

## VLIV OKRAJOVÝCH PODMÍNEK NA STABILITU RADIÁLNÍHO PROUDU V BLÍZKOSTI PŘEKÁŽKY

### *Boundary conditions effect on radial jet stability close to an obstacle*

Vladimír Krejčí, Jan Košner

Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství,  
Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

#### Abstrakt

Článek pojednává o výpočtovém modelování radiálního proudu a změnách jeho chování, pokud se v jeho blízkosti nachází překážka. Tato překážka může vést k nestabilnímu chování proudu, které lze popsat jako střídavé přilnutí a odtržení proudu od překážky. V závislosti na podmínkách, ať geometrických, tak proudových však může nestabilita způsobit až zánik původního proudu. Zánikem původního proudu je zde míněn ustálený stav, při kterém se původně volný proud stane přilnutým. Na sérii výsledků několika simulací je v článku nastíněn vliv použitých modelů pro popis mezní vrstvy a počátečního rychlostního profilu proudu na zmíněnou nestabilitu. Jelikož se jedná o úlohu rotačně symetrickou byl také posouzen vliv zjednodušení problému na dvourozměrný. Výsledky simulací jsou porovnány s experimentálními daty.

#### Úvod

Použití místního odsávání s sebou přináší velký potenciál, co se týče úspor energie při větrání, jelikož při tomto způsobu větrání je škodlivina odváděna přímo v místě jejího vzniku a není tedy nutno větrat celý prostor [1]. Je však nutno zmínit, že tato výhoda je na druhé straně potlačena nízkou účinností sacích nástavců. Za účelem zvýšení účinnosti sacích nástavců bývají tyto různě konstruovány, např. odsávací digestoře. Zde je ovšem záhodno uvést skutečnost, že jejich konstrukce omezuje přístup k pracovnímu prostoru. Mezi metodami, jak zesílit sací účinek kruhového nástavce, lze nalézt aplikaci příruby [2], která prodlužuje proudovou cestu vzduchu z prostoru za nástavcem a tím usnadňuje odsávání z prostoru před nástavcem. Dosahovaná zlepšení však nejsou příliš významná. Jinou metodou je využití přidavného proudu vzduchu, který buď přefukuje oblast, ve které dochází k vývinu škodliviny (systém „Push-Pull“ [3]), nebo je vzduch přiváděn ve směru souhlasném s rovinou odsávacího otvoru. Druhý přístup byl patentován ke konci 60. let dánským inženýrem C. P. Aabergem [4].

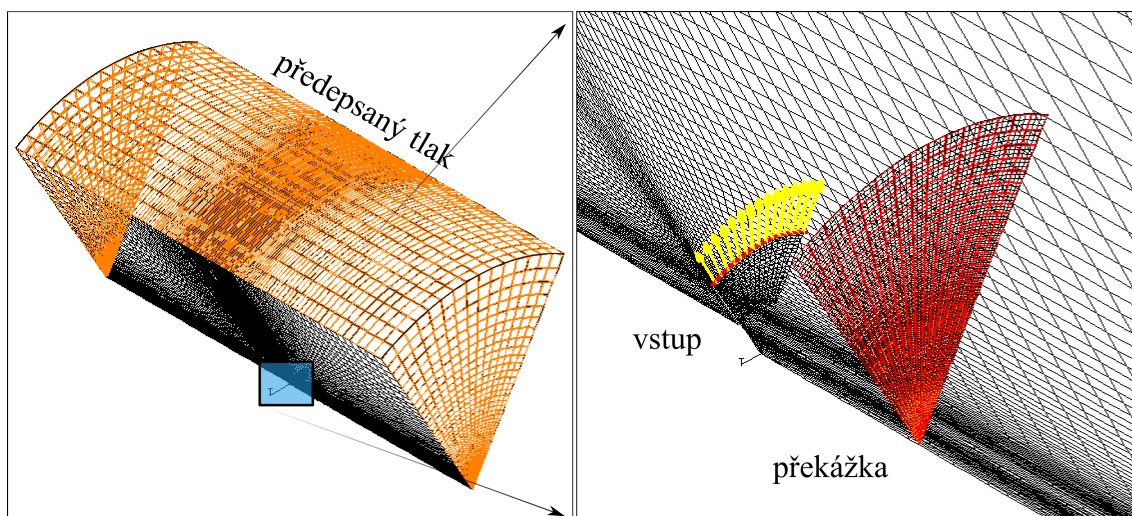
S použitím nových metody je spojeno množství sporných otázek. Bylo sice ukázáno, že jejich použití je energeticky výhodnější [5] ve srovnání s tradičními metodami, avšak jejich metodika návrhu zatím není ve fázi vhodné pro použití v projekční praxi. Kromě problematického určení poklesu osově rychlosti odsávání se vzdáleností od kruhového nástavce vyvstává zde problém interakce přiváděného proudu vzduchu s předměty v pracovní oblasti. V námi uvažovaném případě je oním předmětem pracovní stůl, ale může jím být i pracovník samotný. Tyto faktory, jenž téměř neovlivňují funkci tradičního nástavce, mohou při nesprávné manipulaci s nástavcem vést až k efektu přesně opačnému než je požadovaný, a to ke zhoršení sacího účinku. Překážka totiž může způsobit nestabilitu proudu.

