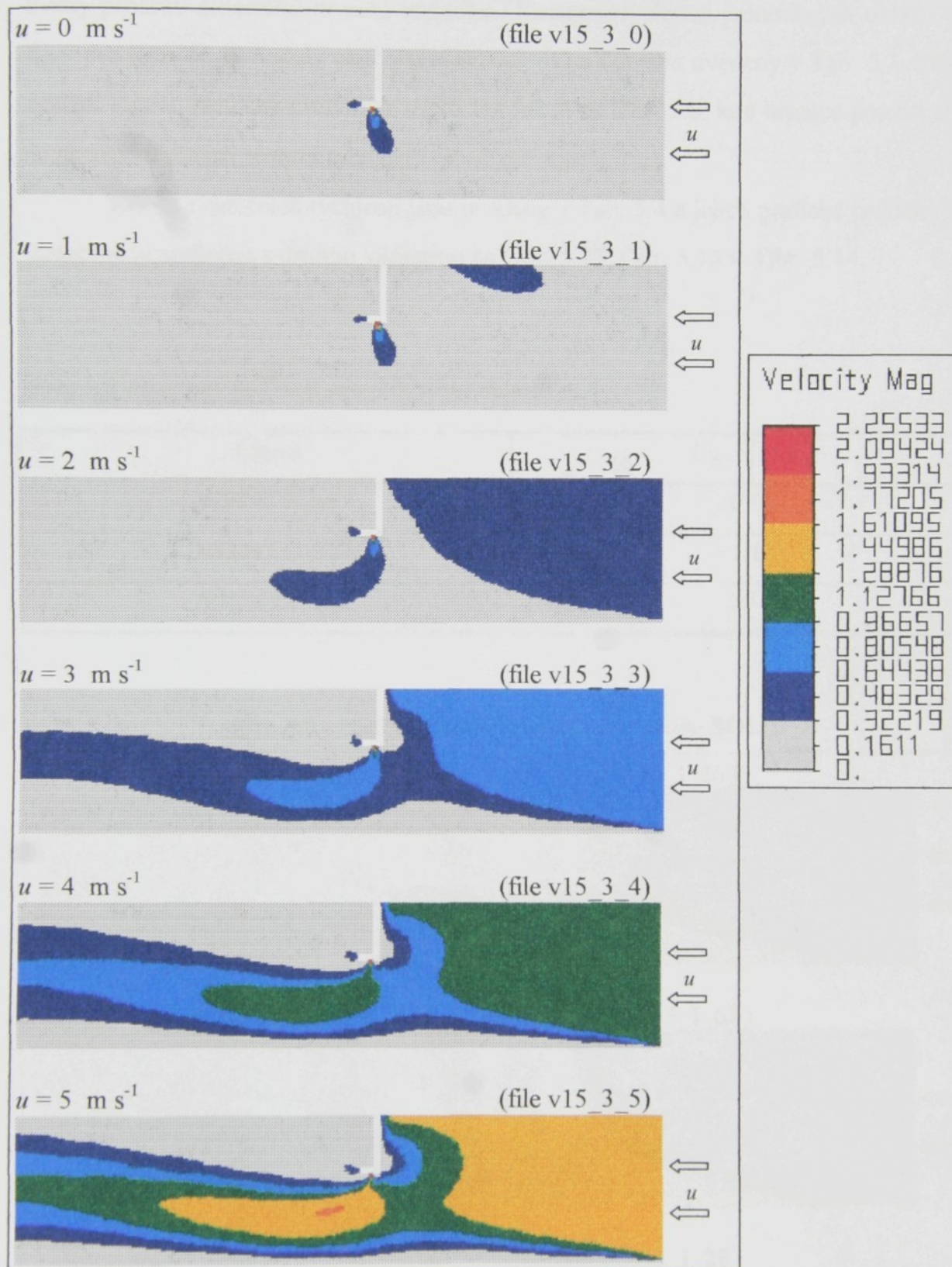
Obr. 5.6 - Izočáry rychlostí clony VIENTO B2 - parametry : $h = 3 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$;
 $u = 2,0 \text{ m s}^{-1}$



Další hodnotící hledisko vyplynulo z hrubého vykreslení spočítaných výsledků. Rychlostní pole je vykresleno pouze ostrými konturami. Hodnoty rychlostí se zde pohybují v rozsahu daným definicí počtu barev. Počet byl zvolen vždy tak, aby se jedna oblast rychlostí pohybovala zhruba v rozmezí 1 m s^{-1} . Mezní externí rychlost použitelnosti clony je určena spojením oblasti charakterizující nejmenší rychlosti $u \approx (0 \div 1) \text{ m s}^{-1}$ a oblasti o řád vyšší. Vývoj těchto oblastí je pro jeden případ clony VIENTO B2, kde $h = 3 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$, znázorněn na Obr. 5.7. Pro další modely je vývoj těchto oblastí znázorněn v příloze P 2.1 ÷ P 2.9.

Hledisko založené na ostrých konturách proudu je již v dalším textu uváděno jako hledisko nazvané SOLID.

Obr. 5.7 - Vývoj ostrých kontur rychlostních polí clony VIENTO B2 v závislosti na externí rychlosti



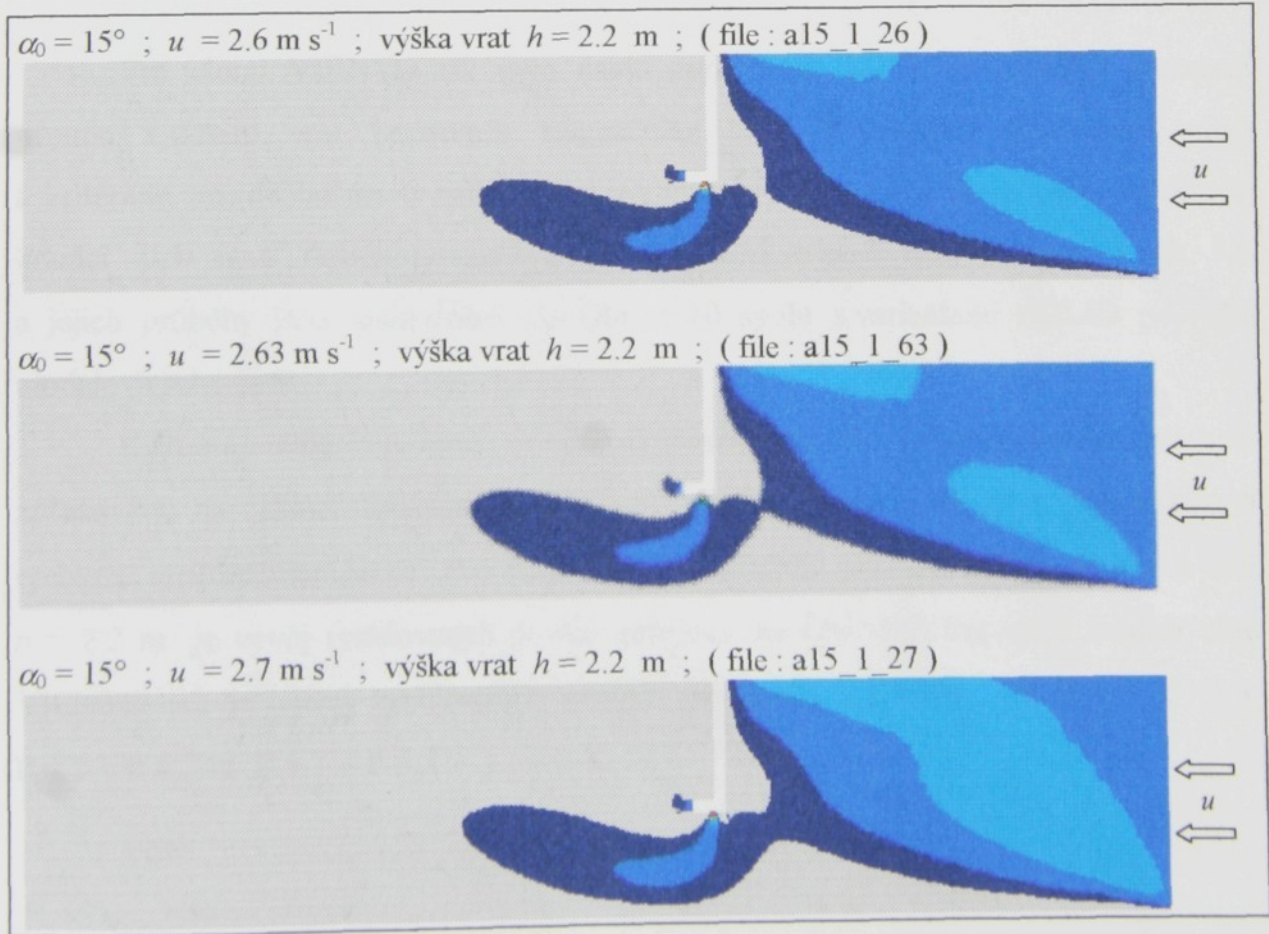
Vyhodnocení výsledků podle kritéria $SOLID < U_{lim}$ - rychlostní pole je rozděleno na určitý počet oblastí se zhruba konstantní rychlostí. V těchto případech bylo vzato do úvahy prohrátí externího proudu vzduchu.. Rozmezí rychlosti jednotlivých oblastí pole U_{lim} pro jednotlivé modely clon VIENTO A2, B2 a C2 jsou uvedeny v Tab. 5.3. Příklad použití tohoto hlediska pro clonu VIENTO A2 je na Obr. 5.8, kde hranice použití clony se nachází v oblasti externí rychlosti $u \approx 2.63 \text{ m s}^{-1}$.

Hranice externích rychlostí jsou uvedeny v Tab. 5.4 a jejich grafické průběhy jsou znázorněny společně s druhou variantou na Obr. 5.12, Obr. 5.13 a Obr. 5.14.

Tab. 5.3 -Rozmezí rychlostí pro jednotlivé oblasti

Clona	$U_{lim} \text{ [m s}^{-1}\text{]}$
VIENTO A2	0.93
VIENTO B2	1.14
VIENTO C2	0.98

Obr. 5.8 - Použití kritéria rychlostí nazvaného SOLID



Tab. 5.4 - Hodnoty externí rychlosti limitující použitelnost clony - infiltrace zadní stěnou

VIENTO A2			
h [m]	u [m s ⁻¹]		
	$\alpha_0 = 0^\circ$	$\alpha_0 = 15^\circ$	$\alpha_0 = 30^\circ$
2.0	2.68	2.83	2.88
2.2	2.46	2.63	2.68
2.5	2.22	2.37	2.42
VIENTO B2			
2.2	3.02	3.25	3.3
2.5	2.73	2.95	2.99
3.0	2.36	2.55	2.6
VIENTO C2			
2.5	4.66	5.06	5.15
3.0	3.96	4.38	4.55
3.5	3.45	3.88	4.06

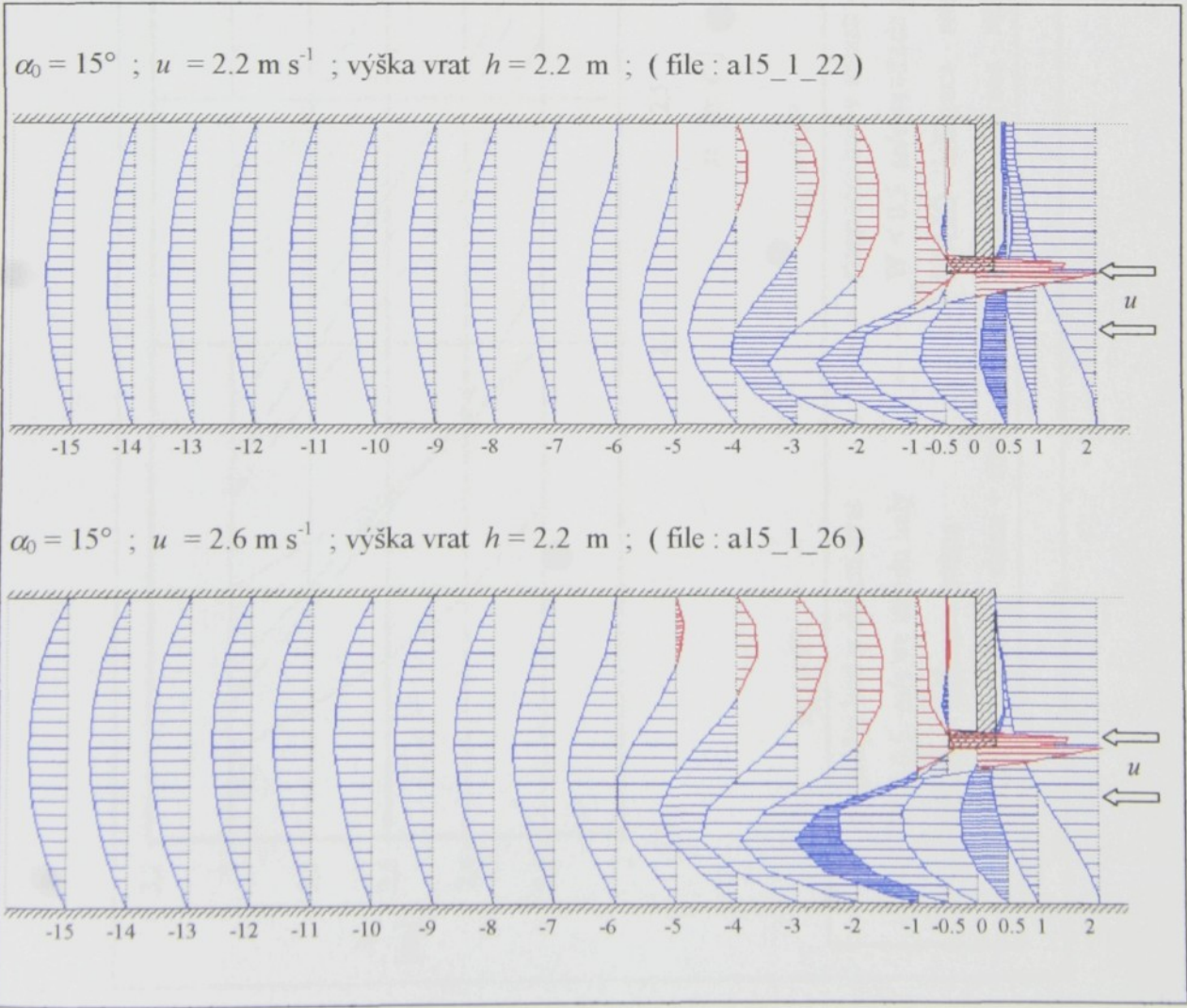
Pro clonu VIENTO B2 bylo navíc zpracováno kritérium úplného zastavení proudu v oblasti vrat (existence stagnačního bodu podmíněna přítomností víru) a kritérium maximální meze rychlosti ve středním prostoru haly, která nesmí překročit hranici 0.5 m s⁻¹. Hodnoty rychlostí pro příslušná kritéria jsou uvedeny v Tab. 5.5 a jejich průběhy jsou znázorněny na Obr. 5.10 spolu s variantami SOLID pro obě modelová schémata.

Kritérium maximální hranice rychlosti proudění ve střední části prostoru haly bylo zpracováno na základě aproximace externích rychlostí v závislosti na profilech interní rychlosti v příslušném místě. Pro případ kdy úhel clony je $\alpha_0 = 15^\circ$ a výška vrat $h = 2.2$ m je vývoj rychlostních profilů zobrazen na Obr. 5.9. Pro další modely clon VIENTO B2 je vývoj rychlostních profilů znázorněn v příloze P 3.1 ÷ P 3.3, P 4.1 ÷ P 4.3 a P 5.1 ÷ P 5.3.

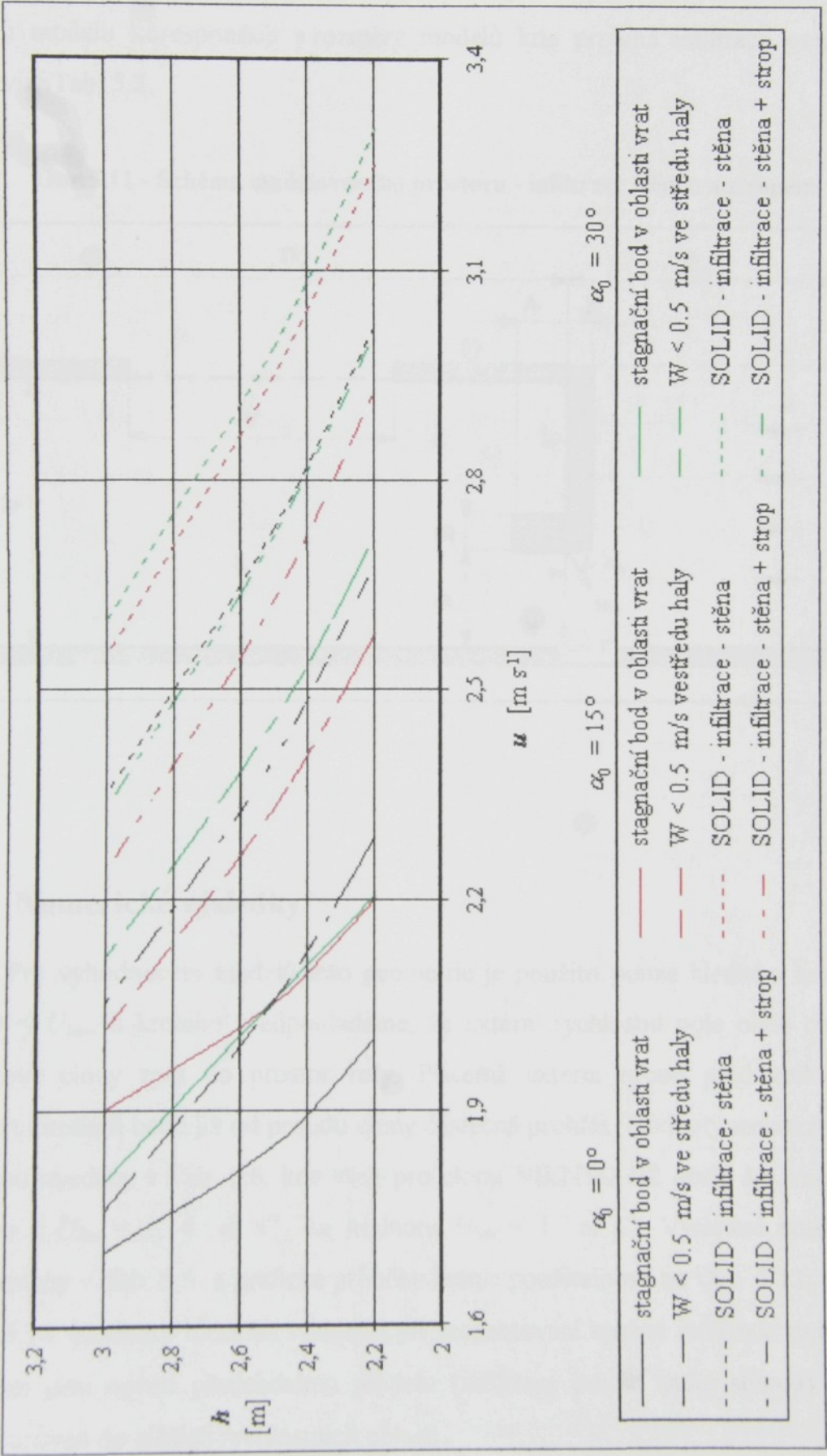
Tab. 5.5 - Rychlosti pro další hodnotící kritéria clony VIENTO B2

VIENTO B2			
Úplné zastavení proudu			
h [m]	u [m s ⁻¹]		
	$\alpha_0 = 0^\circ$	$\alpha_0 = 15^\circ$	$\alpha_0 = 30^\circ$
2.2	2.00	2.20	2.205
2.5	1.85	2.05	2.055
3.0	1.70	1.90	1.80
Maximální rychlost v centru haly ≤ 0.5 m s ⁻¹			
2.2	2.287	2.580	2.721
2.5	2.053	2.329	2.456
3.0	1.759	2.012	2.117

Obr. 5.9 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly - infiltrace zadní stěnou



Obr. 5.10 - Porovnání hodnotících kritérií clony VIENTO B2 - infiltrace zadní stěnou

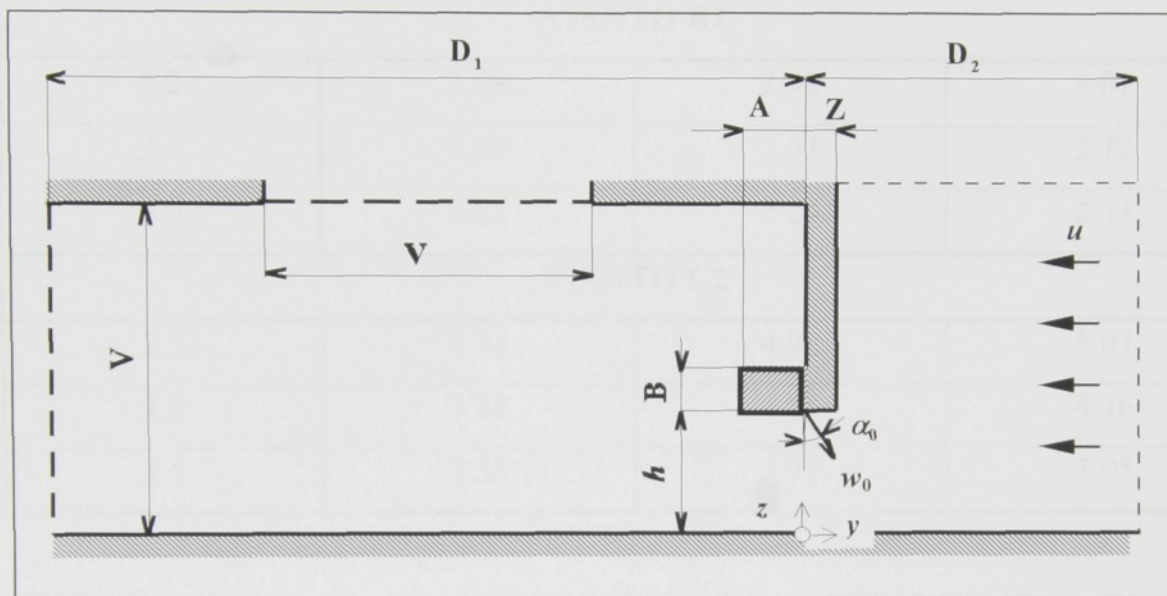


5.2. Částečná infiltrace zadní stěnou a stropem

5.2.1. Geometrie modelů

Základní schéma modelovaného prostoru je na obrázku Obr. 5.11. Velikosti rozměrů modelu korespondují s rozměry modelů kde probíhá infiltrace pouze zadní stěnou viz. Tab. 5.2.

