

Výpočtové hodnocení dvouplášťových střech – normový postup versus CFD analýza

Zbyněk Svoboda, Stavební fakulta ČVUT Praha

O využití CFD analýz ve stavební fyzice se v několika posledních letech diskutuje nejen na konferencích. Postupně se tyto sofistikované nástroje pro modelování prostorového šíření tekutin (CFD = *computational fluid dynamics*) prosazují i do stavební praxe. Jednou ze zajímavých oblastí, v níž se mohou CFD výpočty uplatnit, je výpočtové hodnocení dvouplášťových střech.

Úvodem

Dvouplášťové střešní konstrukce jsou v českých normách tradičně doporučovány jako ideální střechy do vlhkých provozů. Vzduchová vrstva mezi spodním, tepelně izolujícím pláštěm a horním, ochranným pláštěm je větraná venkovním vzduchem, který má bezpečně odvést do vnějšího prostředí vodní páru, difundující přes spodní plášť z interiéru. Je-li dvouplášťová střecha dobře navržena a zrealizovaná, nedochází pak v její skladbě v žádném místě ke kondenzaci vodní páry.

Kvalitní návrh dvouplášťové střechy však není vůbec jednoduchým projektovým úkolem. V posledních letech se u nových dvouplášťových střech velmi často objevují závažné vlhkostní poruchy, které se v dřívějších letech prakticky nevyskytovaly. Obecnou příčinou je postupné zvyšování požadavků na tepelnou ochranu budov, kvůli němuž se v posledních letech výrazně zvýšil tepelný odpor spodních plášťů střech. Do větraných vzduchových dutin nově projektovaných střech tak proniká podstatně méně tepla, než tomu bývalo u střech starších. Vzduch ve větraných vrstvách je tudíž podstatně studenější a mnohem snadněji dosáhne stavu nasycení. Moderní dvouplášťové střechy musí být proto navrženy velmi zodpovědně.

Pro výpočtové posouzení návrhů dvouplášťových střech se v ČR tradičně používá metodika ČSN 73 0540-4, která je sice poměrně jednoduchá a snadno aplikovatelná, ale na druhou stranu má řadu omezení.

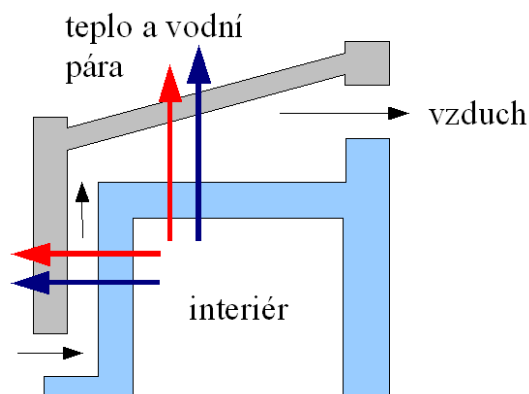
Základní normový postup

Výpočtové posouzení tepelně vlhkostního chování dvouplášťových střech podle ČSN 73 0540-4 se provádí v několika navazujících krocích. Nejprve je třeba vytvořit 2D model vět-

rané vzduchové vrstvy. V tomto modelu může vzduch proudit jak svisle, tak vodorovně, ale stále jen v jedné rovině (obr. 1). Pro většinu střešních konstrukcí to postačí, ale objevují se i komplikovanější střešní pláště, které je pak nutné pro výpočet často radikálně (a někdy i ne zcela vhodně) zjednodušit.

V dalším kroku se stanovuje z tlakové rovnováhy rychlost proudění vzduchu v jednotlivých úsecích větrané vrstvy. Při výpočtu rychlosti proudění se zjednodušeně zohledňují jak tlakové ztráty třením a vřazenými odpory, tak tlakové rozdíly, způsobené větrem a výškovým rozdílem mezi vstupním a výstupním otvorem (počítá se tedy s vlivem přirozeného i nuceného proudění vzduchu). Výsledná rychlost proudění vzduchu je samozřejmě jen určitou průměrnou hodnotou v jednotlivých úsecích – nijak se nezohledňuje proměnné rozložení rychlosti proudění v průřezu větrané vrstvy.