Z pohledu výpočtového modelování je nestabilní chování proudu v blízkosti překážky fenoménem, jenž ukazuje na možnosti simulačních nástrojů. Mezi faktory, se kterými je nutno se vypořádat, jsou hustota sítě, použitý model turbulence, způsob popisu mezní vrstvy a další. A právě některé ze zmíněných mapuje tento článek.

### Řešené varianty a jejich nastavení

V důsledky symetrie radiálního proudu lze jeho popis výpočtovým modelováním zjednodušit, a to tak, že modelovanou oblastí může být i válcová výseč. Uvažovanými výpočtovými doménami byly tedy dva sektory. První sektor převedl problém na dvou-rozměrné rotačně symetrické proudění (dále 2D simulace), druhý svíral vrcholový úhel  $60^\circ$  a částečně tedy nahrazoval trojrozměrnost reálného proudového pole (dále 3D simulace). Další rozměry sektorů byly shodné: průměr 6 m a délka 6 m. Ve středu domény byl umístěn nástavec, který vytvářel radiální proud o počáteční šířce 4 mm a poloměru 100 mm. 17 cm před nástavec byla souose umístěna kruhová deska o průměru 55 cm, jež imitovala překážku.

Pro potřeby výpočtového modelování byla doména rozdělena na kontrolní objemy tak, že vznikla strukturovaná výpočetní síť. Jelikož bylo experimentálně zjištěno, že za této geometrické konfigurace dojde ke kmitání proudu, byly simulace provedeny jako časově závislé [6]. Jako časové diferenční schema bylo použito Crankovo-Nicolsonovo schema. Prostorová diferenciace byla provedena schematem typu MUSCL s TVD omezením [7]. Obě použitá schemata dosahují přesnosti druhého řádu.



Obr. 1 Ukázka výpočetní sítě a okrajové podmínky

Použité okrajové podmínky jsou zobrazeny, spolu se sítí, na obr. 1. Po obvodu a čelech výpočtové domény byl předepsán statický tlak. Okrajová podmínka „vstup“ definovala počáteční parametry proudu. Byla mu udělena počáteční rychlost 10 m/s, při intenzitě turbulence 10 % a délkovém měřítku turbulence nastaveném na 10 % počáteční šířky proudu. Testovány byly dva tvary počátečního rychlostního profilu proudu, a to pístový a parabolický. Rovnice pro výpočet parabolického rychlostního profilu vycházela z podmínek nulové rychlosti na krajích proudu (stěny štěrbin) a střední rychlost 10 m/s.

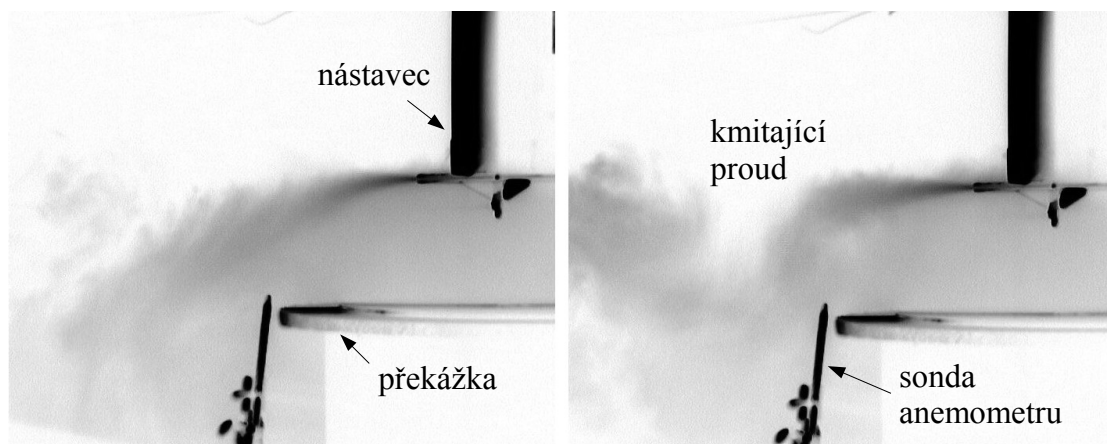
Co se týče překážky, ta byla nulové tloušťky. Přístěnná oblast byla modelována několika přístupy. Prvním, bylo využití stěnové funkce, jež přímo ovlivňuje proudové pole pouze v kontrolních objemech přilehlých stěnám, kde předpokládá logaritmický