Obr.5.11 - Schéma modelovaného prostoru - infiltrace stěnou a stropem



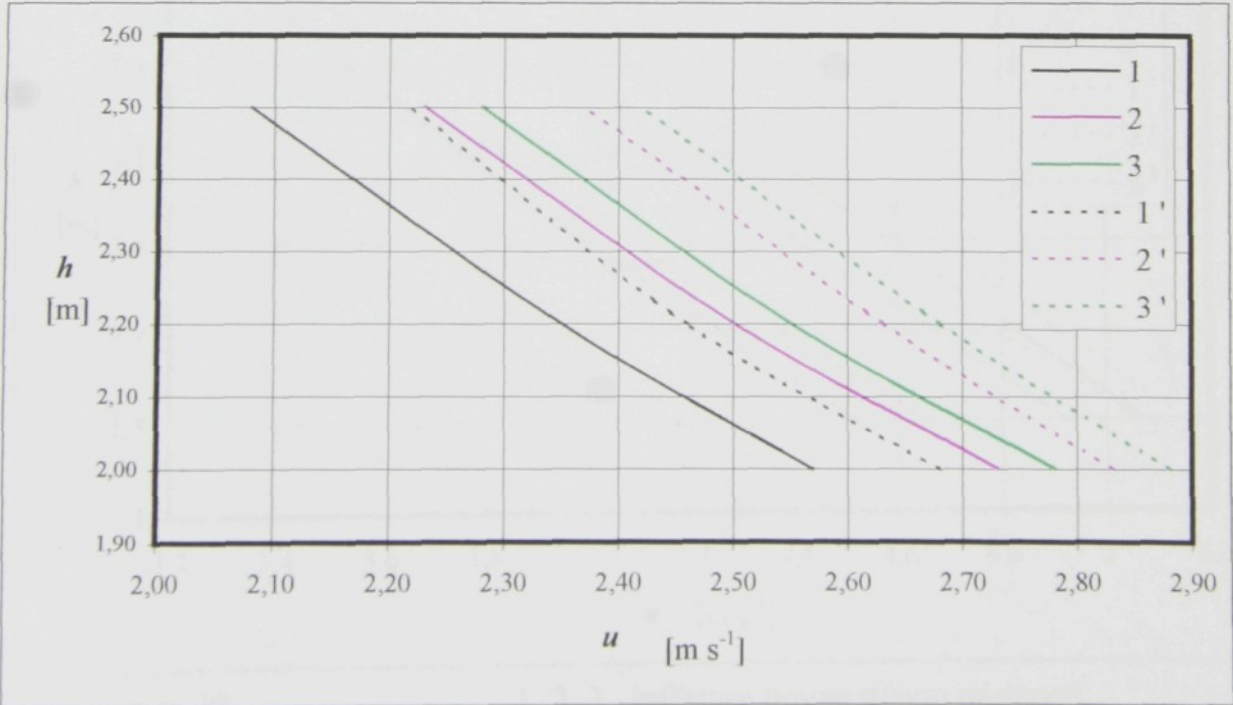
5.2.2. Numerické výsledky

Pro vyhodnocení modelů této geometrie je použito pouze hledisko označované $SOLID < U_{lim}$, u kterého předpokládáme, že externí rychlostní pole ohne celý proud vzduchové clony zpět do prostor haly. Přičemž externí proud před vniknutím do vnitřních interiérů bude již od proudu clony částečně prohrát. Hodnoty mezních rychlostí U_{lim} jsou uvedeny v Tab. 5.6, kde však pro clonu VIENTO B2 došlo ke změně mezní rychlosti z $U_{lim} = 1.14 \text{ m s}^{-1}$ na hodnotu $U_{lim} = 1 \text{ m s}^{-1}$. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 5.6 a grafické průběhy hranic použitelnosti na Obr. 5.12, Obr. 5.13 a Obr. 5.14. Hodnoty mezních rychlostí při respektování možné infiltrace zadní stěnou i stropem jsou oproti předchozímu modelu (infiltrace pouze zadní stěnou) posunuty o jistou úroveň do nižších rychlostních oblastí.

Tab. 5.6 - Hodnoty rychlosti limitující použitelnost clony - infiltrace stěnou a stropem

VIENTO A2			
h [m]	u [m s ⁻¹]		
	$\alpha_0 = 0^\circ$	$\alpha_0 = 15^\circ$	$\alpha_0 = 30^\circ$
2.0	2.57	2.73	2.78
2.2	2.35	2.5	2.55
2.5	2.08	2.23	2.28
VIENTO B2			
2.2	2.68	2.93	3.01
2.5	2.40	2.63	2.72
3.0	2.05	2.24	2.33
VIENTO C2			
2.5	4.52	4.92	5.07
3.0	3.88	4.28	4.46
3.5	3.33	3.75	3.95

Obr. 5.12 - VIENTO A2 ; srovnání hranic použitelnosti clony



1, 1' - $\alpha_0 = 0^\circ$

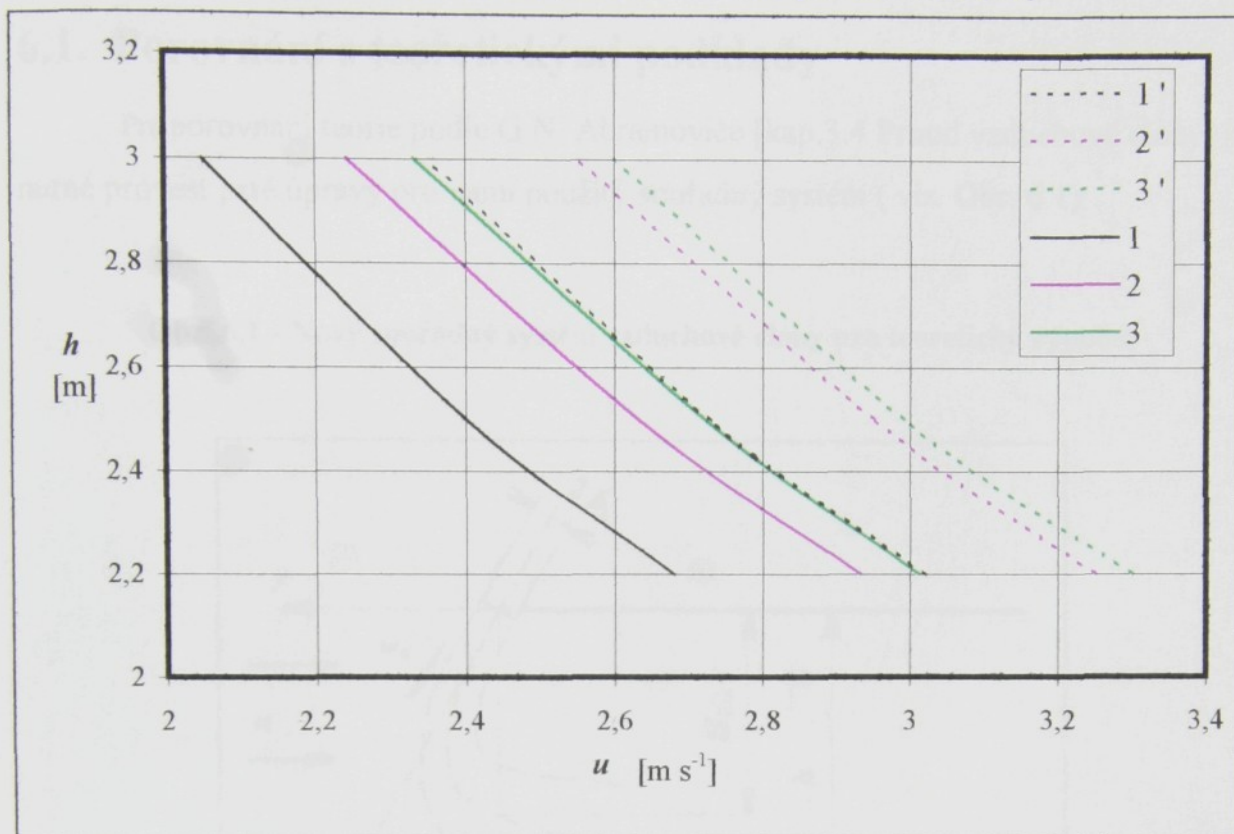
2, 2' - $\alpha_0 = 15^\circ$

3, 3' - $\alpha_0 = 30^\circ$

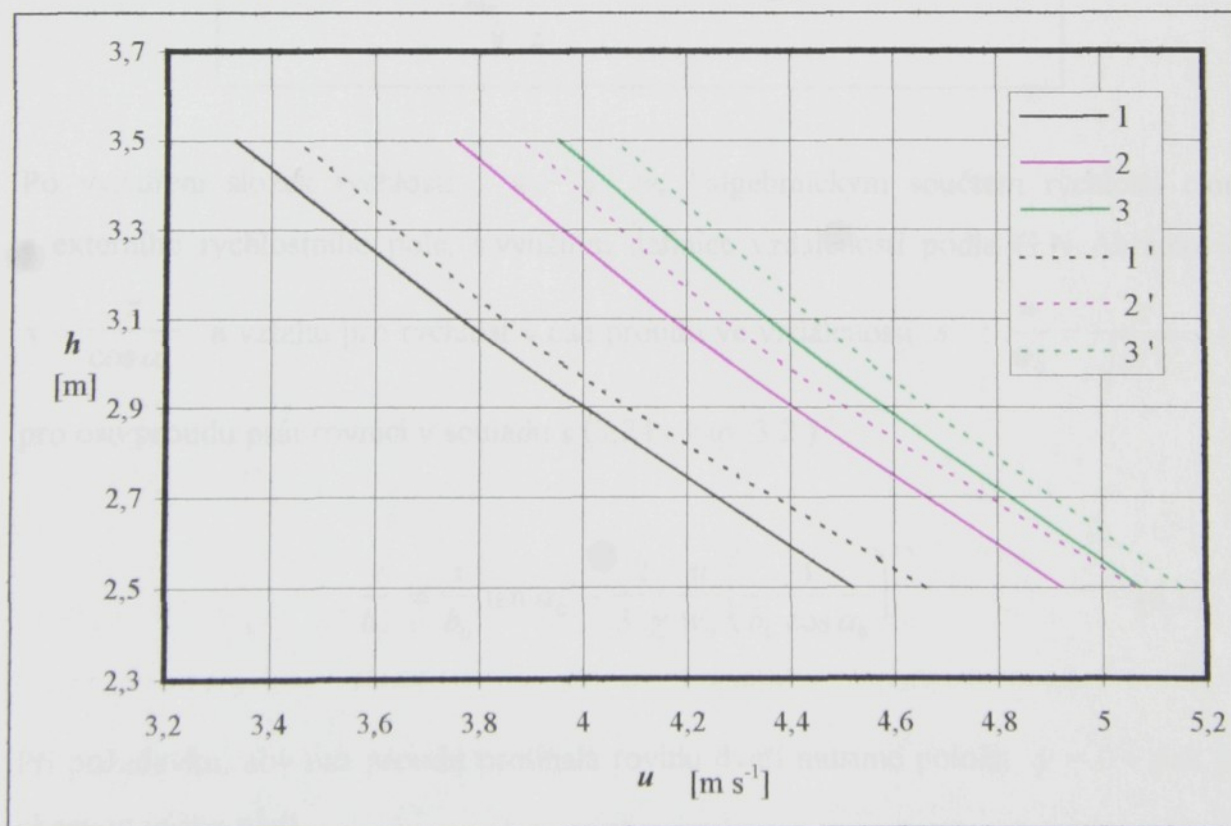
1, 2, 3 - infiltrace pouze stěnou místnosti

1', 2', 3' - infiltrace stěnou i stropem místnosti

Obr. 5.13 - VIENTO B2 ; srovnání hranic použitelnosti clony



Obr. 5 14 - VIENTO C2 ; srovnání hranic použitelnosti clony



1, 1' - $\alpha_0 = 0^\circ$

2, 2' - $\alpha_0 = 15^\circ$

3, 3' - $\alpha_0 = 30^\circ$

1, 2, 3 - infiltrace pouze stěnou místnosti

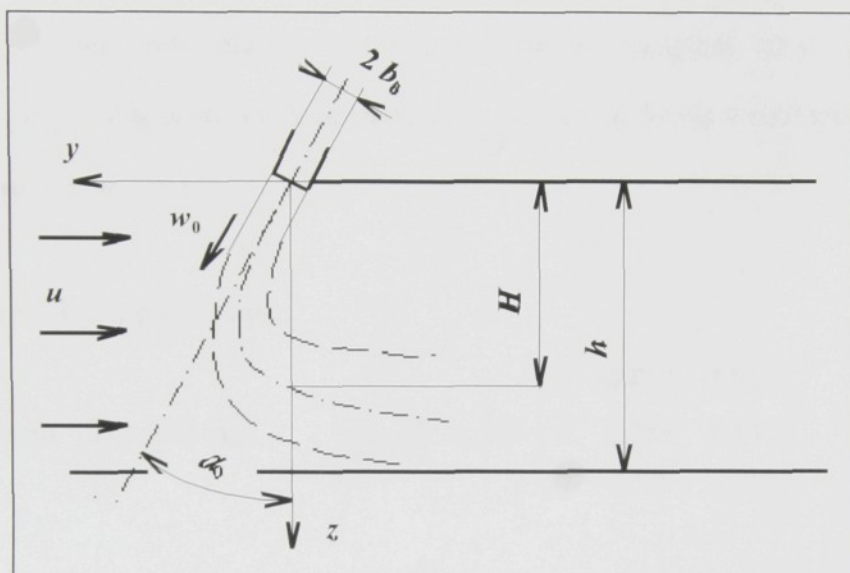
1', 2', 3' - infiltrace stěnou i stropem místnosti

6. DISKUSE NUMERICKÝCH VÝSLEDKŮ

6.1. Porovnání s teoretickými podklady

Pro porovnání teorie podle G.N. Abramoviče [kap.3.4 Proud vzduchové clony] je nutné provést jisté úpravy pro námi použitý souřadný systém (viz. Obr. 6.1).

Obr. 6.1 - Nový souřadný systém vzduchové clony pro teoretický výpočet



Po vyjádření složek rychlostí w_y a w_z algebraickým součtem rychlosti clony a externího rychlostního pole, s využitím definice vzdálenosti podle G.N Abramoviče

$s = \frac{z}{\cos \alpha_0}$ a vztahu pro rychlost v ose proudu ve vzdálenosti s : $\frac{w}{w_0} = \frac{\chi}{\sqrt{s/b_0}}$, lze

pro osu proudu psát rovnici v souladu s (3.24 - kap. 3.2.)

$$\frac{y}{b_0} = \frac{z}{b_0} \tan \alpha_0 - \frac{2}{3} \frac{u}{\chi w_0} \left(\frac{y}{b_0 \cos \alpha_0} \right)^{1.5} \quad (6.1)$$

Při požadavku, aby osa proudu protínala rovinu dveří musíme položit $y = 0$ - pak pro obecnou výšku platí

$$H = 2.5 \chi^2 b_0 \left(\frac{w_0}{u} \right)^2 \sin^2 \alpha_0 \cos \alpha_0 \quad (6.2)$$

Po dosazení výšky dveří za výšku průsečíku s rovinou dveří vztah pro externí rychlost

$$u = 1.5 \chi \quad w_0 \sqrt{\frac{b_0 \sin^2 \alpha_0 \cos \alpha_0}{H}} \quad (6.3)$$

kde konstanta χ při výpočtu s rychlostí střední po průřezu proudu má podle vztahů uvedených v Tab. 3.5 - kap. 3.2.2. a s úvahou, že v reálných případech na rozdíl od teoretických je proud zpravidla nerovnoměrný částečně rozrušený již v ústí výustky, má tvar $\chi = 1.7 \sqrt{n_{2u}}$. V teoretických případech je rychlostní profil v ústí trysky považován za rovnoměrný $\Rightarrow n_{2u} = 1$.

Z teoretických podkladů :

$$\text{pro clonu VIENTO A2} \quad U_{\lim}(h, \alpha_0) = \begin{pmatrix} 0 & 0.827 & 1.513 \\ 0 & 0.788 & 1.442 \\ 0 & 0.74 & 1.353 \end{pmatrix} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

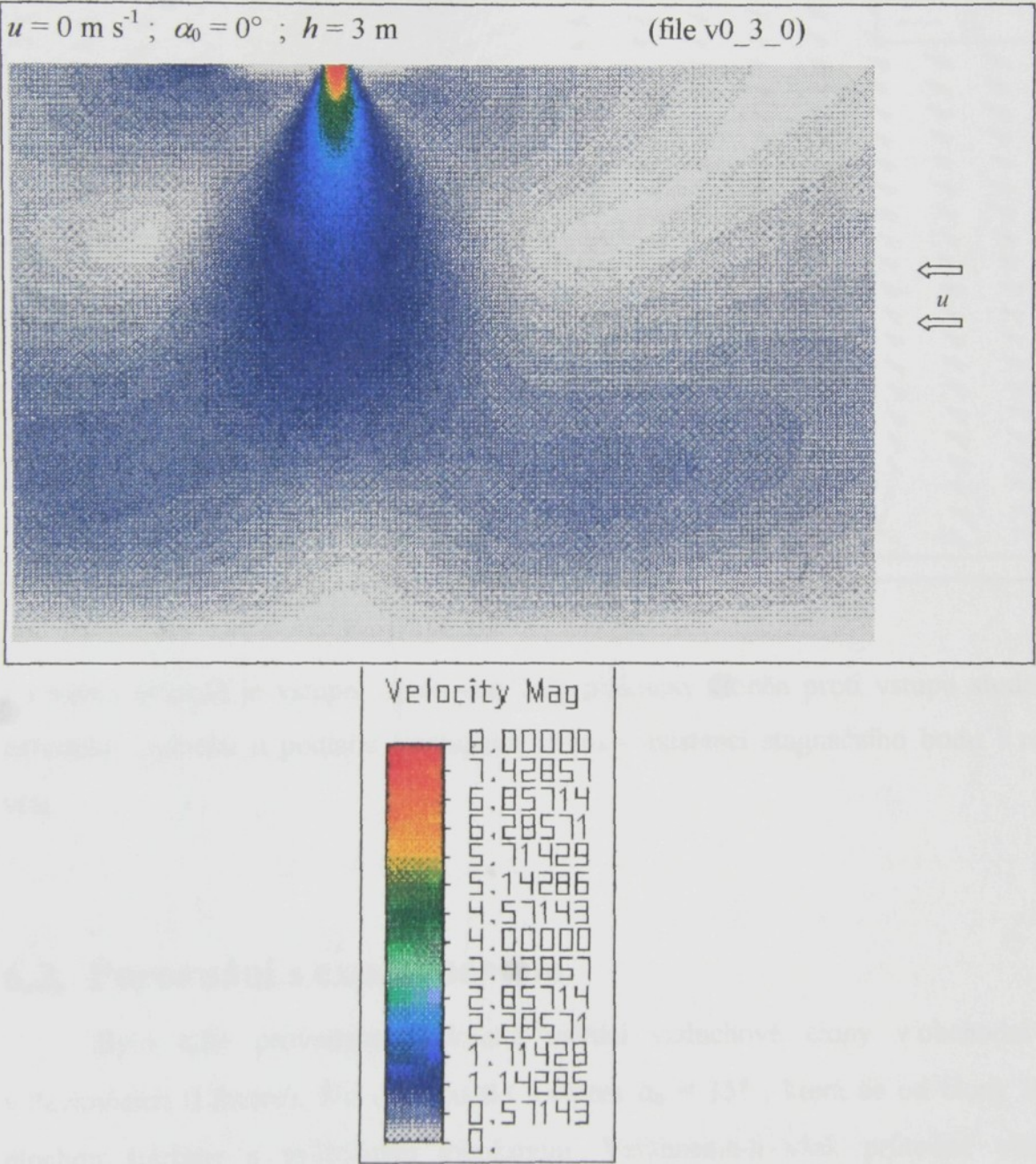
$$\text{pro clonu VIENTO B2} \quad U_{\lim}(h, \alpha_0) = \begin{pmatrix} 0 & 0.971 & 1.776 \\ 0 & 0.911 & 1.166 \\ 0 & 0.831 & 1.521 \end{pmatrix} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

$$\text{pro clonu VIENTO C2} \quad U_{\lim}(h, \alpha_0) = \begin{pmatrix} 0 & 1.332 & 2.436 \\ 0 & 1.216 & 2.224 \\ 0 & 1.126 & 2.059 \end{pmatrix} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