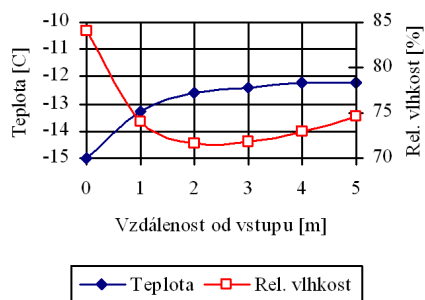
Po stanovení rychlostí proudění vzduchu následuje výpočet rozložení teplot vzduchu v dílčích úsecích ve směru jeho proudění. Používaný vztah byl odvozen z jednoduché tepelné rovnováhy větrané vrstvy (vystupují v ní zisky prostupem z interiéru přes spodní plášť, ztráty prostupem do exteriéru přes horní plášť a teplo odváděné proudícím vzduchem). Výsledná teplota ve větrané vrstvě má více či méně výrazný exponenciální průběh v závislosti na tepelných odporech obou plášťů a na rychlosti proudění vzduchu (obr. 2). Posledním krokem normové metodiky je stanovení relativní vlhkosti vzduchu ve



Obr. 1 Schéma 2D modelu větrané vrstvy

větrané vrstvě. I zde se vychází z rovnováhy difuzních toků, mífících do větrané vrstvy a ven z ní, včetně zohlednění vlivu proudícího vzduchu.

Cílem výše popsaného výpočtu je ověřit, zda relativní vlhkost ve větrané vrstvě nepřesahuje limit 90 % (požadavek ČSN 73 0540-2).



Obr. 2 Typický průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu proudícího ve větrané vrstvě stanovený výpočtem podle ČSN 73 0540-4

Jak je z popisu metodiky zřejmé, jedná se o nepříliš náročný postup, který byl původně vytvořen i pro použití při ručním výpočtu [1], [2]. Jeho hlavní nevýhodou jsou jen velmi omezené možnosti přesnějšího modelování vřazených odporů, složitějších tvarů střech či vlivu různých moderních ventilačních prvků (např. turbíny typu Lomanco). Zohlednit samozřejmě nelze ani všechny klimatické vlivy – např. není možné hodnotit působení slunečního záření, noční výměnu tepla sáláním s oblohou nebo vliv větru, vanoucího proti převažujícímu směru přirozeného proudění.

CFD modelování

Pro výpočtové hodnocení důsledků podobných komplikovanějších okrajových podmínek a pro hodnocení složitějších střech lze použít pokročilejší programy, zaměřené na CFD analýzy. Možnosti modelování jsou u těchto nástrojů velmi široké a projektanta tak omezuje spíše náročnější práce s příslušným softwarem a podstatně delší doba potřebná k získání výsledků. Modely střešních konstrukcí totiž nelze obvykle natolik zjednodušit, aby se v nich mohla vyskytovat jen pravoúhlá geometrie. Velmi často je bohužel nutné zadat do výpočtu různé šikmé vrstvy (především horní plášť), což obecně vede k velkému počtu neznámých a k velmi pomalému postupu iteračního výpočtu.

Daleko podstatnější komplikací ale je,

že CFD programy obecně neumožňují zohlednit ve výpočtu difuzi vodní páry přes stavební materiály. Kondenzace vodní páry uvnitř stavebních konstrukcí se v CFD analýzách zatím rovněž nehodnotí. Většinou tak lze posuzovat jen ty nejzákladnější případy kondenzace a vypařování z povrchu konstrukcí, a to ještě musí mít tyto konstrukce (či obecně budovy) konstantní teplotu a relativní vlhkost na příslušných površích. To jsou ale příliš velká omezení, jsou-li cíle výpočtu poněkud ambicióznější – např. pokud nás zajímá pole relativních vlhkostí ve dvouplášťové střešní konstrukci.