rychlostní profil. Tento přístup vychází z předpokladu, že celá mezní vrstva se nachází ve zmíněné vrstvě kontrolních objemů [8]. Všem povrchům (stěnám) byla přiřazena drsnost tak, že se projevovaly jako hydraulicky hladké. Další uvažovanou variantou popisu mezní vrstvy bylo použití hybridní stěnové funkce, jejíž aplikovatelnost je poněkud širší ve srovnání s předchozí. Hybridní stěnová funkce totiž posouvá hranici své použitelnosti k hodnotám bezrozměrné vzdálenosti od stěny  $y^+$  menším než 1, zatímco předchozí je zdola omezena hodnotou 30. Z pohledu povrchu překážky byl uvažován ještě jeden případ, který se vyznačoval použitím hybridní stěnové funkce, avšak lišil se drsností povrchu. Ta byla, v tomto případě, uměle zvýšena a imitovala povrch s pravidelnými nerovnostmi o shodné výšce i šířce (0,5 mm). Zmíněné modely popisu mezní vrstvy se vztahují k použitému modelu turbulence, kterým byl standardní  $k-\varepsilon$  [8].

Simulace mapovaly 15 s vývoje proudového pole. Časový krok simulace 0,2 ms byl zvolen tak, aby maximální Courantovo číslo ve výpočtové doméně, jako kritérium stability řešiče, se svou hodnotou blížilo číslu 2; průměrná hodnota pro celou výpočtovou doménu byla okolo 0,08.

### Výsledky

Prvně si představme výsledky dosažené vizualizací chování radiálního proudu v blízkosti překážky. Ukázka ze záznamu vizualizace kouřem je zachycena na obr. 2.