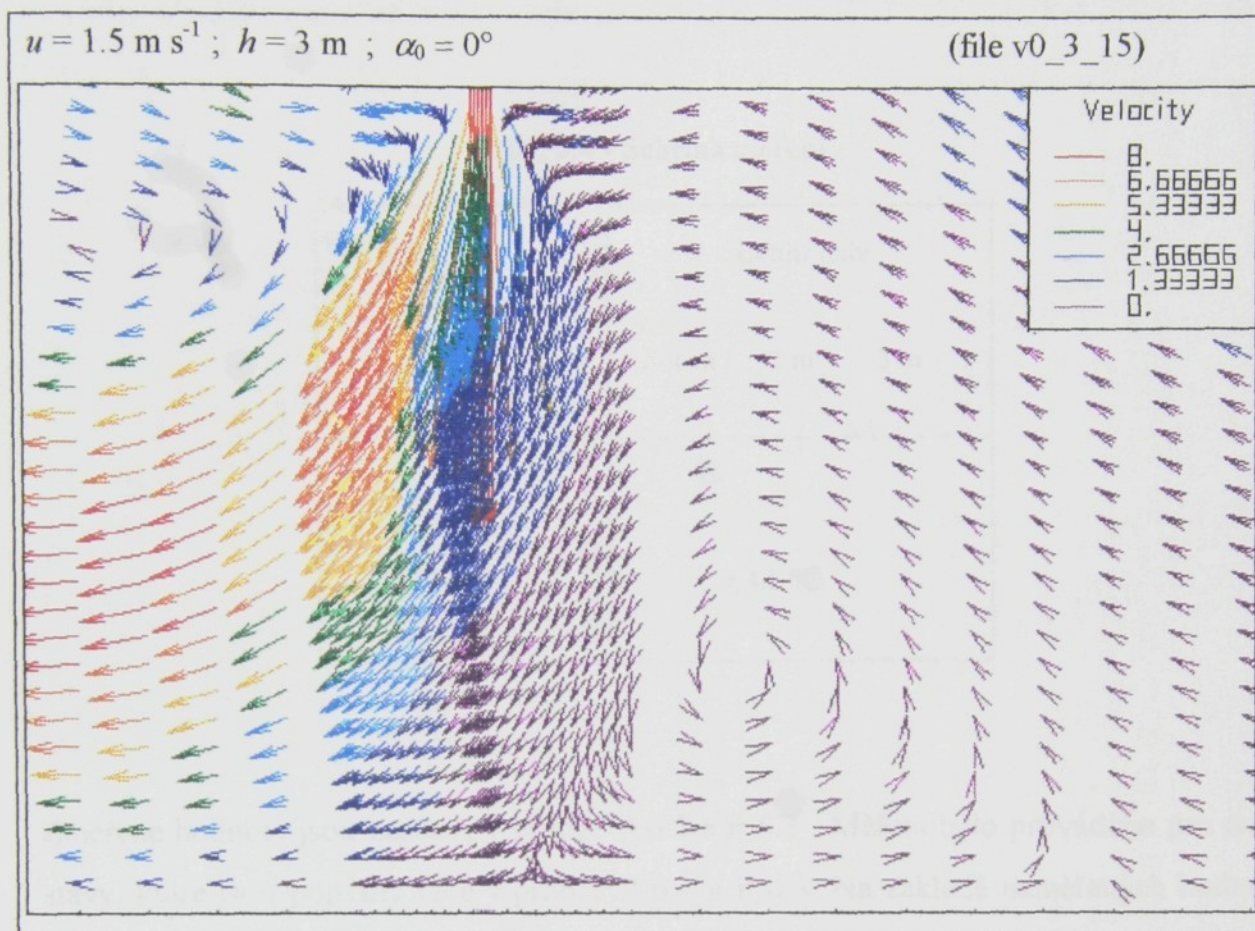
Výsledky limitních rychlostí stanovených z rovnice (6.3) jsou ve značném nesouladu s numerickými. Je to způsobeno zde neuvažovanými rozšiřujícími se hranicemi volného proudu vzduchové clony. Tento případ je velice dobře vidět z obrázku viz Obr. 6.2. Kde je znázorněno rychlostní pole v oblasti vratové clony pro případ $\alpha_0 = 0^\circ$, výšku vrat $h = 3 \text{ m}$ a externí rychlost $u = 0 \text{ m s}^{-1}$, které ukazuje vývoj hranic proudu neovlivněného externím prouděním. Oblast krajního proudu neovlivněná zpětným prouděním potvrzuje poloempirické vztahy pro volný proud uvedené v Tab. 3.5-kap.3.2.3. Teorii vyvrací

i následný model pro stejnou geometrii clony, ale vyšší externí rychlost $u = 1.5 \text{ m s}^{-1}$ viz Obr. 6.3, znázorňující vektorové pole proudění v okamžiku, kdy by clona podle teoretických podkladů měla být již proražena. Ze zmíněného Obr. 6.3 jsou naopak vidět ještě jisté rezervy, které clona pro tento případ má.

Obr. 6.2 - Proud clony bez vlivu externího proudění



Obr. 6.3 - Vektorové pole rychlostí modelu v0_3_15



i v tomto případě je vstupní otvor vrat haly prakticky cloněn proti vstupu studeného externího vzduchu u podlahy existujícím vírem - existencí stagnačního bodu v rovině vrat.

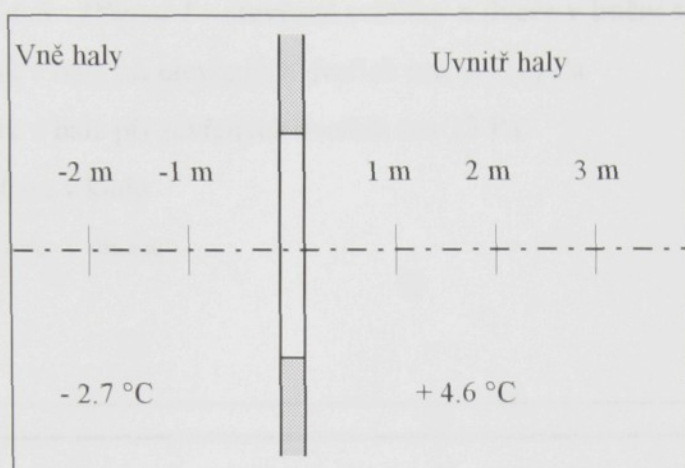
6.2. Porovnání s experimentem

Bylo také provedeno praktické měření vzduchové clony v obchodní hale v Pavlovicích (Liberec). Šlo o clonu B3 s úhlem $\alpha_0 = 15^\circ$, která se od clony B2 liší plochou štěrbinou a průtočným množstvím. Vztáhneme-li však průtočné množství vzduchu na šířku štěrbin, dostáváme identický případ clony VIENTO B2 a z tohoto hlediska je lze mezi sebou porovnávat. Experiment popsán v příloze P 6.1.

Při měření nemohly být dodrženy podmínky odpovídající numerické simulaci. Foukal šikmý boční nárazový vítr kdy cca 5 m před halou nabýval hodnot $2.7 \div 3.8 \text{ m s}^{-1}$.

Teplotní spád vzduchu na cloně byl cca $3\div 4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření teploty bylo prováděno vně i uvnitř haly v místech podle schéma uvedeného na Obr. 6.4.

Obr. 6.4 - Schéma měření



Změřené hodnoty jsou zapsány v příloze P 6.2 a P 6.3. Měření bylo prováděno pro dva stavy, které jsou popsány také v příloze P 6.2 a P 6.3. Na základě naměřených hodnot byly zpracovány rychlostní a teplotní profily v jednotlivých rovinách na dané vzdálenosti od dveří haly. Jejich zpracování je uvedeno v příloze P 6.4 a P 6.5. Vzhledem k nárazovému charakteru externího větru byly však rychlostní a teplotní profily poměrně neuspořádané. Je na nich ale zřetelně vidět příznivý vliv použití vzduchové clony.

V největší míře je přínos vzduchové clony dokumentován na Obr.6.5 a Obr. 6.6., kde jsou uvedeny průběhy středních rychlostních a teplotních profilů vztažených vždy na příslušný průřez. V obou případech došlo při použití vzduchové clony ke znatelnému posunu profilů do příznivějších oblastí. Překvapivý je zejména posun teplotních profilů, zejména vzhledem k malému teplotnímu spádu na cloně.

V případě 1 - otevřené dveře a světlíky však došlo i přes příznivý vývoj teplotních profilů k proražení clony a nepříznivým pocitům vlivem vyšší rychlosti chladnějšího proudění.

V případě 2 - zavřené světlíky a ostatní dveře je clona i přes chvilkové výpadky způsobené šikmými nárazovými poryvy větru funkční. Podle vývoje středního rychlostního profilu se při stupni 5 zdá být dokonce jistým způsobem předimenzována -

dochází k nežádoucímu proudění ohřátého vzduchu ven z haly. Srovnáním experimentálního měření při externím proudění - $u = 2.7 \div 3.8 \text{ m s}^{-1}$ s numerickými výsledky při infiltraci zadní stěnou a stropem pro stejný případ - $u = 2.63 \text{ m s}^{-1}$ je vidět ještě určitá rezerva.

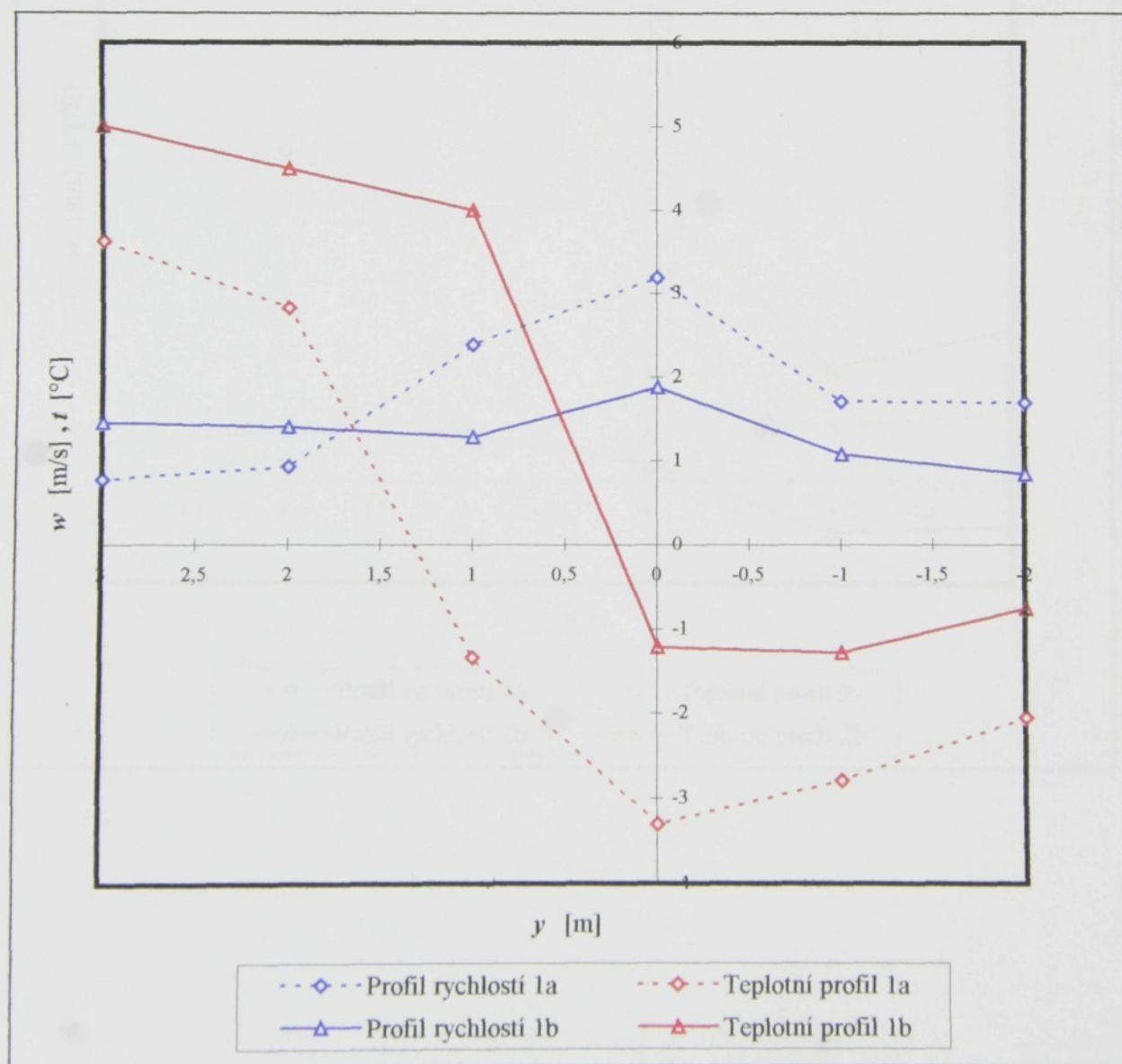
Obr. 6.5 - Příklad 1 - otevřené světlíky a dveře v boční stěně

podtlak v hale při otevřených dveřích cca $(8 \div 10) \text{ Pa}$

podtlak v hale při zavřených dveřích cca 13 Pa

1a - clona v klidu

1b - clona v chodu

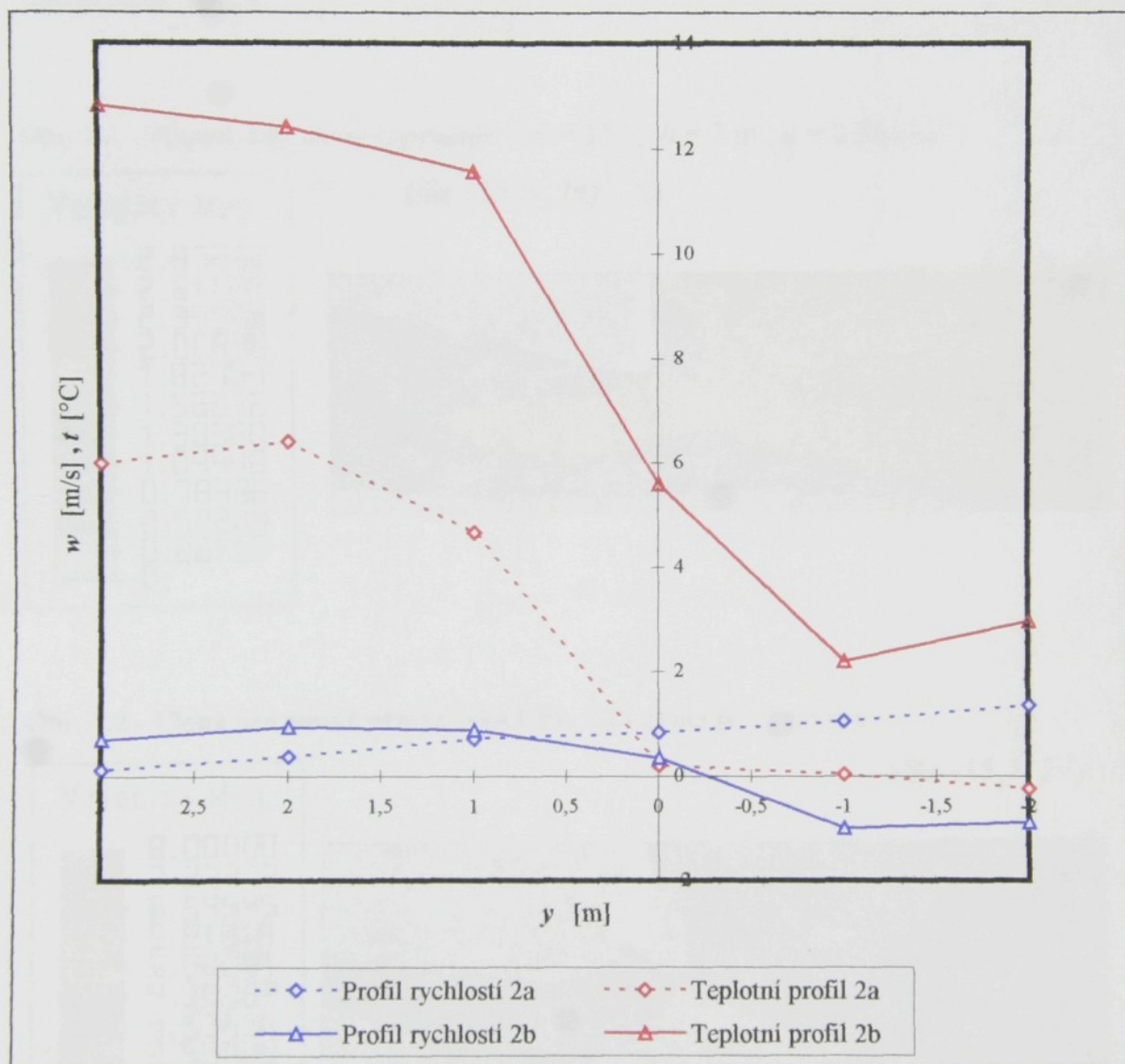


Obr. 6.6 - Příklad 2 - zavřené světlíky a ostatní dveře

podtlak v hale při zavřených dveřích cca (10÷12) Pa

2a - clona v klidu - podtlak v hale při otevřených dveřích cca 2Pa

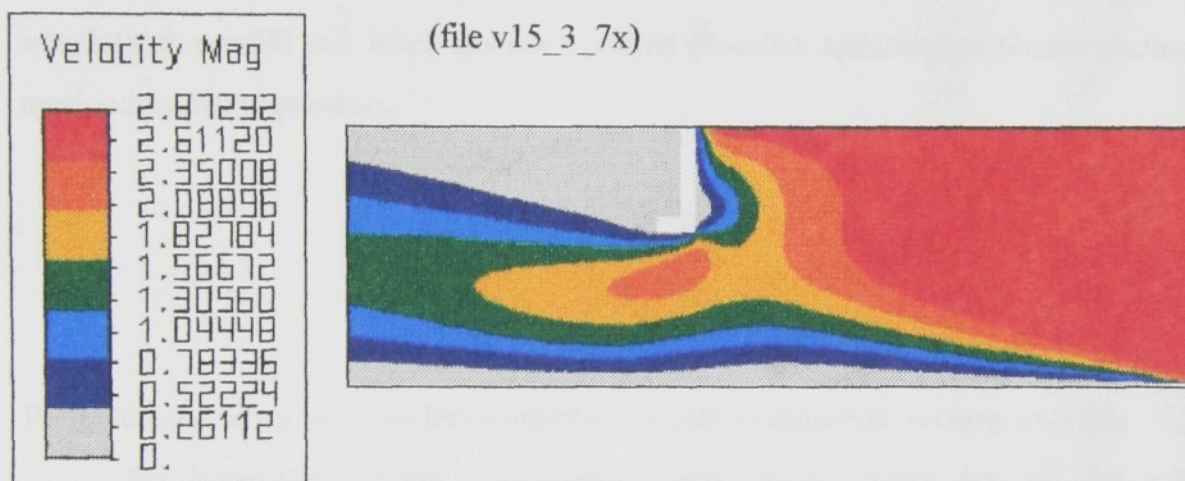
2b - clona v chodu - podtlak v hale při otevřených dveřích cca 3 Pa



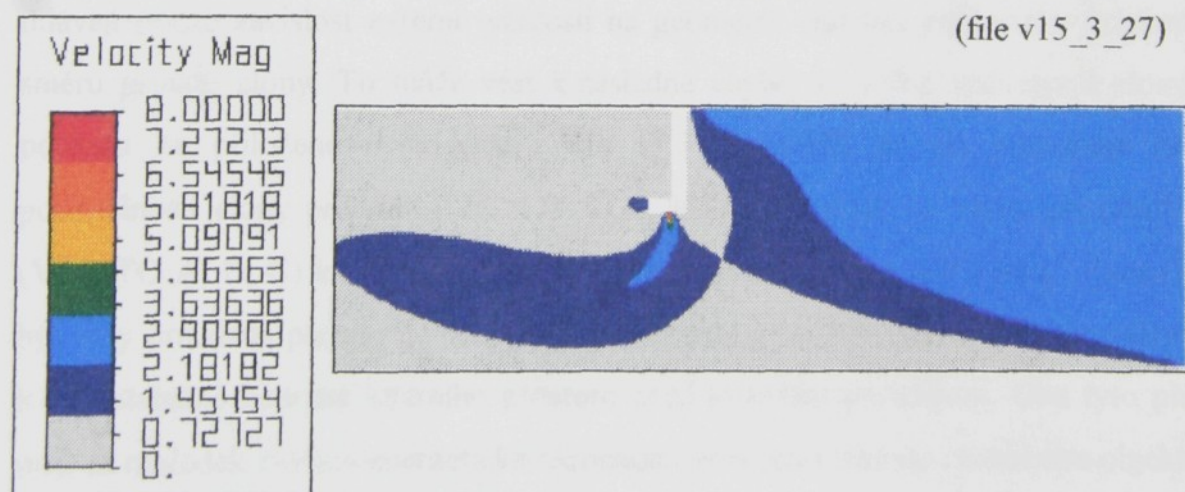
7. SMĚRNICE PRO VOLBU VZDUCHOVÝCH CLON

Hlavním důvodem instalace vzduchové clony je znemožnění přístupu externího proudu vzduchu o nežádoucích parametrech do interního prostoru. Vliv použití clony je na Obr. 7.1. a Obr. 7.2. Na Obr. 7.1 je případ, kdy clona nepracuje a na Obr. 7.2 je clona v provozu. Externí proudění bylo vždy z pravé strany rychlostí $u = 2.56 \text{ m s}^{-1}$ pro případ clony VIENTO B2 - úhel clony $\alpha_0 = 15^\circ$, výška vrat $h = 3 \text{ m}$ - případ infiltrace pouze zadní stěnou.

Obr. 7.1 - Příklad, kdy clona nepracuje - $\alpha_0 = 15^\circ$; $h = 3 \text{ m}$; $u = 2.56 \text{ m s}^{-1}$



Obr. 7.2 - Clona pro tentýž případ jako Obr. 7.1 - clona je v provozu



Vzhledem k úvahám o jednotlivých hodnotících hlediscích, které jsou k dispozici při vyhodnocování numerických výsledků, je neoptimálnější řídit se při výběru vzduchové clony podle nomogramů, které znázorňují hranice funkčnosti clony

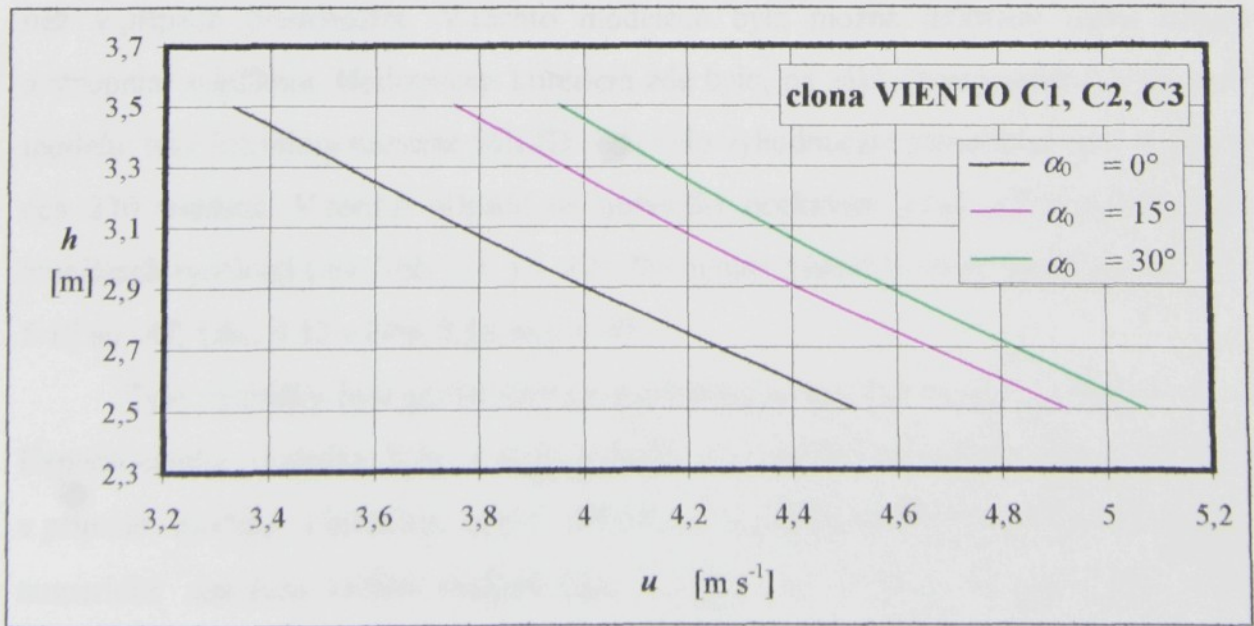
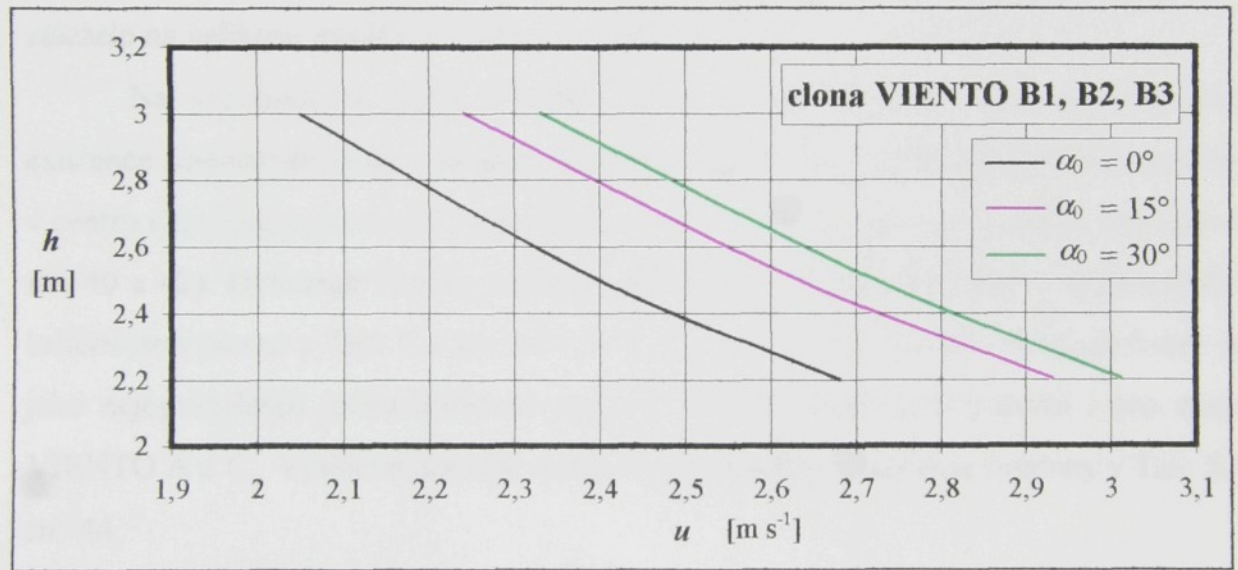
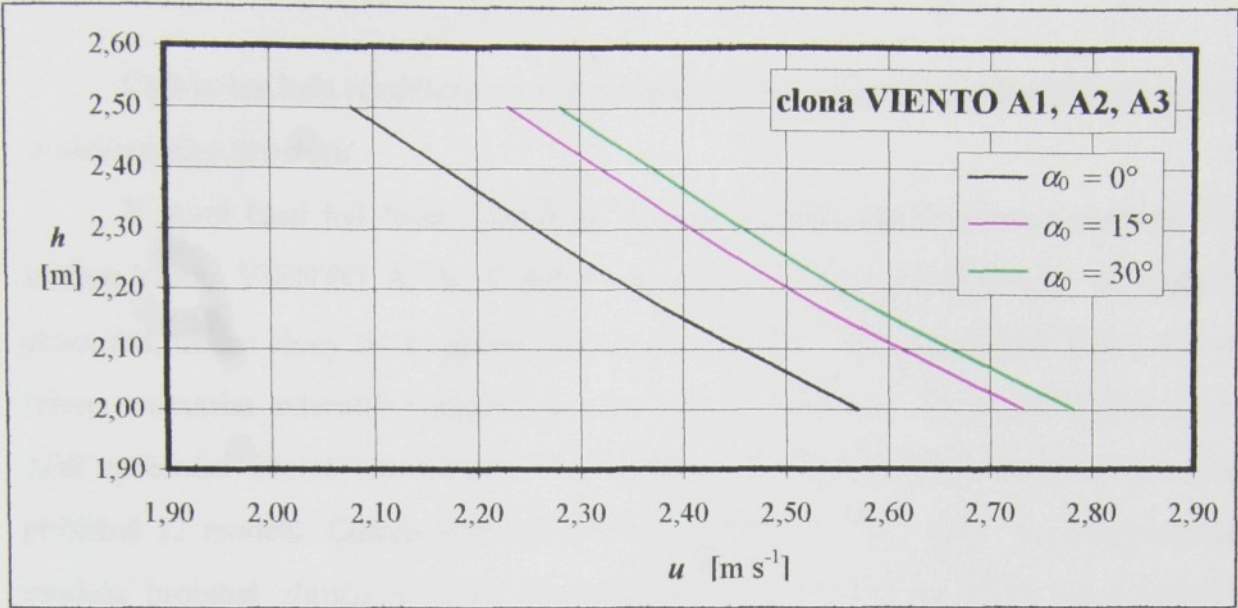
v závislosti na výšce otvoru, který má být chráněn a velikosti možného externího proudění. Absolutní hodnota externího proudu vzduchu v sobě při simulaci zahrnuje i klimatické podmínky. Proudění mezi dvěma prostory je způsobeno zejména rozdílem teplot, které mají za následek vznik gradientu hustoty. Následkem toho dochází k proudění z prostředí o nižší teplotě do prostředí o vyšší teplotě. Z toho plyne, že v hodnotě dynamického tlaku vyvolané simulovanou rychlostí $p_d = \rho \frac{u^2}{2}$ jsou spolu se skutečným externím prouděním zahrnuty i teplotní rozdíly. Jestliže položíme dynamický tlak do rovnosti s tlakovým rozdílem mezi prostory (vychází se z předpokladu konstantního statického tlaku) a za hustotu dosadíme střední hustotu vycházející z teplotních rozdílů pak lehce zjistíme rychlost proudění způsobenou těmito okolnostmi mezi jednotlivými prostory

$$u = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_{stř}}}$$

Podle této rychlosti se již dá lehce orientovat podle příslušných nomogramů Obr. 7.3..

Při konzultaci těchto nomogramů s nomogramy, které udávají jiní výrobci vzduchových clon došlo ke zlepšení orientace a následně jednodušší volbě vhodné clony pro dané podmínky. Ostatní výrobci, s kterými byly nomogramy (Obr. 7.3) porovnávány, udávají pouze závislost externí rychlosti na geometrii vrat bez zohlednění konkrétního směru proudu clony. To může vést k následné chybě při volbě vzduchové clony. Při pohledu na přiložené nomogramy (Obr. 7.3) je vidět, že při porovnání hranice použitelnosti clony pro úhly $\alpha_0 = 0^\circ$ a $\alpha_0 = 30^\circ$ dochází ve všech případech clon (VIENTO A, B, C) k posunu hranice externí rychlosti zhruba o 0.3 m s^{-1} . Clona může být tedy pro dané parametry buď předdimenzována nebo v opačném případě může dojít k nedostatečné ochraně interního prostoru před externím prouděním. Oba tyto případy mají za následek zvýšení energetické náročnosti provozu v clonou chráněném objektu.

Obr. 7.3 - Nomogramy jednotlivých skupin clon VIENTO



8. ZÁVĚR

Celá práce byla rozdělena na dvě základní oblasti, které se od sebe lišily geometrií modelovaného prostoru.

V první části byl řešen model při možné infiltraci zadní stěnou místnosti. Pro každou clonu VIENTO A, B, C bylo vytvořeno 9 řad modelů lišících se základní geometrií, úhlem clony α_0 a výškou vrat h (viz str. 35, Tab. 5.2). Každá řada pak byla řešena v rozsahu externích rychlostí $u = 0 \div 5 \text{ m s}^{-1}$ ve skocích po 1 m s^{-1} , které se pro další zpřesnění účelně zmenšovaly. Pro každou řadu clony VIENTO bylo vytvořeno přibližně 12 modelů. Celkem cca 330 modelů jen pro tuto geometrii. Výpočet jednoho modelu probíhal zhruba v $7 \div 14$ iteracích, přičemž čas jedné iterace se pohyboval v intervalu $1 \div 2$ min. Čas výpočtu jednoho modelu probíhal v intervalu $8 \div 24$ min. Vše záleželo na velikosti modelu a velikosti externí rychlosti.

Na vyhodnocení clony VIENTO B byla aplikována tato jednotlivá kritéria, existence stagnačního bodu v oblasti vrat, existence určité (předem definované) rychlosti v centru chráněného prostoru a kritérium nazvané SOLID (toto kritérium je popsáno na str. 40 a 42). Optimální hranice použitelnosti clony VIENTO B2 stanovené zmíněnými kritérii jsou patrna z Tab. 5.4 str. 43 a Tab. 5.5 str. 44. Po zvážení všech okolností se jako nejoptimálnější jevílo kritérium nazvané SOLID, které bylo použito i pro clony VIENTO A a C. Výsledné hraniční rychlosti pro všechny clony jsou uvedeny v Tab. 5.5 str. 44.

V druhé části byly vytvořeny modely, které měly vést k modelování horší situace než v případě předchozím. V těchto modelech byla možná infiltrace zadní stěnou a stropním světlíkem. Hodnotícím kritériem zde bylo, na základě poznatků z první série modelů, také kritérium nazvané SOLID. Zde bylo vyhodnocení provedeno také z celkem cca 330 modelů. V tomto případě se potvrdilo očekávání méně příznivých hodnot hraničních rychlostí (viz. Tab. 5.6 str. 47). Porovnání výsledků obou modelů je na Obr. 5.12 str. 47, Obr. 5.13 a Obr. 5.14 na str. 48.

Tyto výsledky byly porovnány s experimentem, který je popsán v příloze P 6.1. Experimentální výsledky byly v dobré shodě s výsledky numerické simulace právě v případě modelu s infiltrací zadní stěnou a stropním světlíkem. Proto výsledky numerické simulace těchto modelů jsou zvoleny za určující kritérium pro volbu

vhodného typu jednotlivých clon VIENTO A, B, C. Na základě těchto hodnot byla sestavena základní orientační směrnice.

Orientační směrnice pro použitelnost jednotlivých typů vzduchových clon VIENTO A1, A2, A3 - VIENTO B1, B2, B3 resp. VIENTO C1, C2, C3 jsou uvedeny v příložených nomogramech (Obr. 7.3 str. 58). Zadávacími parametry je výška otvoru vrat a maximální externí rychlost v prostoru vrat při nenainstalované vzduchové cloně.

Hodnoty rychlostí výtokového proudu jsou vždy uvažovány pro nejvyšší výkonový stupeň vzduchové clony, pro nižší jednopodlažní místnosti (VIENTO A, B do 5m) a (VIENTO C max. do 10 m) s možností infiltrace avšak bez nucené aerace.

Komínový efekt nebo nucená ventilace stropem místnosti či stěnou proti vratům vyžaduje pro plnou funkčnost clon uvažovat s externím prouděním o 30 až 50 % nižším.

Z výsledků pro jednotlivé úhly α_0 plyne, že výhodnější je, když paprsek vzduchové clony směřuje proti proudu externího vzduchu. V těchto případech dochází k lepšímu využití hybnosti paprsku. Pro výstupní úhel $\alpha_0 = 15^\circ$ dochází ve srovnání s úhlem $\alpha_0 = 0^\circ$ ke zlepšení v průměru o 8.3 %. V případě $\alpha_0 = 30^\circ$ dochází ke zlepšení v průměru o 10.9 %. Rozdíl činí 2.6 %. Vzhledem k charakteru zástavby však v případě úhlu $\alpha_0 = 30^\circ$ může dojít vlivem externích podmínek snáze ke zborcení proudu vzduchové clony jak v případě, kdy $\alpha_0 = 15^\circ$. Proto úhel $\alpha_0 = 15^\circ$ je nejvýhodnějším případem směru výstupního vektoru rychlosti proudu vzduchové clony pro tento typ zástavby.

Numerická simulace se při řešení problému vzduchové clony ukázala jako dobrý doplněk optimalizace jejich návrhu. Obzvláště po porovnání s experimentálními výsledky. Nevýhodou této numerické simulace je však řešení problému pouze z hlediska proudění. Velice účelné by bylo provést tuto numerickou simulaci s využitím lepšího softwarového produktu, který by kontinuálně řešil současně s prouděním i sdílení tepla mezi oběma proudy a současně i difuzní přenos znečišťujících částic proudu.

Vzhledem k uvedené shodě s experimentem však vznikl prakticky využitelný prostředek pro konstruktéry a projektanty při návrhu vzduchových clon.

Na tuto práci se vzduchovými clonami by bylo vhodné v dalších krocích navázat :

a) – postavením experimentální trati pro standartní zkoušky

- b) – optimalizací výustky vzduchové clony a stupně turbulence
- c) – formou numerické simulace sledovat a optimalizovat vliv výstupního úhlu paprsku v závislosti na konstrukčním uspořádání prostoru před vzduchovou clonou (druh zástavby, ...)

Tyto kroky by mohli vést k dokonalému poznání vlivů okolních podmínek (vliv zástavby, umístění vratové clony, geometrie lamel a výustky, interní geometrie vratové clony před výustkou) na charakter a kvalitu proudu vzduchové clony. Následkem toho by mohlo dojít ještě k dalším zlepšením kvality vratových clon a také k tvorbě ještě kvalitnějších podkladů a doporučení pro konstruktéry a projektanty, kteří s vratovými clonami budou pracovat.

Literatura :

- [1] *Abramovič, G. N.* : Teorija turbulentnych struj. Moskva 1960
- [2] *Hughes, T. J. R. – Brooks, A. – Liu, W. K.* : Finite Element Analysis of Incompressible Viscous Flows by the Penalty Function Formulation. Journal of Computation Physics 30 1979 (str. 1÷60)
- [3] *Chyský, J. - Hemzal, K. a kol.* : Větrání a klimatizace, TP 31, ČMT Praha 1993
- [4] *Lojčanskij, L. G.* : Mechanika kapalin a plynů I a II. SNTL Praha 1954
- [5] *Schlichting, H.* : Teorija pograničnogo sloja (překlad z němčiny). Moskva 1956
- [6] Firemní literatura GEA
- [7] *Taliev, V. N.* : Aerodinamika ventiljácii. Moskva 1979
- [8] Firemní listy, Algor-Fluid Flow. Pittsburgh 1992

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



FAKULTA STROJNÍ

OBOR 23-17-8

Konstrukce strojů a zařízení

zaměření

Tepelná technika

Katedra energetických zařízení

PŘÍLOHA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Numerická simulace aerodynamiky vzduchových clon

Pavel Václavík

Liberec 1998

OBSAH PŘÍLOHY

	strana
P 1.1 ÷ P 1.9 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2	
P 1.1 ÷ P 1.3 - clona VIENTO B2 - $\alpha_0 = 0^\circ$	1 ÷ 3
P 1.4 ÷ P 1.6 - clona VIENTO B2 - $\alpha_0 = 15^\circ$	4 ÷ 6
P 1.7 ÷ P 1.9 - clona VIENTO B2 - $\alpha_0 = 30^\circ$	7 ÷ 9
P 2.1 ÷ P 2.9 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2	
P 2.1 ÷ P 2.3 - clona VIENTO B2 - $\alpha_0 = 0^\circ$	10 ÷ 12
P 2.4 ÷ P 2.6 - clona VIENTO B2 - $\alpha_0 = 15^\circ$	13 ÷ 15
P 2.7 ÷ P 2.9 - clona VIENTO B2 - $\alpha_0 = 30^\circ$	16 ÷ 18
P 1.10 – legenda jemných kontur rychlostních polí	19
P 2.10 – legenda ostrých kontur rychlostních polí	19
P 3.1 ÷ P 3.3 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly	
pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 0^\circ$	20 ÷ 22
P 4.1 ÷ P 4.3 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly	
pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 15^\circ$	23 ÷ 25
P 5.1 ÷ P 5.3 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly	
pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 30^\circ$	26 ÷ 28
P 6.1 ÷ P 6.5 - Popis experimentu a jeho výsledky	
P 6.1 - Popis experimentálního měření clony VIENTO B3	29
P 6.2 - Naměřené hodnoty clony VIENTO B3 - <i>Případ 1</i>	30
P 6.3 - Naměřené hodnoty clony VIENTO B3 - <i>Případ 2</i>	31
P 6.4 - Profily rychlostí a teploty v jednotlivých průřezech - <i>Případ 1</i>	32
P 6.5 - Profily rychlostí a teploty v jednotlivých průřezech - <i>Případ 2</i>	33

P 1.1 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 0^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.2$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_0)



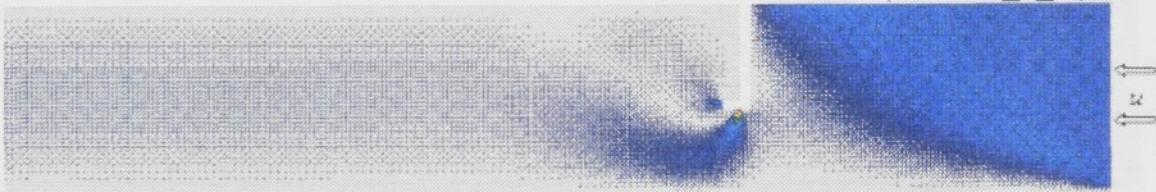
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_1)



$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_2)



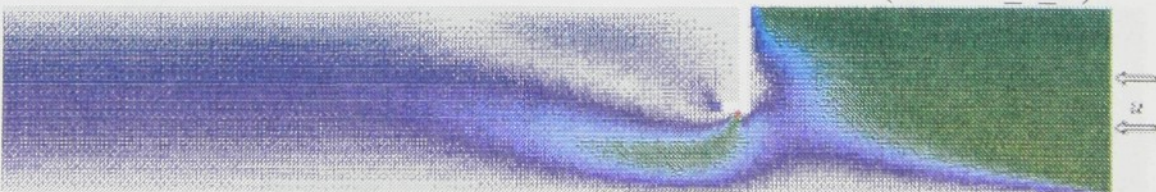
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_3)



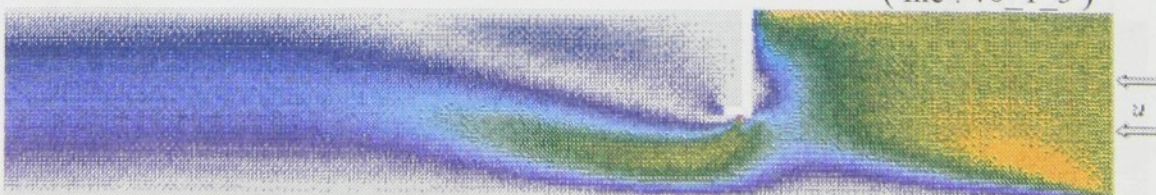
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_5)



P 1.2 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 0^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.5$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_0)



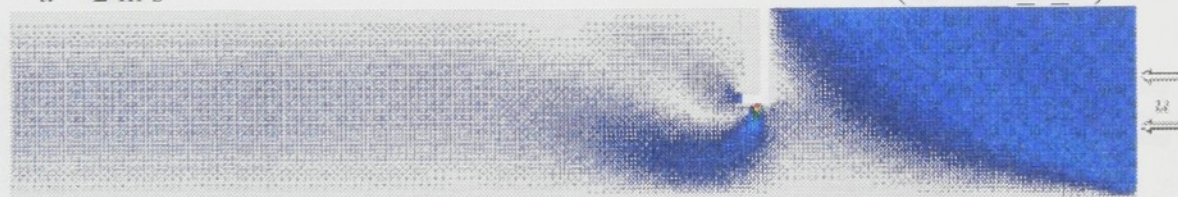
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_1)



$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_2)



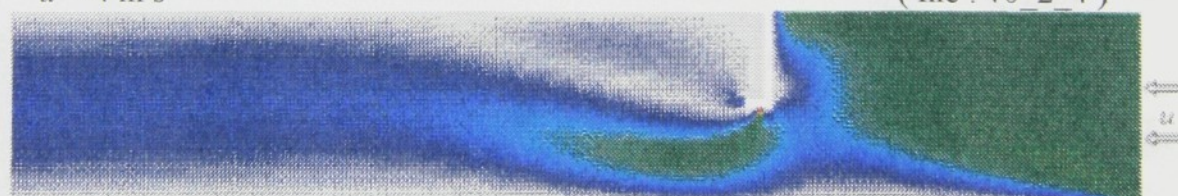
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_3)