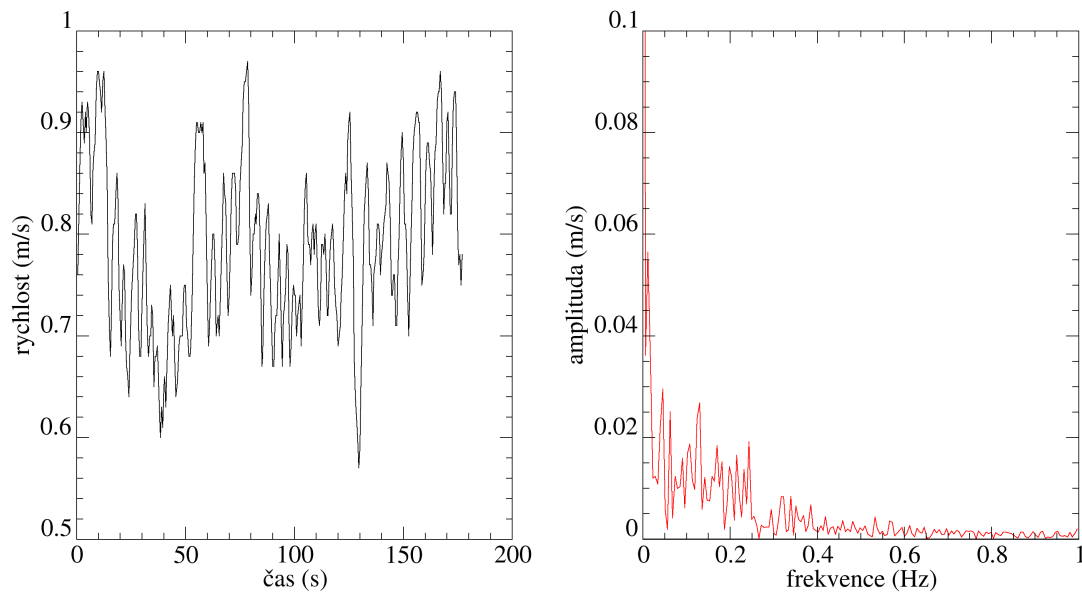


Obr. 2 Ukázka vizualizace nestabilního chování proudu kouřovou metodou

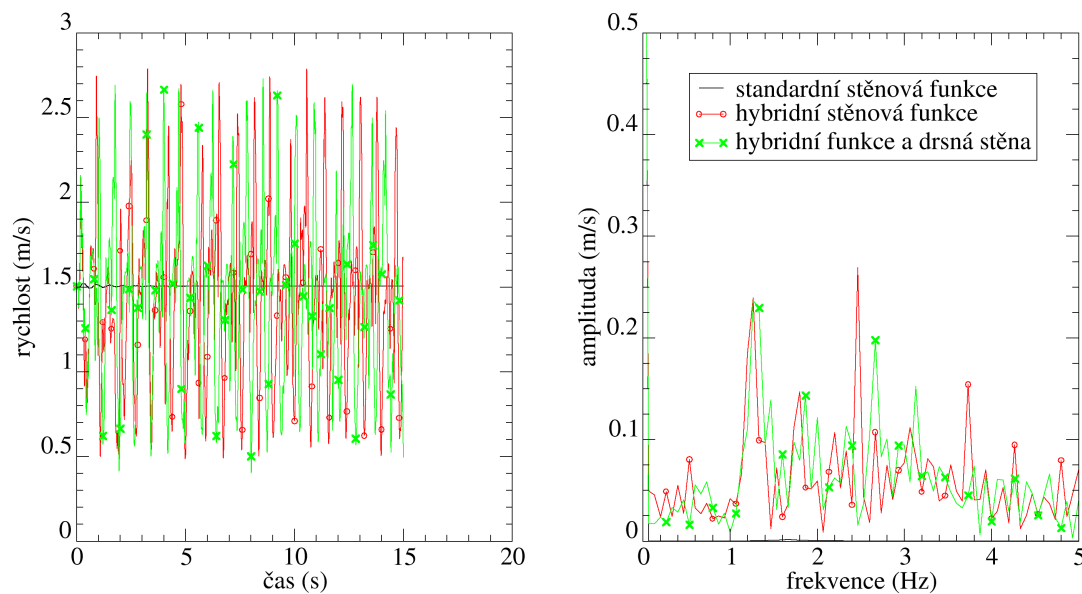
Současně s vizualizací kouřem proběhlo také měření žárovou anemometrií. Žhavený element použité kulové sondy měl průměr 3 mm a byl umístěn ve vzdálenosti 2 cm radiálním směrem od překážky a 2 cm nad rovinou jejího povrchu. Sonda umožňovala měření s vzorkovací frekvencí 2 Hz. Pohledem na levý graf v obr. 3 se lze přesvědčit o kolísání v naměřené rychlosti, která nabývala hodnot v rozmezí 0,57 až 0,97 m/s. Po analýze rychlostního signálu pomocí Fourierovy transformace však nebylo možno jednoznačně identifikovat nosnou frekvenci kmitajícího proudu, viz obr. 3 vpravo.

Pohled na obr. 4 čtenáře přenáší od měření k výsledkům výpočtového modelování. Zde byl sledován účinek různého popisu přístěnné oblasti spolu se zvýšenou drsností povrchu. Jak je vidět standardní stěnová funkce má za následek potlačení kmitání proudu v důsledku přilnutí proudu k překážce. V případech kdy byla použita hybridní stěnová funkce proud zřetelně kmital, což ostatně naznačuje i frekvenční analýza Fourierovou transformací. V obou případech lze vidět výrazné frekvence kmitání proudu, které se shodly na hodnotě přibližně 1,27 Hz. Oba signály navíc vykazují vysokou

amplitudu také pro dvojnásobnou frekvenci, přičemž u hydraulicky hladké stěny byla dokonce tato frekvence (2,55 Hz) hlavní frekvencí signálu.