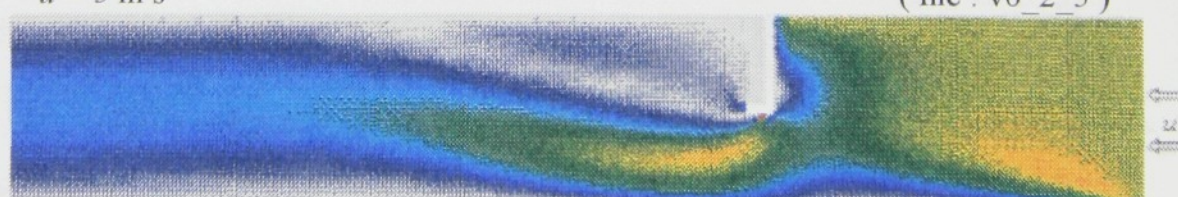
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_5)



P 1.3 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 0^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 3$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_0)



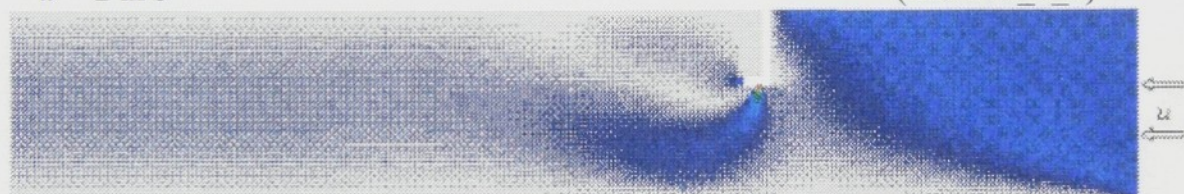
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_1)



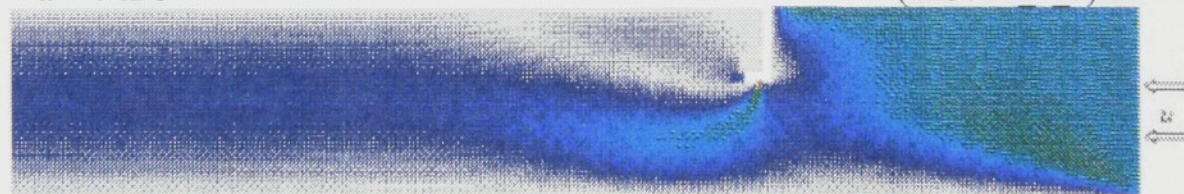
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_2)



$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_3)



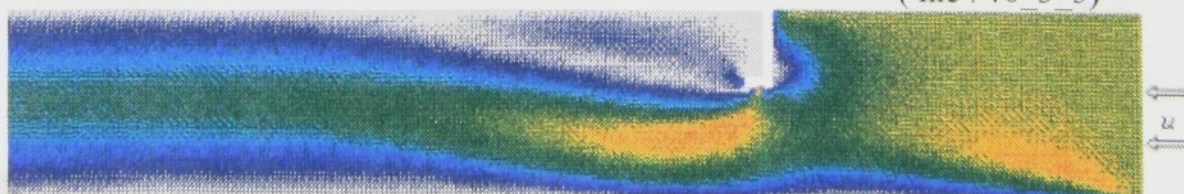
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_5)



P 1.4 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 15^\circ$
rychlost externího větru u - vždy z pravé strany
výška vrat $h = 2.2$ m

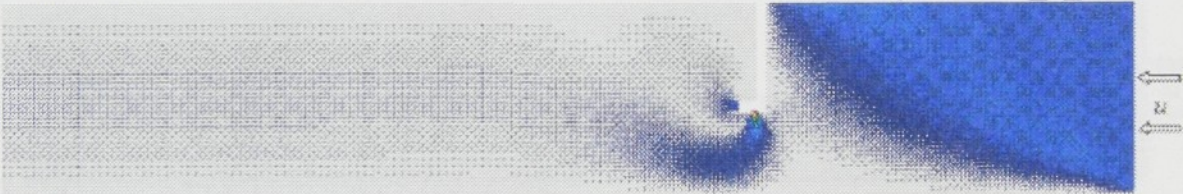
$u = 0 \text{ m s}^{-1}$ (file : v15_1_0)



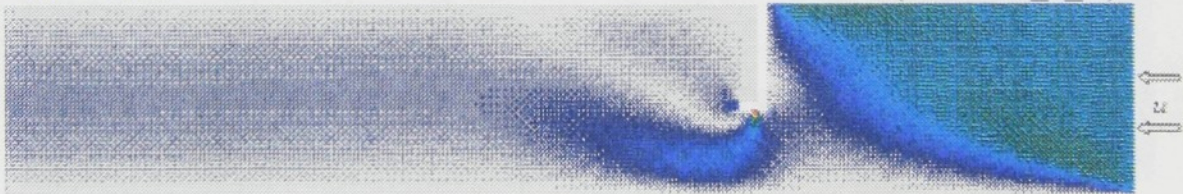
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$ (file : v15_1_1)



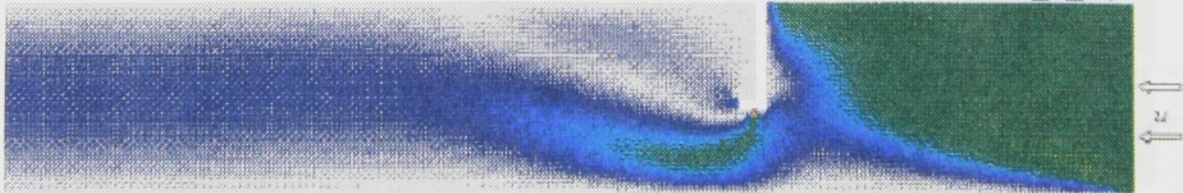
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$ (file : v15_1_2)



$u = 3 \text{ m s}^{-1}$ (file : v15_1_3)



$u = 4 \text{ m s}^{-1}$ (file : v15_1_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$ (file : v15_1_5)



P 1.5 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry: úhel výtoku $\alpha = 15^\circ$
rychlost externího větru u - vždy z pravé strany
výška vrat $h = 2.5$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_0)



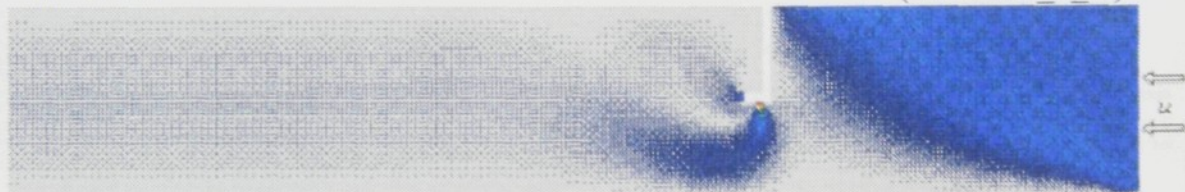
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_1)



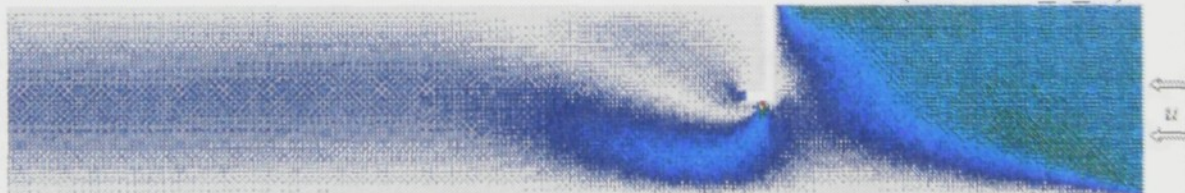
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_2)



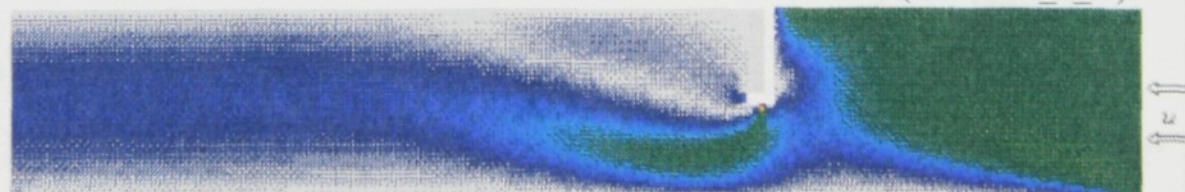
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_3)



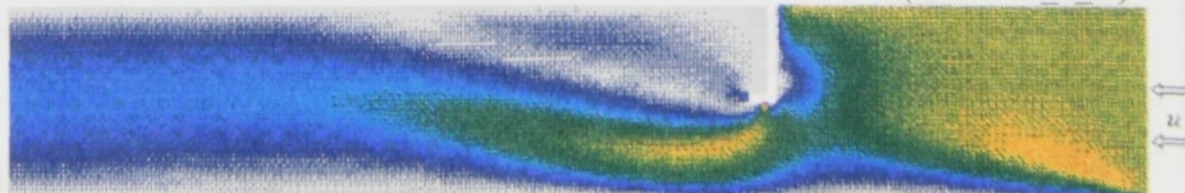
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_5)



P 1.6 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 15^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 3$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_0)



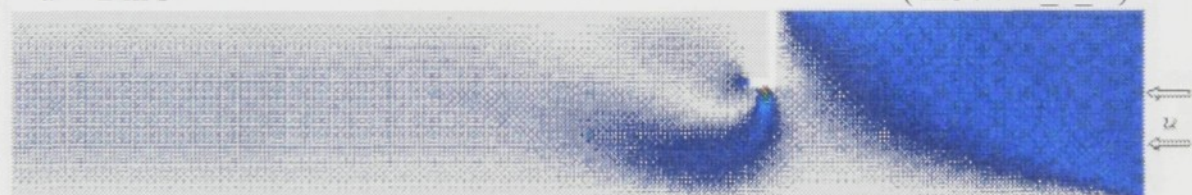
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_1)



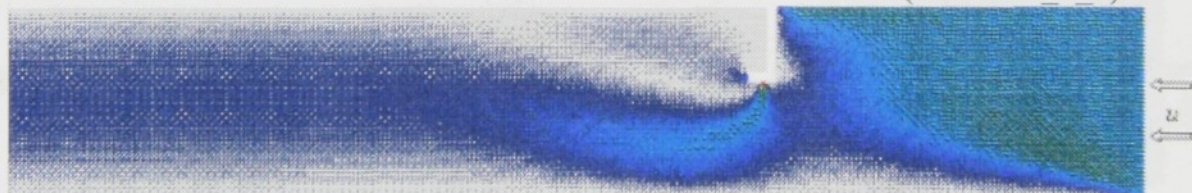
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_2)



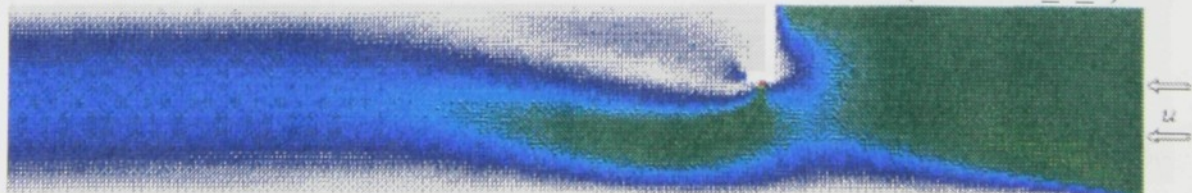
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_3)



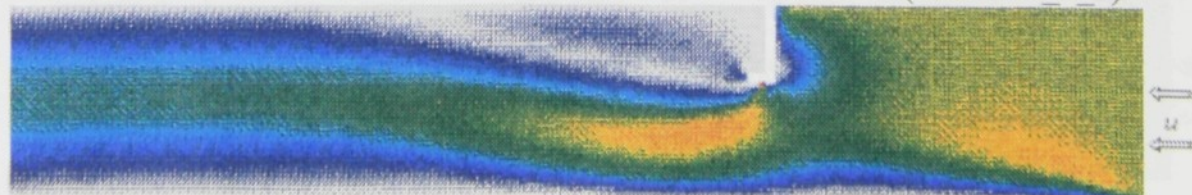
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_5)



P 1.7 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 30^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.2$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_1)



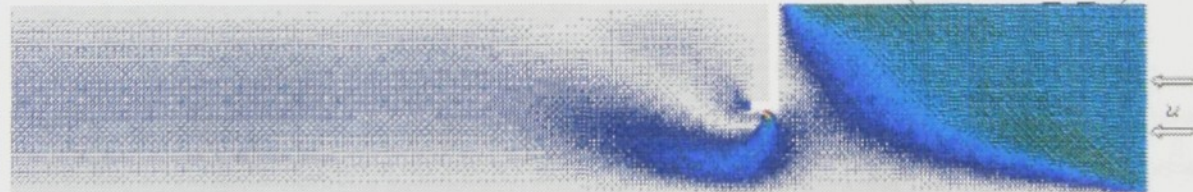
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_2)



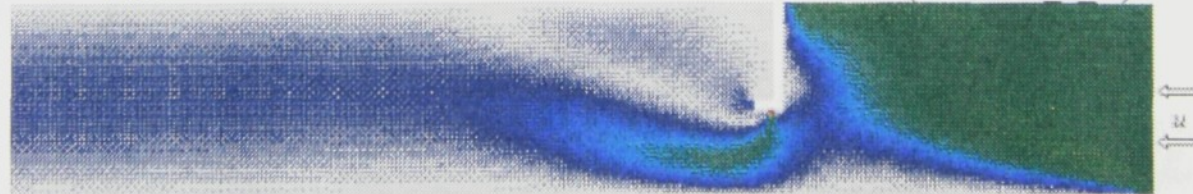
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_3)



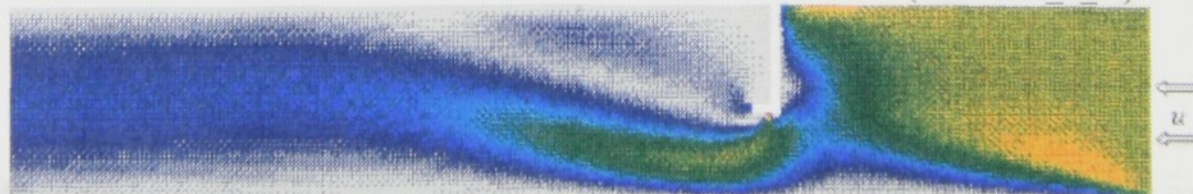
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_5)



P 1.8 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 30^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.5$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_2_0)



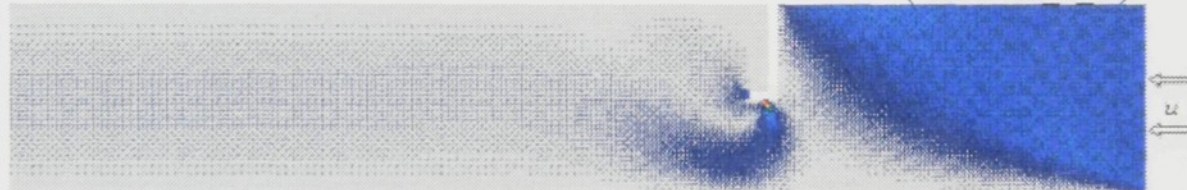
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_2_1)



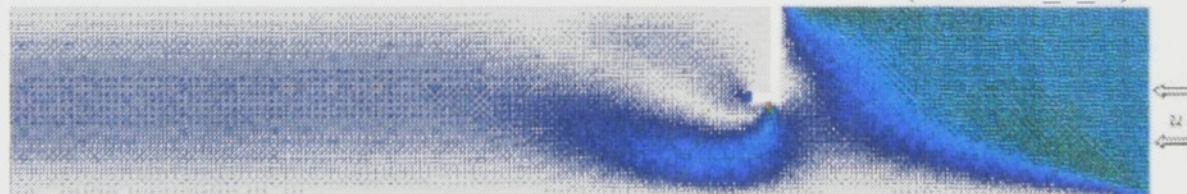
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_2_2)



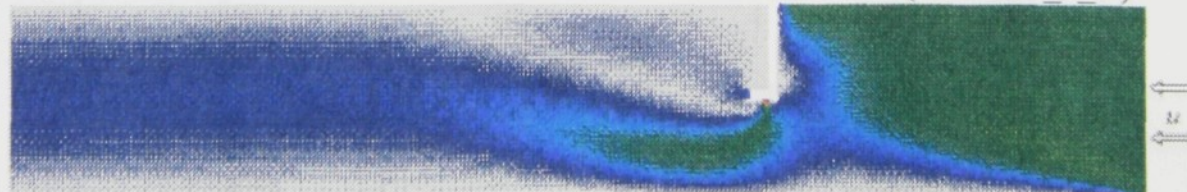
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_2_3)



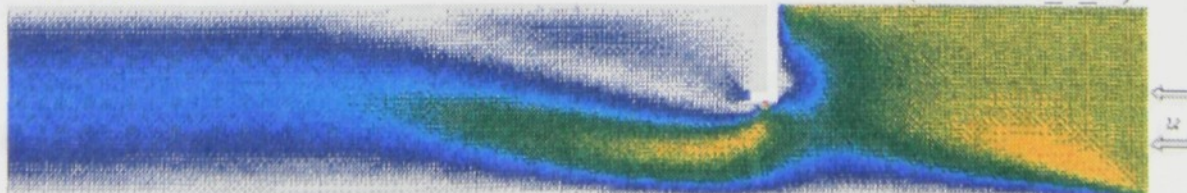
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_2_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_2_5)



P 1.9 - Jemné kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 30^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 3$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_0)



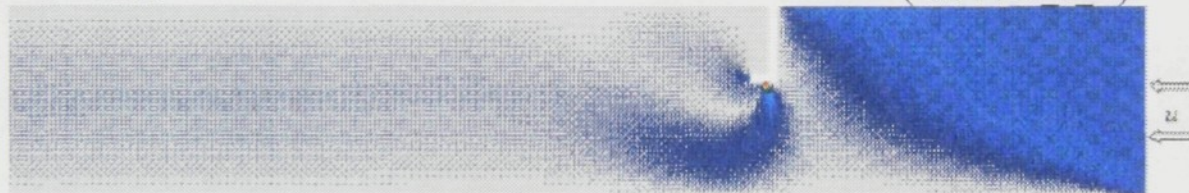
$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_1)



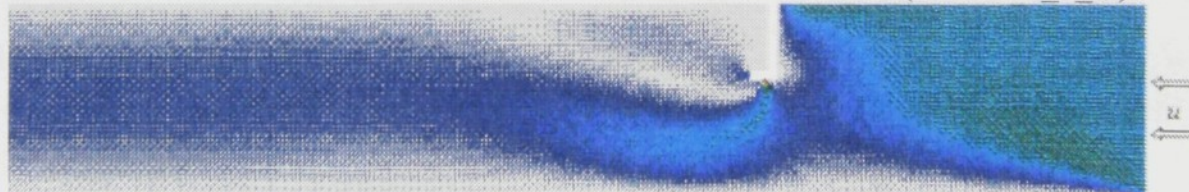
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_2)



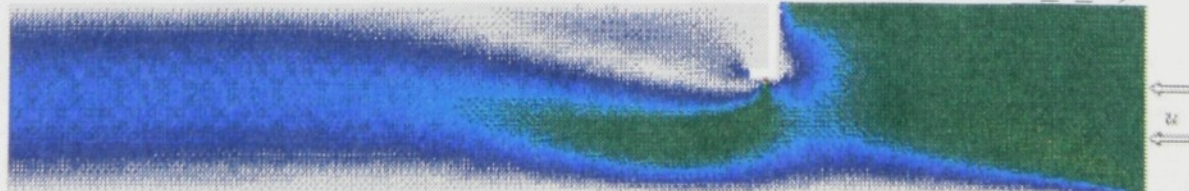
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_3)



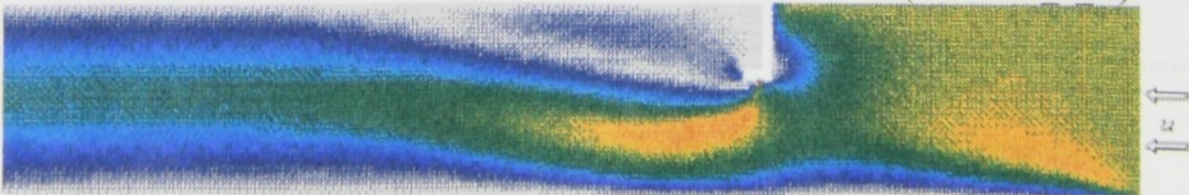
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_5)



P 2.1 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

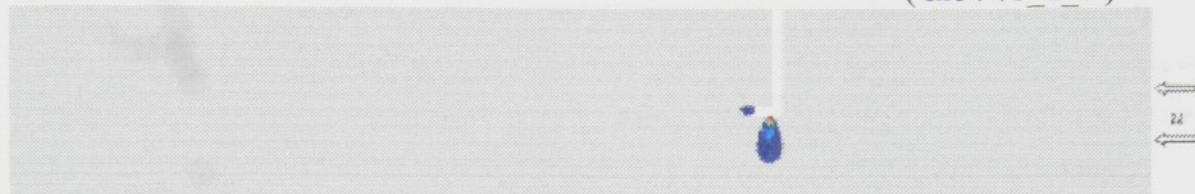
Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 0^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.2$ m

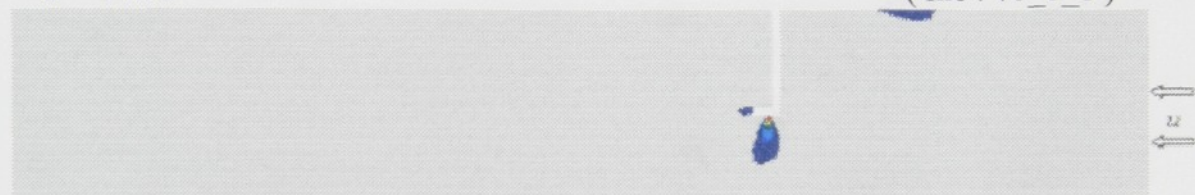
$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_1)



$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_2)



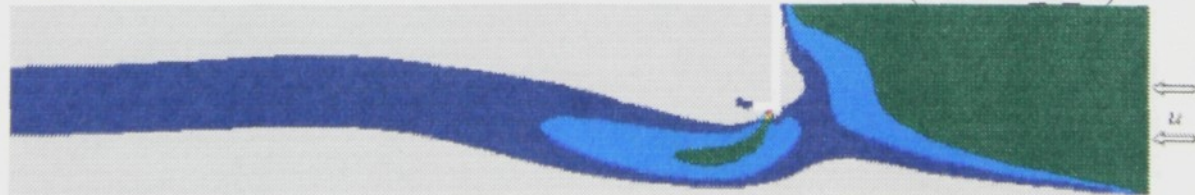
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_3)



$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_1_5)



P 2.2 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

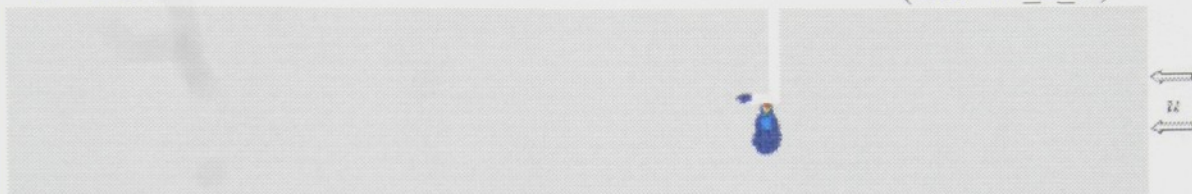
Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 0^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.5$ m

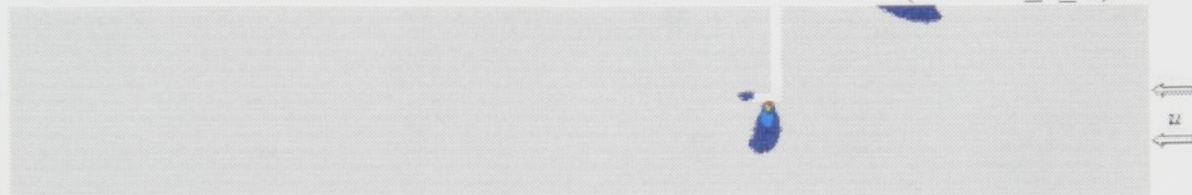
$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_1)



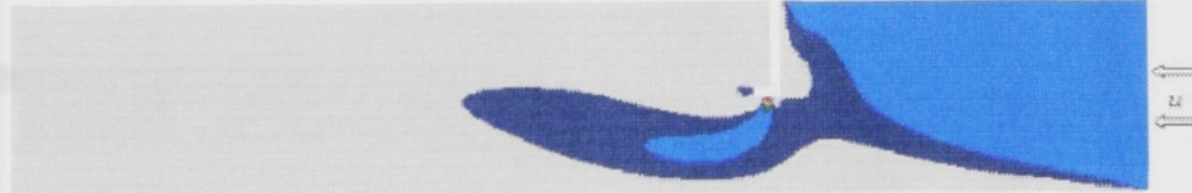
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_2)



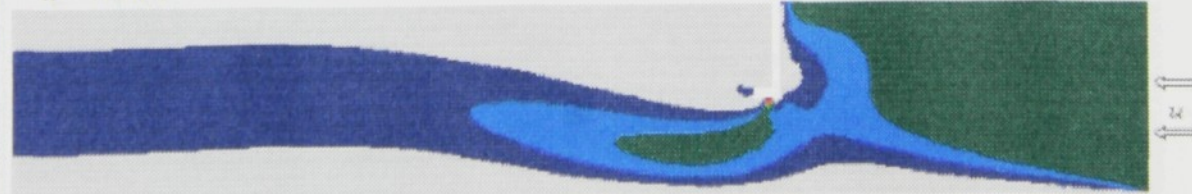
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_3)



$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_2_5)



P 2.3 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 0^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 3$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_1)



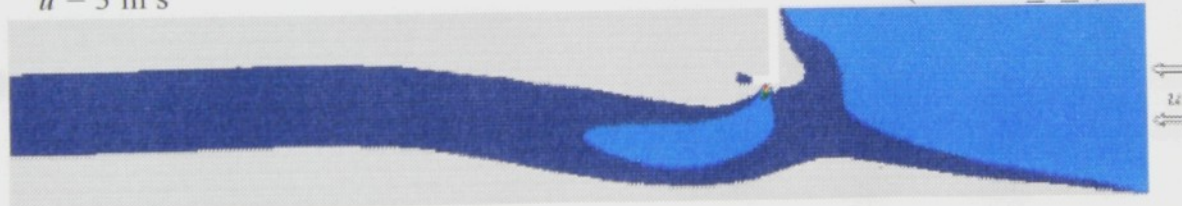
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_2)



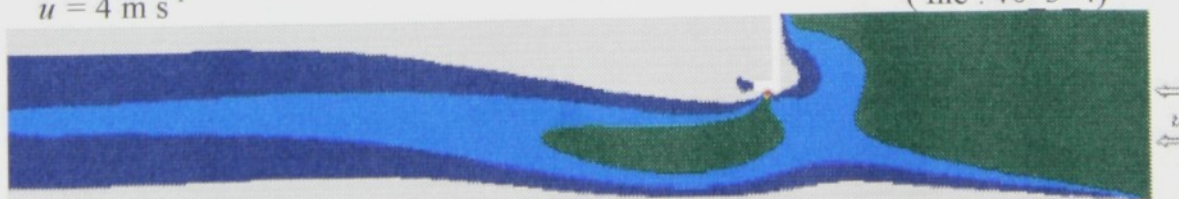
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_3)



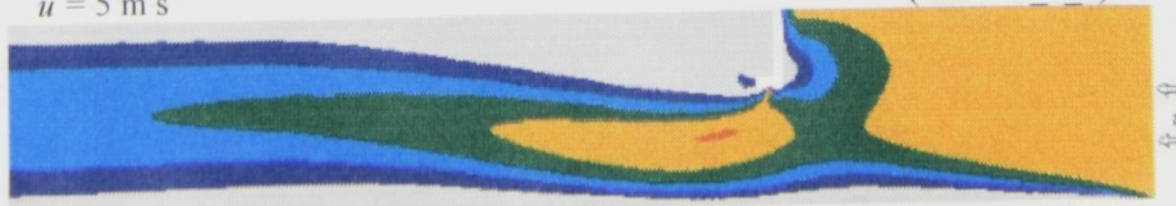
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_4)



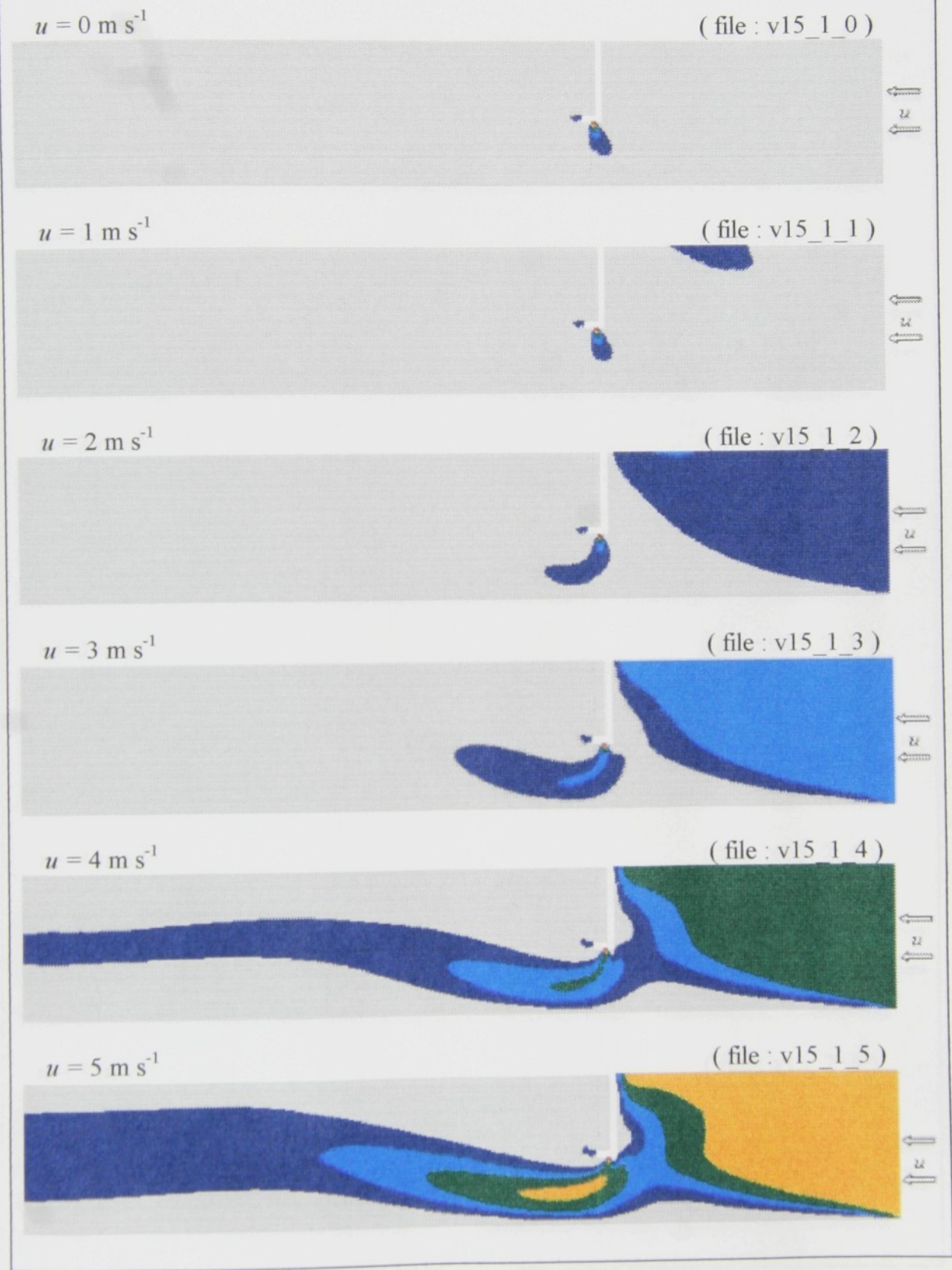
$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v0_3_5)



P 2.4 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 15^\circ$
rychlost externího větru u - vždy z pravé strany
výška vrat $h = 2.2$ m



P 2.5 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

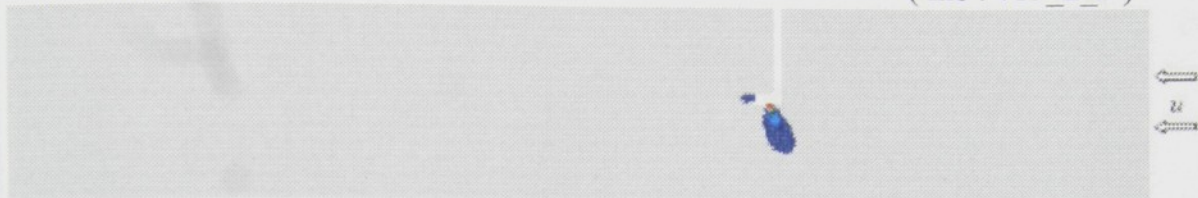
Základní parametry: úhel výtoku $\alpha = 15^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.5$ m

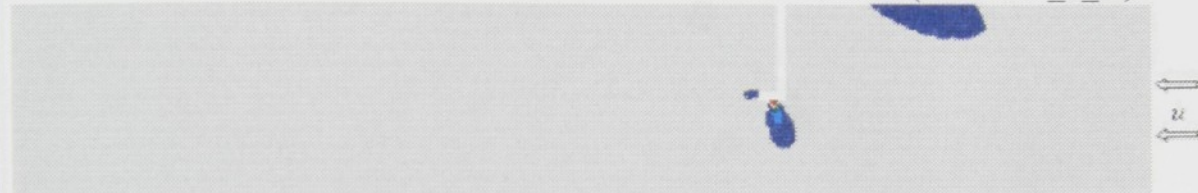
$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_1)



$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_2)



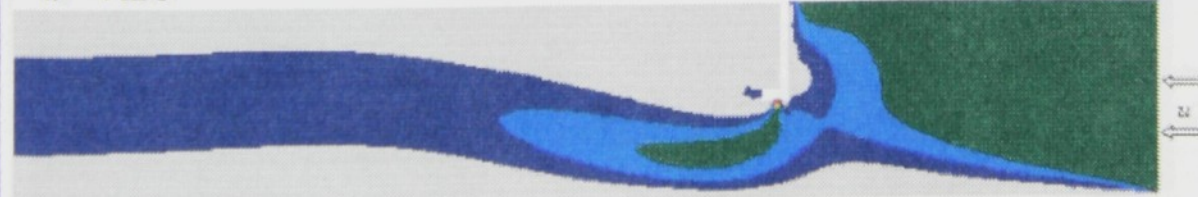
$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_3)



$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_2_5)



P 2.6 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

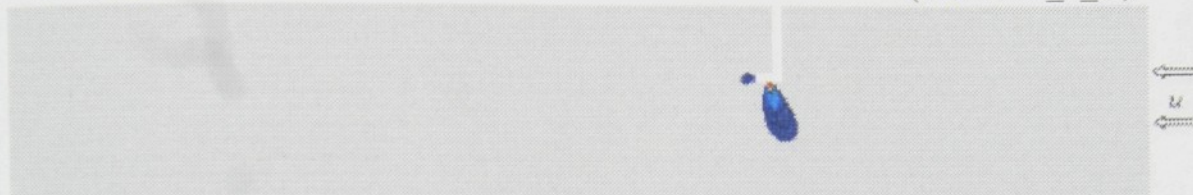
Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 15^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 3$ m

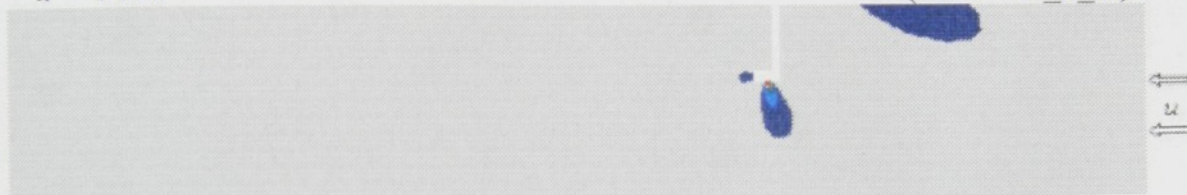
$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_1)



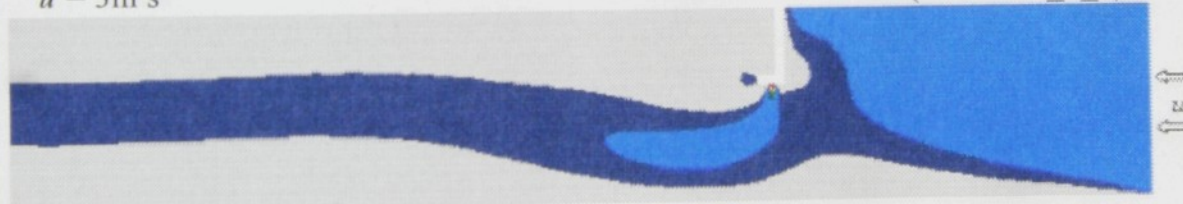
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_2)



$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_3)



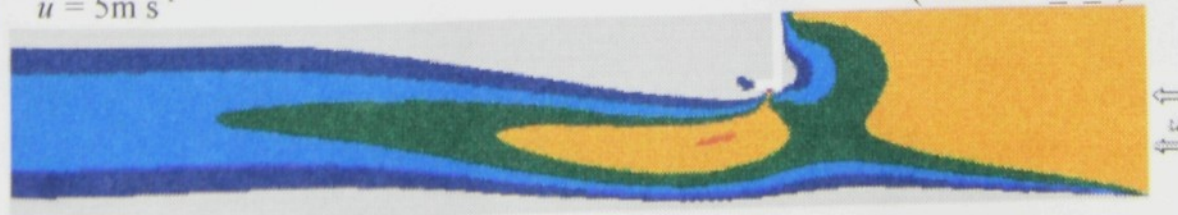
$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v15_3_5)



P 2.7 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 30^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 2.2$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_1)



$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_2)



$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_3)



$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_1_5)



P 2.8 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 30^\circ$
rychlost externího větru u - vždy z pravé strany
výška vrat $h = 2.5$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$ (file : v30_2_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$ (file : v30_2_1)



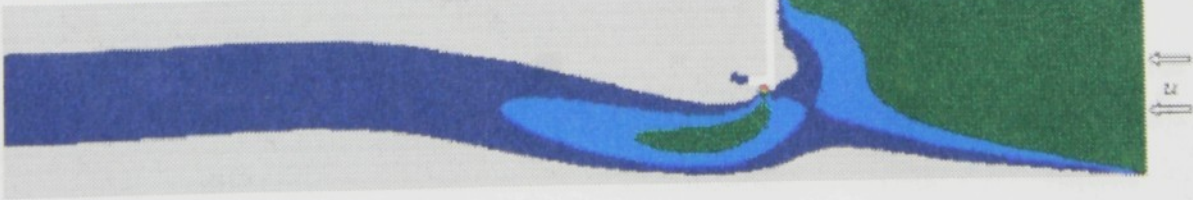
$u = 2 \text{ m s}^{-1}$ (file : v30_2_2)



$u = 3 \text{ m s}^{-1}$ (file : v30_2_3)



$u = 4 \text{ m s}^{-1}$ (file : v30_2_4)



$u = 5 \text{ m s}^{-1}$ (file : v30_2_5)



P 2.9 - Ostré kontury rychlostního pole clony VIENTO B2

Základní parametry : úhel výtoku $\alpha = 30^\circ$

rychlost externího větru u - vždy z pravé strany

výška vrat $h = 3$ m

$u = 0 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_0)



$u = 1 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_1)



$u = 2 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_2)



$u = 3 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_3)



$u = 4 \text{ m s}^{-1}$

(file : v30_3_4)

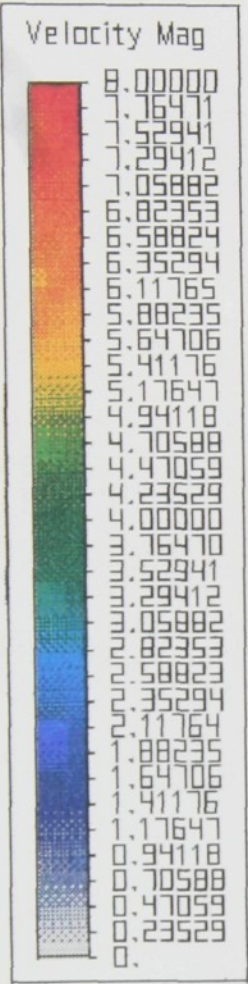


$u = 5 \text{ m s}^{-1}$

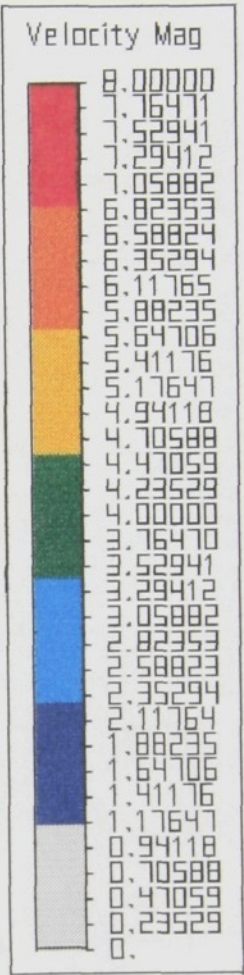
(file : v30_3_5)