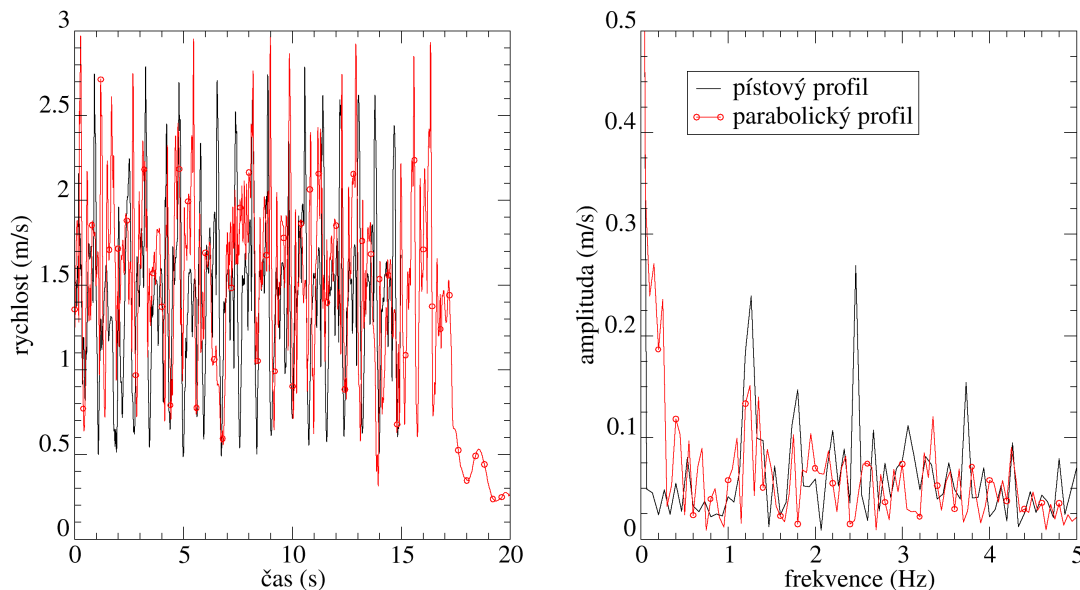


Obr. 3 Vývoj rychlosti v čase ve sledovaném bodě (vlevo) a signál po zpracování pomocí Fourierovy transformace (vpravo)



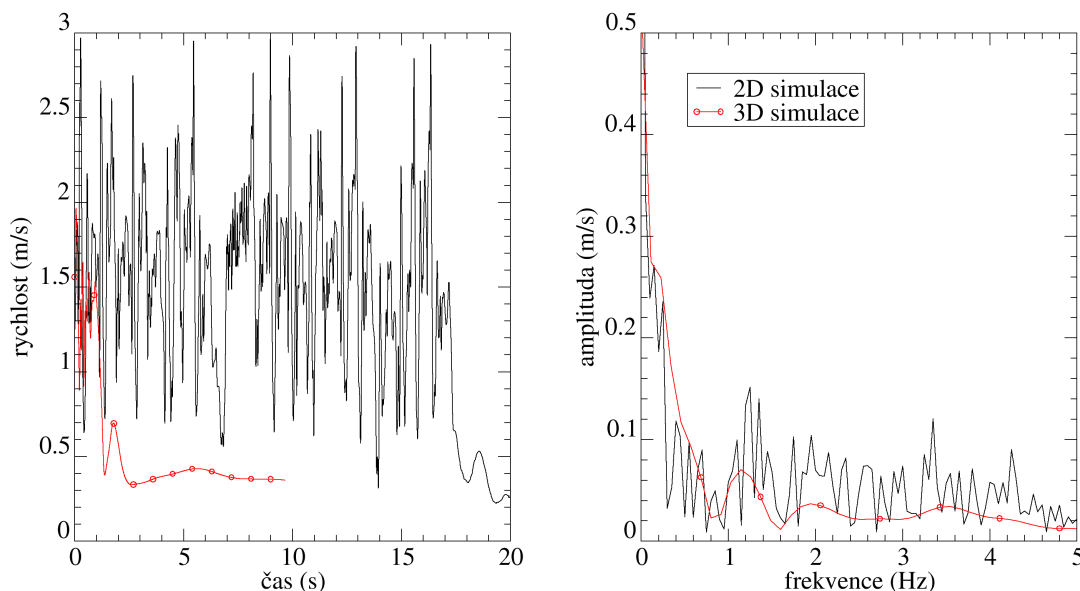
Obr. 4 Vliv použité stěnové funkce na rychlost ve sledovaném bodě a frekvenční analýza signálu

Následující obr. 5 přináší informaci o změně chování radiálního proudu v závislosti na počátečním rychlostním profilu proudu. Pokud by se do hodnocení bralo pouze prvních 15 s signálu, jevíly by se obě varianty jako podobné.