P 1.10 -Legenda pro jemné kontury
rychlostních polí

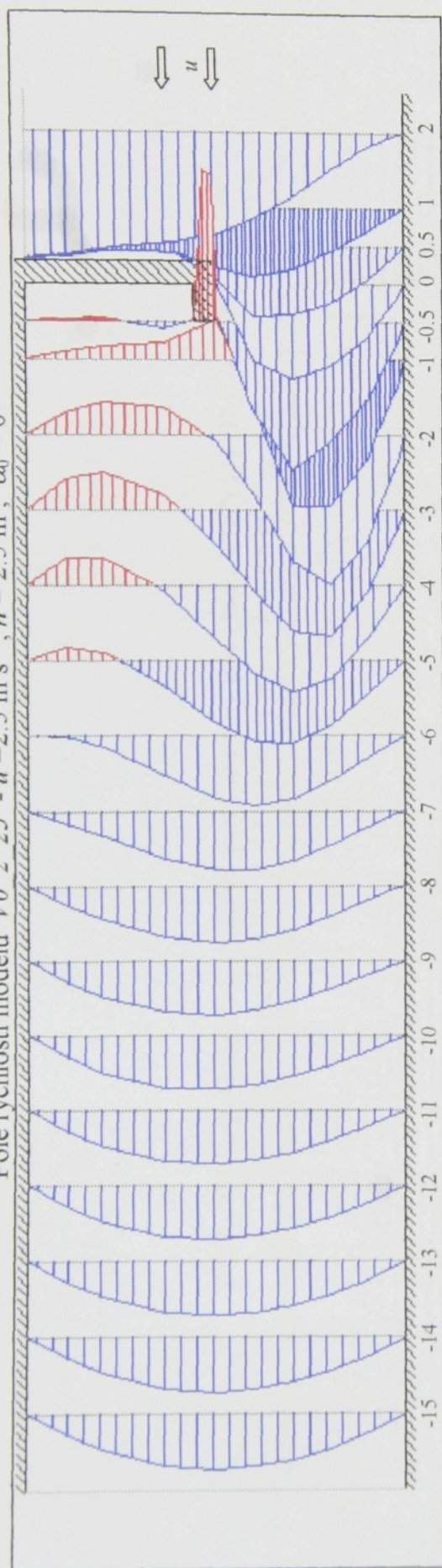


P 2.10 - Legenda pro ostré kontury
rychlostních polí

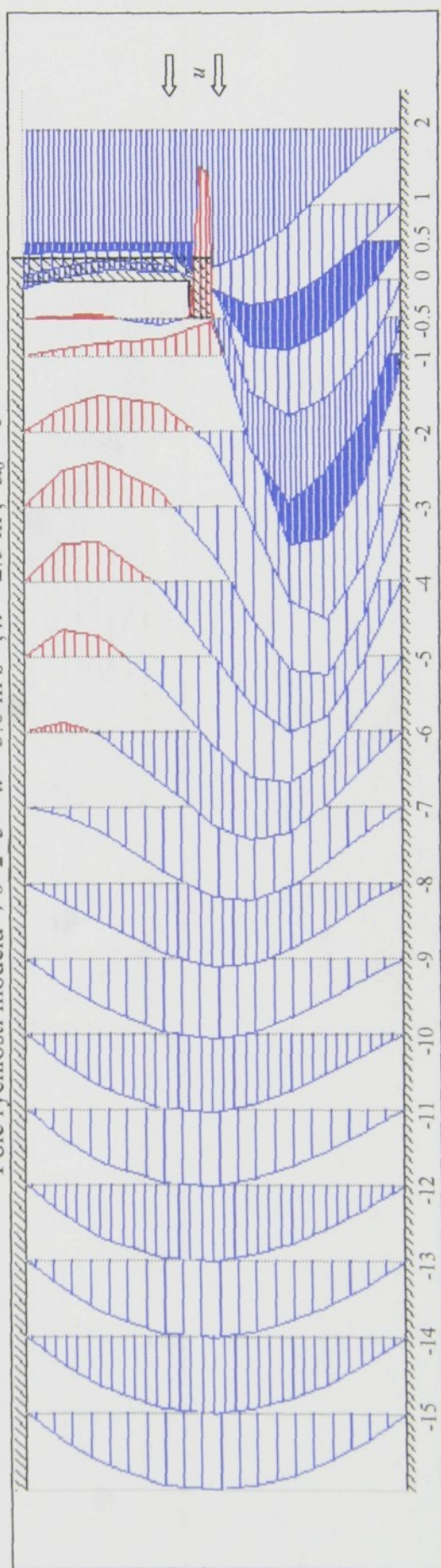


P 3.2 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 0^\circ$

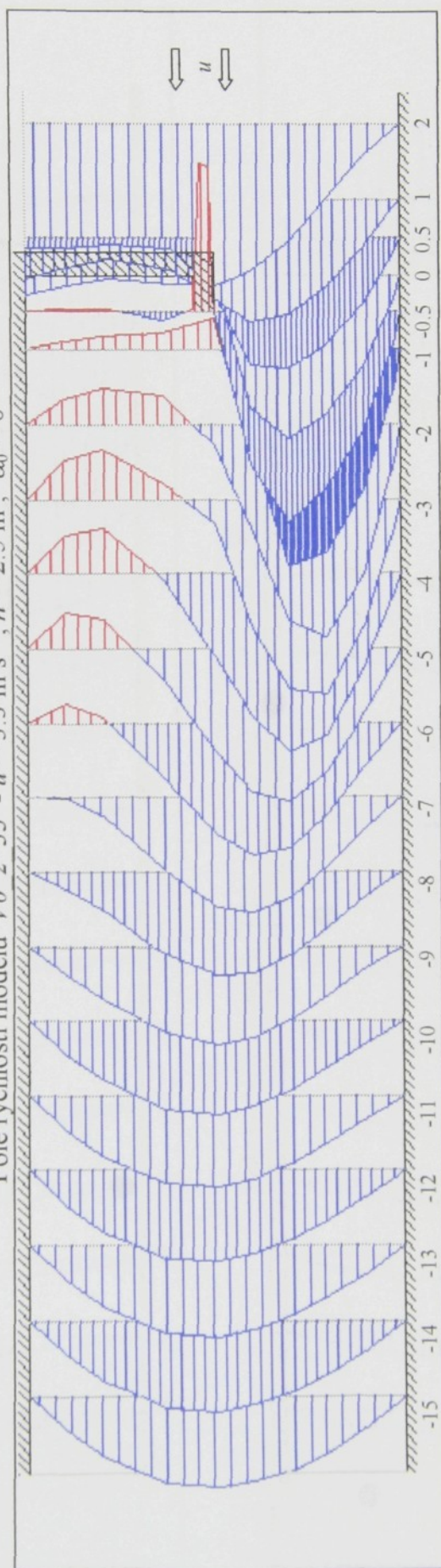
Pole rychlostí modelu $V/0 \ 2 \ 25 - u = 2.5 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 0^\circ$



Pole rychlostí modelu $V/0 \ 2 \ 3 - u = 3.0 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 0^\circ$

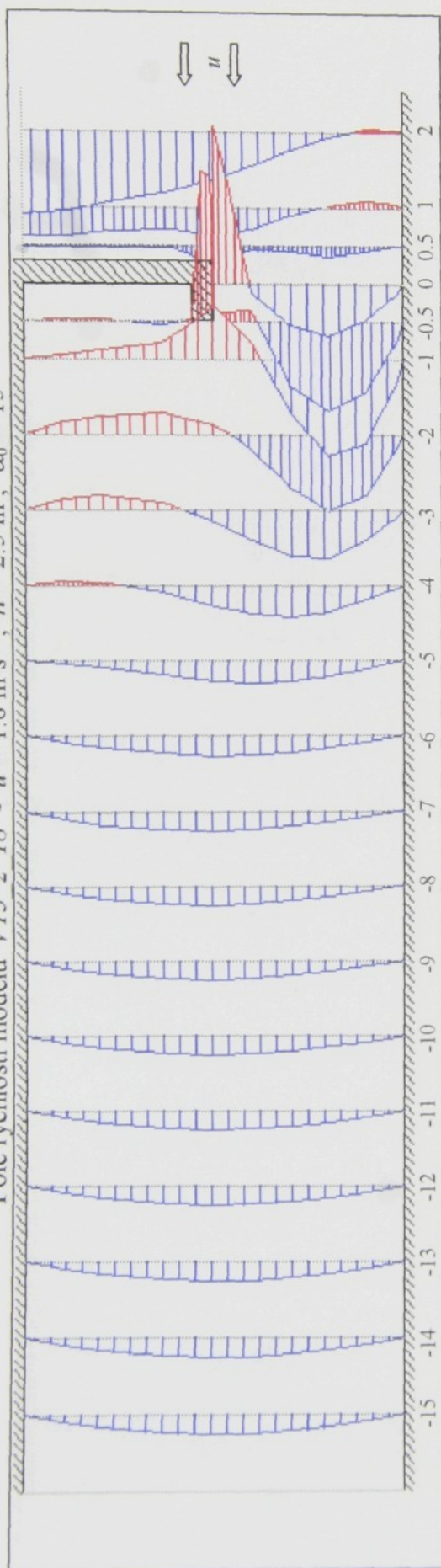


P 3.3 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 0^\circ$
 Pole rychlosti modelu $V/0 \ 2 \ 33 \ - u = 3.3 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 0^\circ$

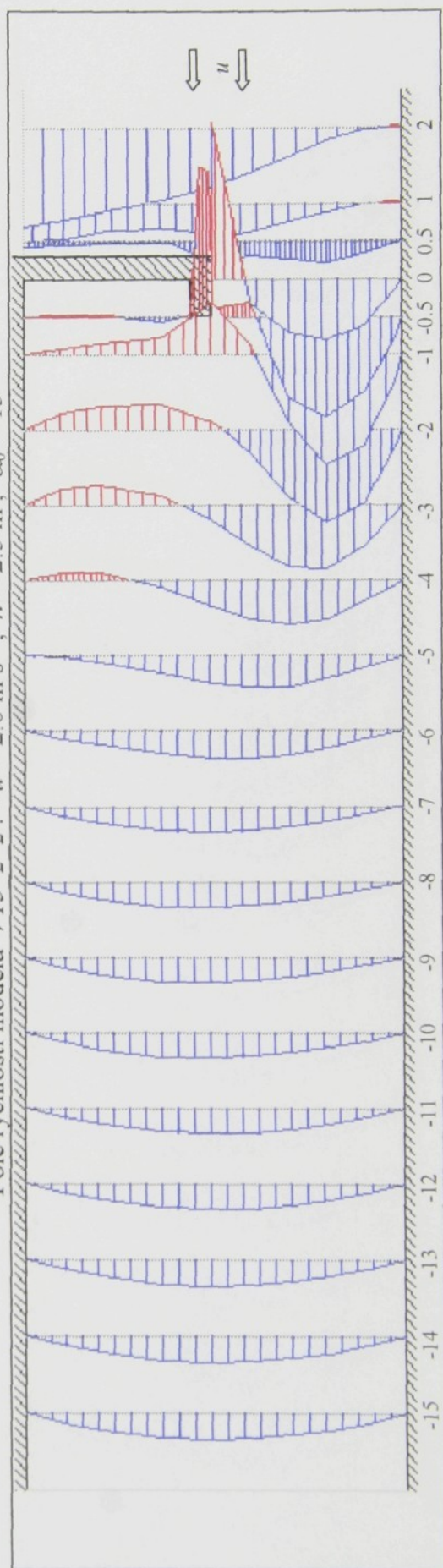


P 4.1 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru hály pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 15^\circ$

Pole rychlostí modelu V15 2 18 - $u = 1.8 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$

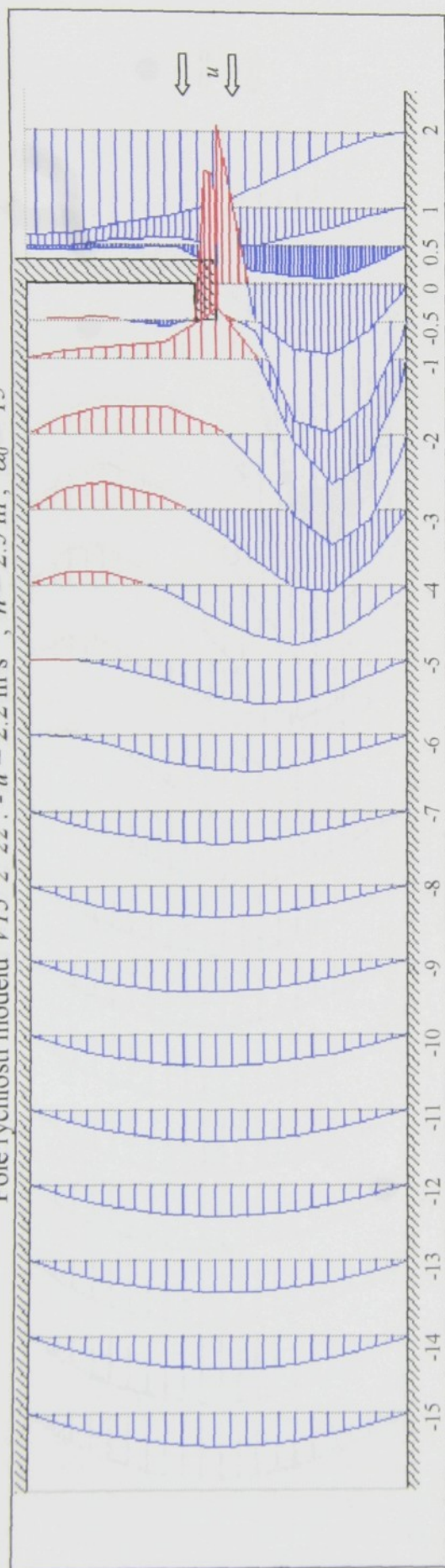


Pole rychlostí modelu V15 2 2 - $u = 2.0 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$

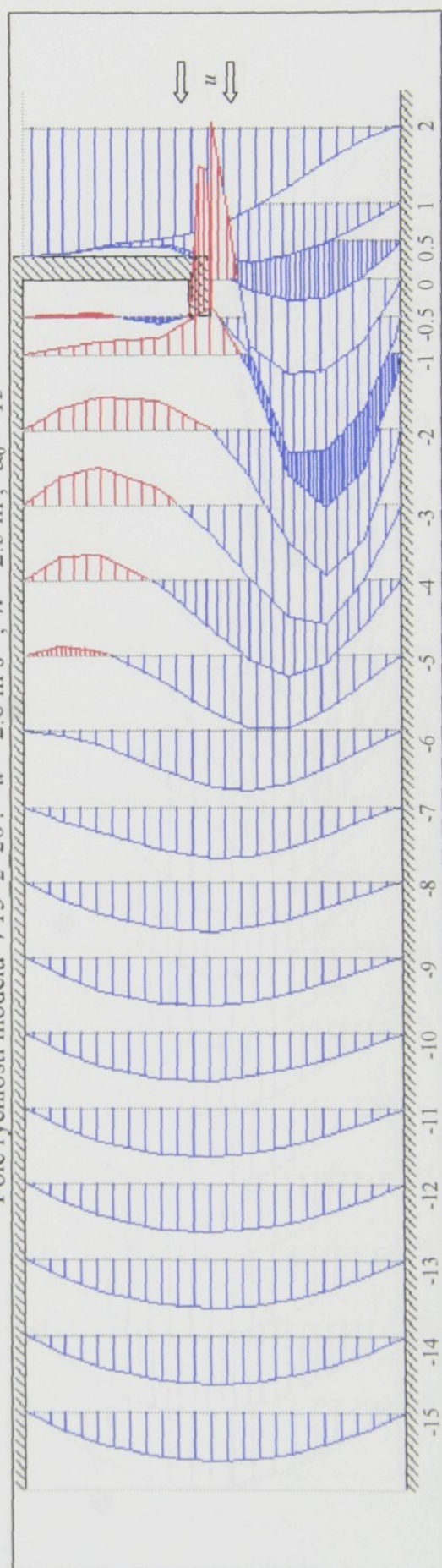


P 4.2 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 15^\circ$

Pole rychlostí modelu $V15 \ 2 \ 22$, $-u = 2.2 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$

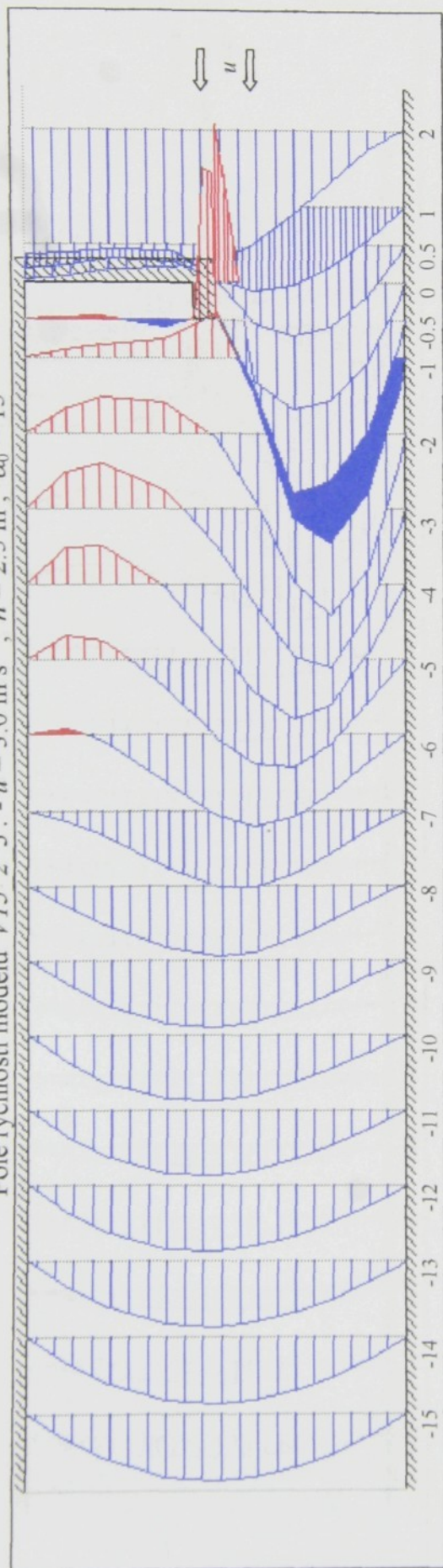


Pole rychlostí modelu $V15 \ 2 \ 26$, $-u = 2.6 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$

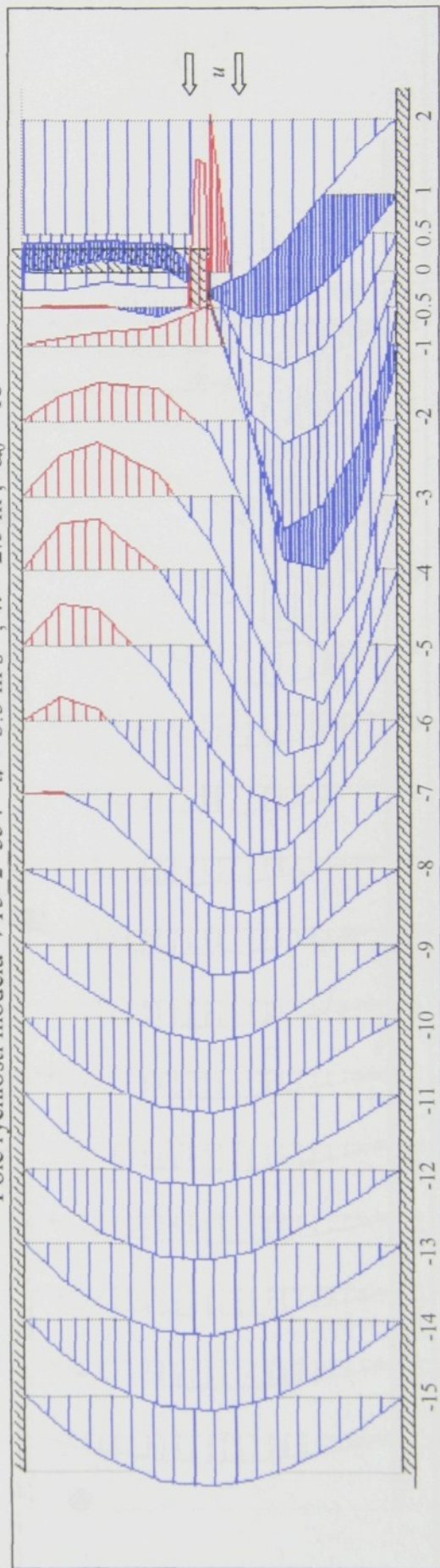


P 4.3 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru hały pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 15^\circ$

Pole rychlostí modelu V/15 2 3. - $u = 3.0 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$

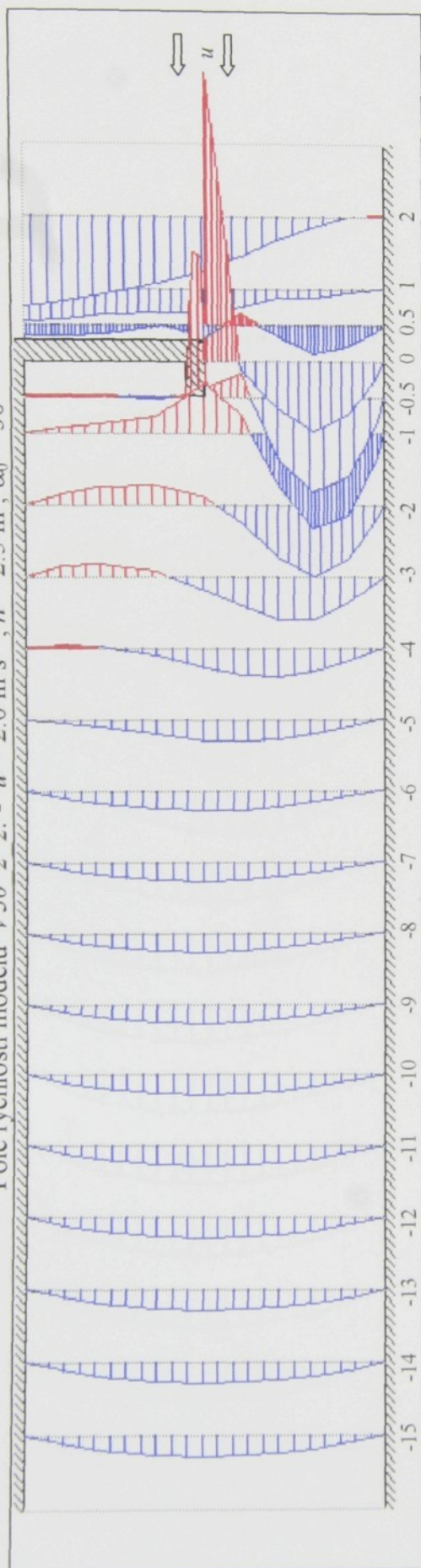


Pole rychlostí modelu V/15 2 35. - $u = 3.5 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 15^\circ$

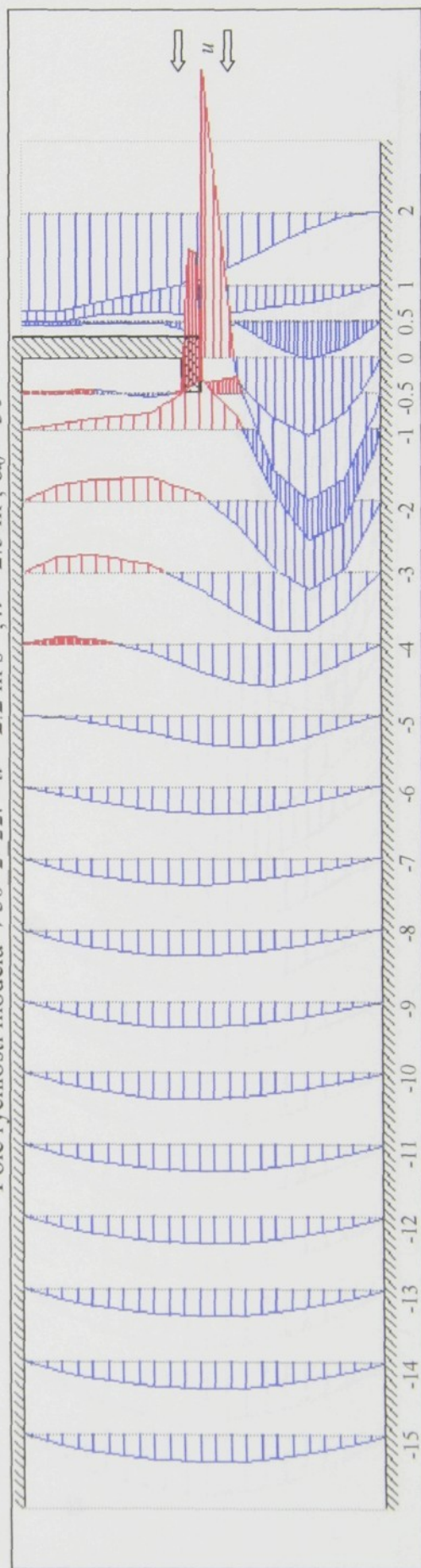


P 5.1 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 30^\circ$

Pole rychlostí modelu V30 2 2. - $u = 2.0 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 30^\circ$

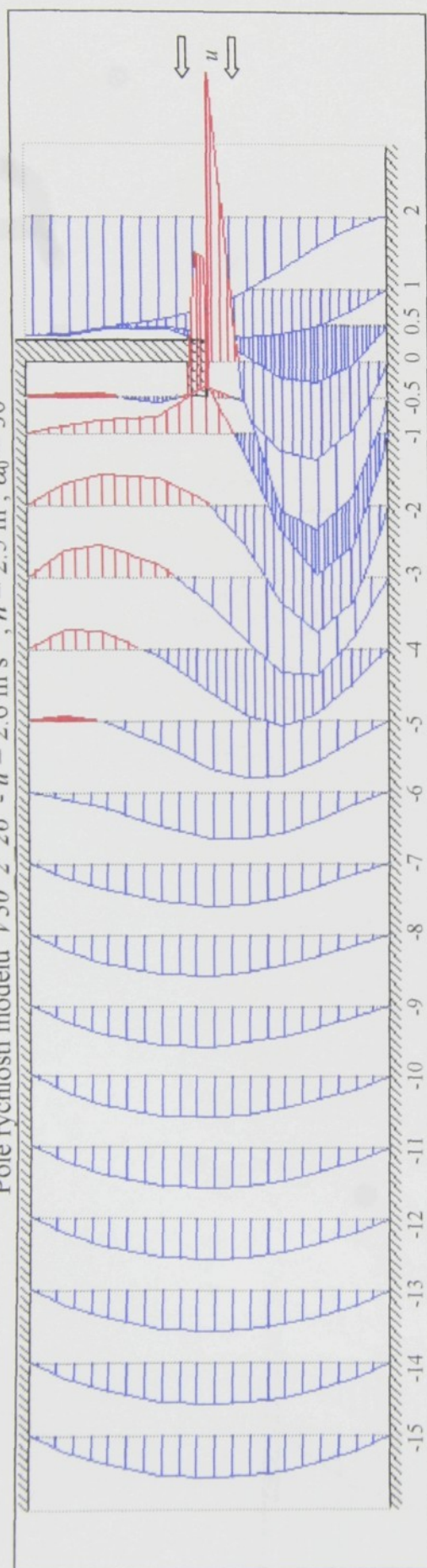


Pole rychlostí modelu V30 2 22. - $u = 2.2 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 30^\circ$

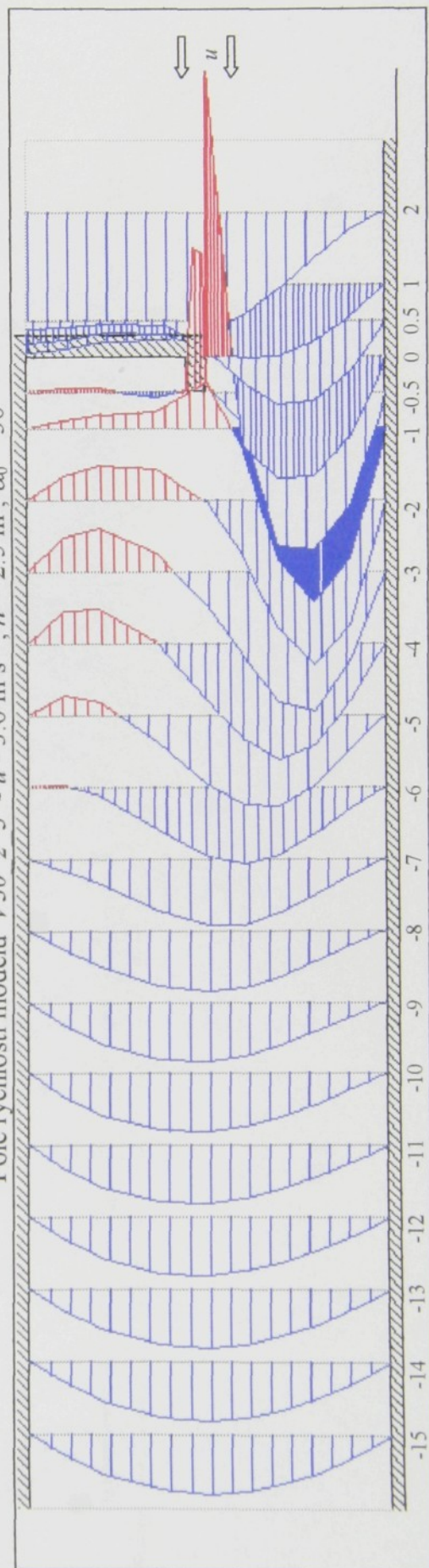


P 5.2 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 30^\circ$

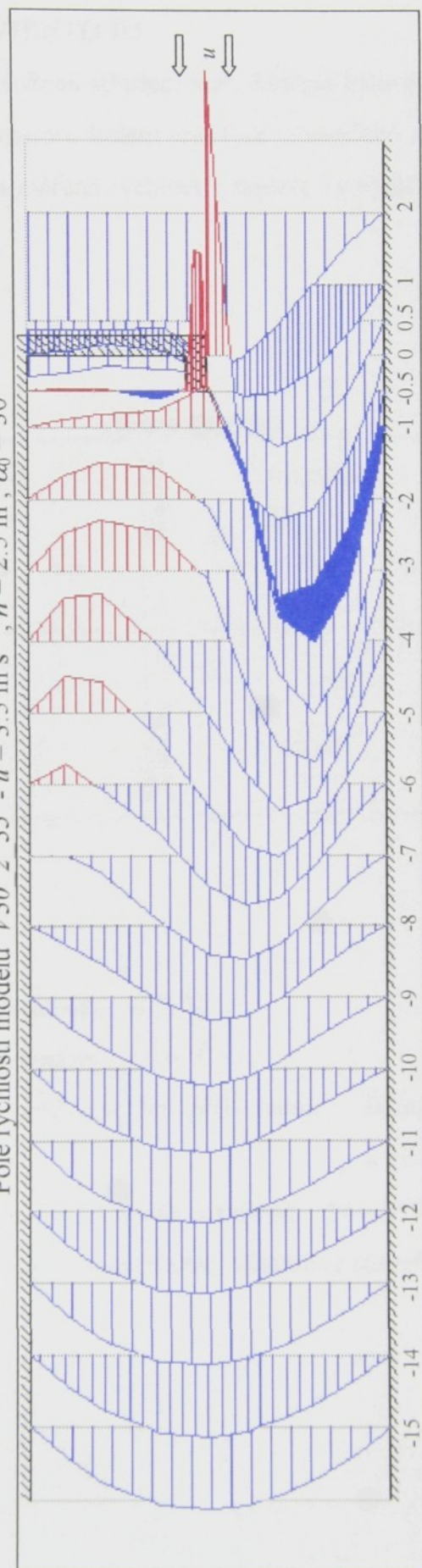
Pole rychlostí modelu $V30 \ 2 \ 26 \ - u = 2.6 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 30^\circ$



Pole rychlostí modelu $V30 \ 2 \ 3 \ - u = 3.0 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 30^\circ$



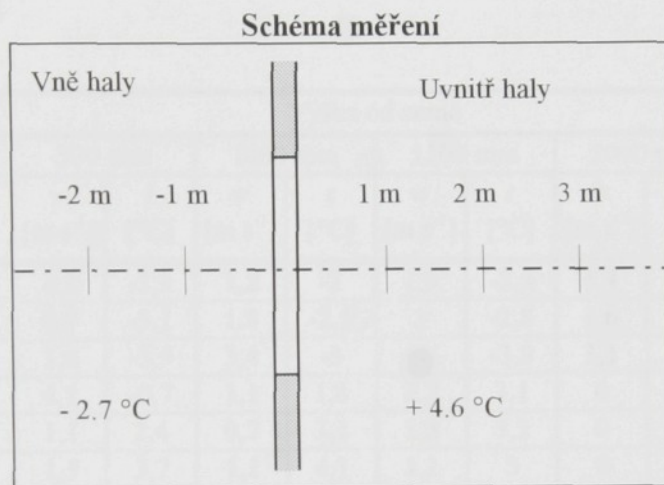
P 5.3 - Vývoj rychlostních profilů v prostoru haly pro clonu VIENTO B2 - $\alpha_0 = 30^\circ$
Pole rychlostí modelu $V30 \ 2 \ 35 - u = 3.5 \text{ m s}^{-1}$; $h = 2.5 \text{ m}$; $\alpha_0 = 30^\circ$



P 6.1 - Popis experimentálního měření clony VIENTO B3

Měření vzduchové clony VIENTO B3

Osa měření byla proložena středem vrat. Měření bylo prováděno v místech -2m, -1m, 0m, 1m, 2m a 3m v prostoru kolem vrat (jak je uvedeno na přiloženém schématu). V každém tomto místě byla měřena rychlost a teplota ve výškách 50, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 mm od země.



Podmínky měření : externí teplota : -2.7 °C

interní teplota : +4.6 °C

vnější vítr cca 5m před halou: šikmý nárazový proti dveřím

$$u = 2.7 \div 3.8 \text{ m s}^{-1}$$

teplotní spád vzduchu na cloně : $\Delta t \approx 3 \div 4 \text{ °C}$

chod clony na maximální výkonový stupeň

P 6.2 - Naměřené hodnoty clony VIENTO B3 - Příklad 1

Výsledky měření

Případ 1) - Ve stropu haly otevřeno 15 světlíků rozměru cca 1.5 × 2 m. Krajiní dveře v bočních stěnách otevřeny, vstupní dveře zavřeny.

podtlak v hale při otevřených dveřích cca (8÷10) Pa

podtlak v hale při zavřených dveřích cca 13 Pa

1a - clona v klidu (Tab. 1a) 1b - clona v chodu (Tab. 1b)

Tab. 1a.

Vzdál. od dveří [m]	Výška od země											
	50 mm		500 mm		1000 mm		1500 mm		2000 mm		2400 mm	
	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]
-2	1,1	-2	2,2	-1,3	1,2	-2	1,9	-2,5	1,4	-2,9	1	-0,7
-1	0,4	-3	0,9	-3,1	1,8	-2,5	3	-2,8	1,6	-2,7	1,5	-2,8
0	2,2	-2,1	1,6	-3,5	3,4	-3	4	-3,9	3,1	-3,3	3,1	-3,1
1	3,9	-1,7	4,1	-0,7	1,1	1,8	2,2	3,1	0	2,1	4	2,3
2	1,1	3,2	1,1	2,4	0,7	3,1	1,5	3,2	0	2,4	0	3
3	0	4,8	1,5	3,7	1,1	4,1	1,1	3	0	3,3	0	3,5

Tab. 1b.

Vzdál. od dveří [m]	Výška od země											
	50 mm		500 mm		1000 mm		1500 mm		2000 mm		2400 mm	
	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]	w [m s ⁻¹]	t [°C]
-2	0,4	1,6	0,5	-0,9	0,6	-1	1,2	-1,4	1,1	-0,5	0,6	-1
-1	0,5	0,1	0,8	-1,7	1,5	-1,7	1,2	-1,6	0,7	-0,7	1,4	-1,1
0	1,5	0	1,2	-1,9	2	-1,1	2	-2,1	2,1	-2,2	0,5	5,6
1	1,8	0,8	3	0	1,2	7,8	0	4	0	5,1	0,5	5,6
2	2,7	0	3,6	4	0,4	6,1	0	4,5	0	4,6	0	5,7
3	3,6	0,1	2,7	4,8	0,6	5,7	0	5,6	0	5,6	0	5

P 6.3 - Naměřené hodnoty clony VIENTO B3 - Případ 2

Případ 2) - Všechny světlíky a dveře uzavřeny

podtlak v hale při zavřených dveřích cca (10÷12) Pa

2a - clona v klidu - podtlak v hale při otevřených dveřích cca 2Pa (Tab. 2a)

2b - clona v chodu - podtlak v hale při otevřených dveřích cca 3 Pa (Tab. 2b)

Tab. 2a.

Vzdál. od dveří [m]	Výška od země											
	50 mm		500 mm		1000 mm		1500 mm		2000 mm		2400 mm	
	w	t	w	t	w	w	w	w	w	w	w	t
	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]
-2	1,1	1,6	1,7	0,2	1	-0,1	1,7	-1,4	0,7	-0,1	0,7	-1,3
-1	0,5	2,3	1,7	1,2	0,6	-0,2	1,4	-1	0,7	-1,3	0,4	1,8
0	1	1,3	0,5	-1,7	0,4	-1,5	1,6	-0,5	0,2	2,6	0,7	5,4
1	1,3	1,4	0,8	4,9	1,2	1,3	0	5,4	0	7,2	0	7,7
2	1	2,7	0,7	6,5	0	5,3	0	7,2	0	7,5	0	7,8
3	0,5	5,5	0	4,8	0	7,2	0	5,2	0	7,1	0	6

Tab. 2b.

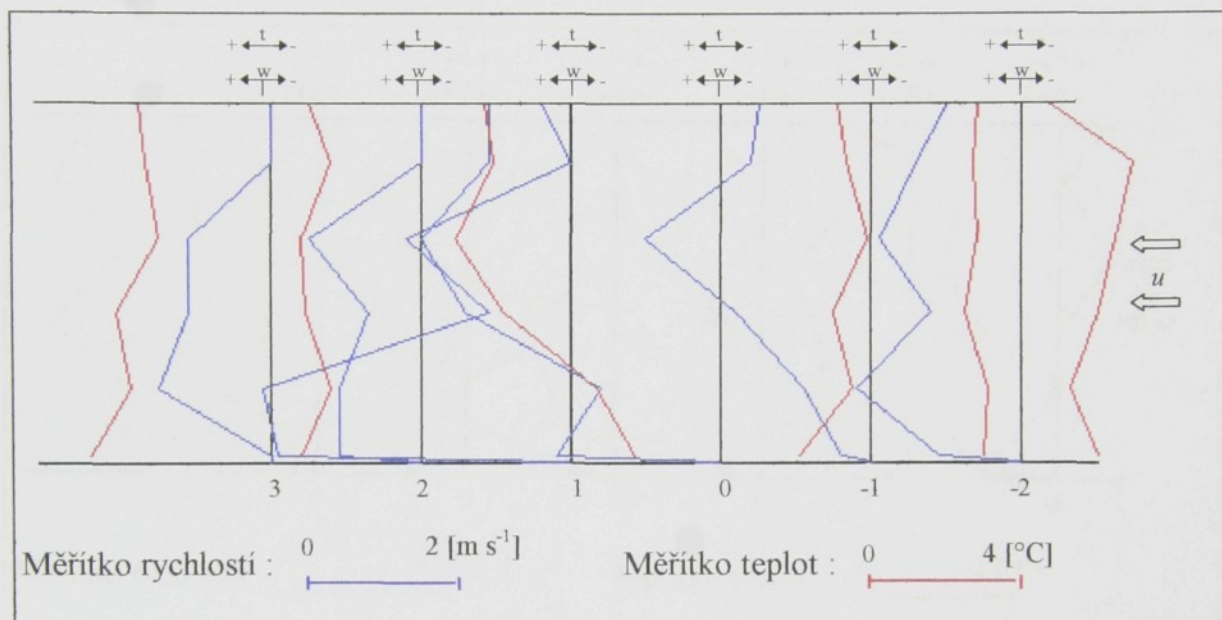
Vzdál. od dveří [m]	Výška od země											
	50 mm		500 mm		1000 mm		1500 mm		2000 mm		2400 mm	
	w	t	w	t	w	t	w	t	w	t	w	t
	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]	[m s ⁻¹]	[°C]
-2	-1,3	2,7	-0,7	2	-0,5	2,3	-0,5	4,4	-1	3,9	-0,9	0,5
-1	-1,5	3,3	-0,4	2,3	-0,4	2,4	-0,4	5,2	-2	-1,6	-0,4	2,2
0	-1,1	7,8	0,4	8,6	0,4	6,9	1,1	5,1	0,5	2,2	1,2	0,7
1	3,5	11,4	0,4	12,7	0	12,5	0	11,9	0	9,9	0,5	8,9
2	3,7	12,5	0,6	12,9	0	13,4	0	12,9	0	10,7	0	11,2
3	2,9	12,2	0,3	13,7	0	13	0	13,6	0	11,7	0	10,8

P 6.4 - Profily rychlostí a teploty v jednotlivých průřezech - Případ 1

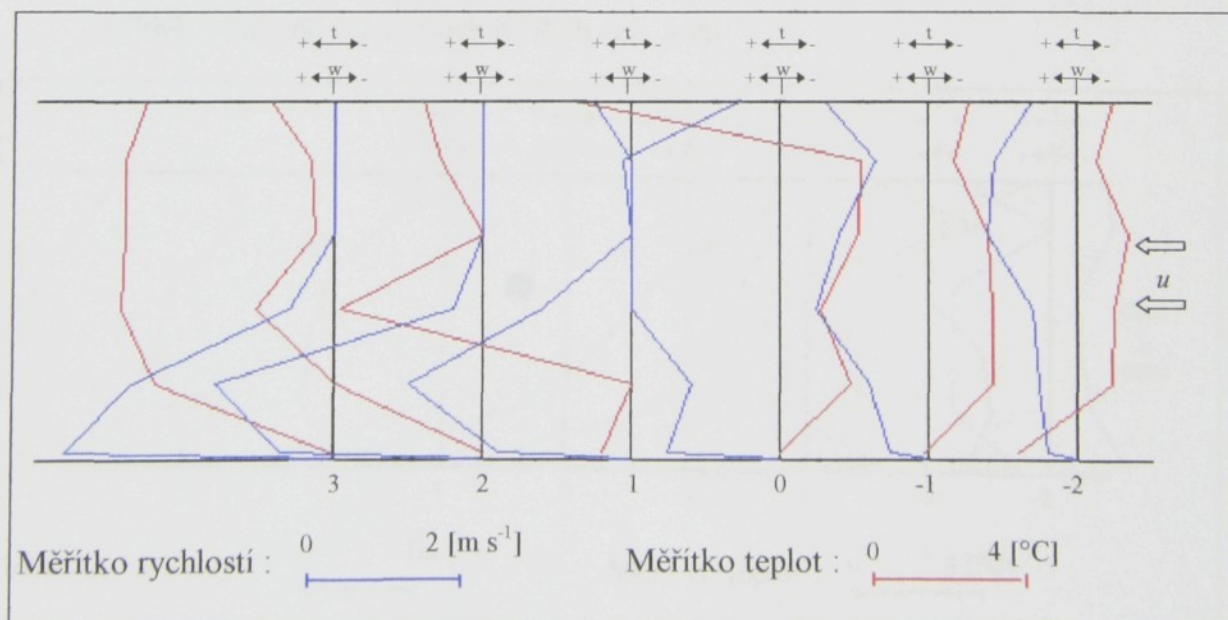
podtlak v hale při otevřených dveřích cca (8-10) Pa

podtlak v hale při zavřených dveřích cca 13 Pa

1a) - otevřené světlíky, dveře v boční stěně, clona v klidu



1b) - otevřené světlíky, dveře v boční stěně, clona v chodu

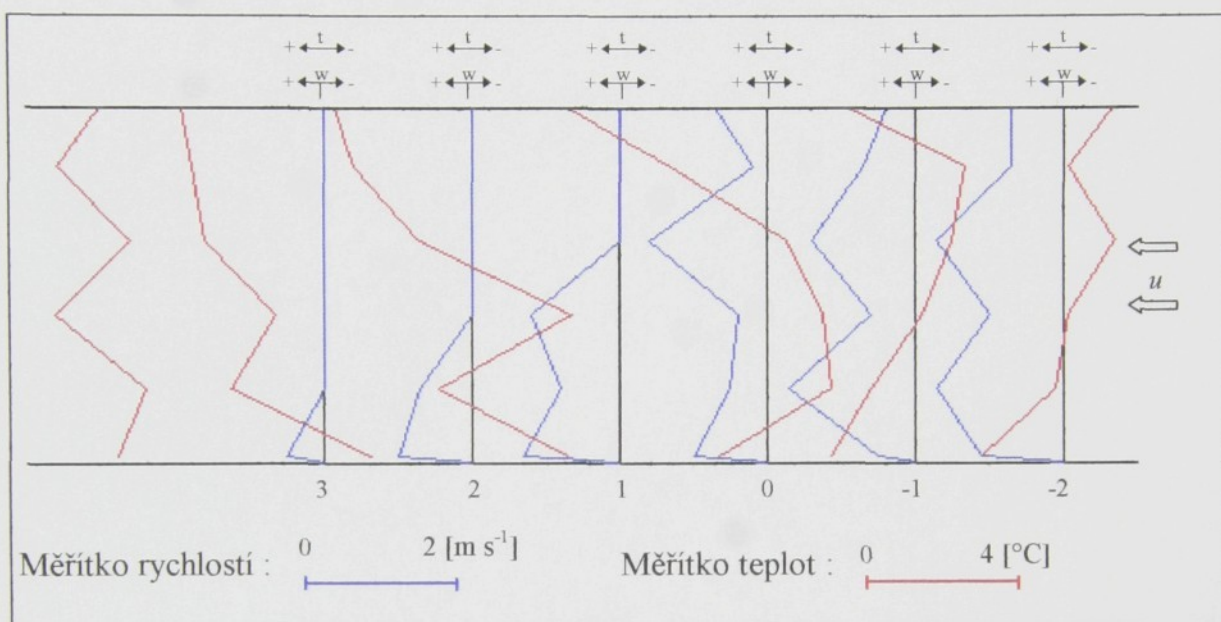


P 6.5 - Profily rychlostí a teploty v jednotlivých průřezech - Případ 2

podtlak v hale při zavřených dveřích cca (10-12) Pa

2a) - zavřené světlíky a ostatní dveře, clona v klidu

podtlak v hale při otevřených dveřích cca 2 Pa



2b) - zavřené světlíky a ostatní dveře, clona v chodu

podtlak v hale při otevřených dveřích cca 3 Pa