Obr. 5 Vliv tvaru počátečního rychlostního profilu radiálního proudu na rychlost ve sledovaném bodě a frekvenční analýza signálu

Podrobnějším zkoumáním bylo však zjištěno, že použití parabolického rychlostního profilu způsobilo větší snahu proudu po zbavení se vlivu překážky. K tomu došlo až v čase okolo 17 s. Původně jasný signál s vlastními frekvencemi 1,27 a 2,55 Hz se poněkud rozmlží v důsledku změny charakteru proudění (proud se stane proudem volným).



Obr. 6 Vliv trojrozměrnosti na průběh rychlosti ve sledovaném bodě a frekvenční analýza signálu

Zde je nutno zmínit, co vedlo autory k prodloužení doby simulace z původních 15 s na 20. Vysvětlení se nachází v obr. 6. Zde jsou porovnány výsledky simulací lišící se pouze dimenzionálním pojetím při zachování hybridní stěnové funkce a parabolického

počátečního profilu proudu. V trojrozměrném případě proud velmi záhy opustil stav střídavého přilnutí k překážce a odtržení a vydal se směrem k volnému proudu. Jelikož se proud s parabolickým počátečním profilem přece jen choval poněkud samostatněji, bylo rozhodnuto prodloužit simulační čas o dalších 5 s. Z těchto 5 s nebylo zapotřebí více než dvou, aby se proud osamostatnil.

### **Závěr**

V dřívějších pracích bylo ukázáno jak přítomnost překážky (ne)vhodně umístěné v blízkosti radiálního proudu může způsobit jeho destabilizaci až zánik. Předložený článek naznačil s jakými problémy se lze setkat pokud budeme zvažovat aplikaci výpočtového modelování na tento jev. Klíčovou se jeví jak volba vhodného modelu pro popis přístěnné oblasti, tak zadání konkrétního rychlostního profilu, který má proud na svém počátku. Zjednodušení výpočtové domény, a tím převod řešení na dvourozměrné, přineslo však nejzásadnější změnu. V trojrozměrném proudovém poli se radiální proud oddělil od překážky velmi brzo od počátku simulace na rozdíl od zjednodušeného dvourozměrného modelu (počáteční proudové pole použité k inicializaci řešení vykazovalo přilnutí proudu k překážce). V případě zjednodušeného modelu nedošlo k oddělení v předem definovaném časovém intervalu simulace 15 s, avšak až po rozšíření tohoto intervalu o dalších 5 s. Pro korektní modelování interakce radiálního proudu a překážky je tedy nutné zvolit model turbulence tak, aby korektně popsal přístěnnou oblast. Současně je nanejvýše vhodné použít počáteční rychlostní profil proudu, který alespoň částečně postihuje reálný, a nezjednodušovat výpočtovou doménu na dvourozměrnou.

### **Poděkování**

Práce vznikla za finanční podpory projektu GP101/08/P128 Grantové agentury České republiky.

### **Literatura**

- [1] Chyský J., a kol., Větrání a klimatizace - technický průvodce č. 31, Bolit, Brno, 1993.
- [2] Fletcher B., Effects of flanges on the velocity in front of exhaust ventilation hoods, The Annals of Occupational Hygiene, Vol.21, pp. 265-269, Elsevier Science Ltd., Amsterdam, 1978.
- [3] Huang R.F. et al., Aerodynamic Characteristic and Design Guidelines of Push-Pull Ventilation Systems, Ann. occup. Hyg., Vol. 49, No. 1, pp. 1-15, 2005.
- [4] Aaberg C.P., Plant for Ventilation of Rooms, More Particularly in Stables, United States Patent & Trademark Office, US patent 3401621, 1968.
- [5] Krejčí V., Košner J., Energy consumption of the Aaberg exhaust hood compared with a flanged hood, In Indoor Air 2008: Proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Eds. Strom-Tejsen P., Olesen BW., Wargocki P., Zukowska D., Toftum J., IndoorAir 2008, Copenhagen, Denmark, 2008, paper ID: 896. ISBN 9788778772701, 2008.
- [6] Košner J., Krejčí V., Interakce radiálního proudu se souběžnou stěnou, Sborník XVI. mezinárodní konference 'Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín', Žilina, Slovensko, str. 121-126, 2008.
- [7] van Leer B., Towards the ultimate conservative differencing scheme V: A second-order sequel to Godunov's method, J. Comp. Phys., 23, pp. 101-136, 1977.
- [8] STAR-CD Version 3.26 Documentation, 2005.