Řada odborníků se proto touto problematikou již zabývala a uveřejnila některá podnětná řešení, která mohou pomoci. Jedním z nejzajímavějších nápadů bylo nahrazení materiálů vystavených difuzi vodní páry „nepohyblivými tekutinami“ o známých difuzních vlastnostech [4]. Naneštěstí lze podobné vtipné postupy použít jen u některých CFD programů – rozhodně nejde o univerzální recept. Tím je mnohem spíše postup, ve kterém se difuzní tok vodní páry přes spodní plášť modeluje ve výpočtu jako plošný vlhkostní zdroj, který se umístí na vnější povrch spodního pláště a jehož výkon se stanoví výpočtem. To ale bohužel nemusí být vždy snadné, protože hustota toku vodní páry spodním pláštěm závisí mimo jiné i na neznámých hodnotách teploty a vlhkosti vzduchu ve větrané vrstvě. Ne všechny CFD programy si s tímto problémem dovedou zcela uspokojivě poradit; nicméně z hlediska praktického, bezpečného hodnocení dvouplášťových střech je možné použít pro velikost plošného vlhkostního zdroje jednoduchý vztah:

$$g_d = \frac{p_i - p_e}{Z_{pl}}$$

kde g_d je hustota toku vodní páry v $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

p_i částečný tlak vodní páry ve vnitřním vzduchu v Pa

p_e částečný tlak vodní páry ve vnějším vzduchu v Pa

Z_{pl} difuzní odpor vnitřního pláště střechy v m/s .

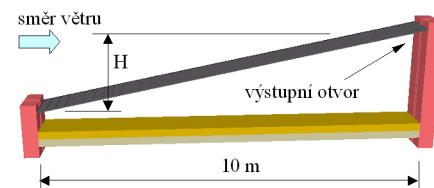
Zbývá dodat, že tento vztah platí za předpokladu, že ve vnitřním plášti střechy nedochází ke kondenzaci vodní páry, což lze prakticky bez výjimek snadno splnit. Zájemci o podrobnější rozbor tohoto tématu najdou více informací v příspěvku [5].

Zbývajícím hustotu toku vodní páry z větrané vrstvy přes horní plášť do exteriéru lze obvykle zanedbat vzhledem k většinou velmi vysokému difuznímu odporu horního pláště (toto zanedbání je navíc samozřejmě na straně bezpečnosti výpočtu).

Přes výše zmíněné nevýhody se mohou CFD výpočty výhledově stát neocenitelným pomocníkem při projektování náročnějších střech. V této souvislosti je samozřejmě velmi zajímavé, jaké lze očekávat rozdíly ve výsledcích dosažených CFD výpočtem a standardní normovou metodikou.

Porovnání obou metodik

Velmi názorně lze shody a rozdíly obou postupů ukázat na základním nejednodušším typu dvouplášťové střechy – na pultové střeše s výškově posunutými větracími otvory (obr. 3). Tepelně vlhkostní chování této střechy závisí především na tepelném odporu spodního pláště, na převýšení větracích otvorů a na rychlosti větru.



Obr. 3 Modelová pultová střecha

V provedené parametrické studii byla uvažována pro všechny varianty jednotná geometrie větrané vrstvy i jednotná velikost větracích otvorů ($100 \times 100 \text{ mm}$ v osové vzdálenosti 1 m). Shodné byly i okrajové podmínky (vnitřní vzduch s teplotou 21°C a relativní vlhkostí 50 %, vnější vzduch o teplotě -15°C a relativní vlhkosti 84 %). Proměnné byly hodnoty součinitele prostupu tepla spodního pláště a vertikální vzdálenosti větracích otvorů. Vstupní i výstupní otvory byly předpokládány zcela volné, aby se předešlo rozdílům, způsobeným odlišným modelováním vřazených otvorů (síťky, mřížky).

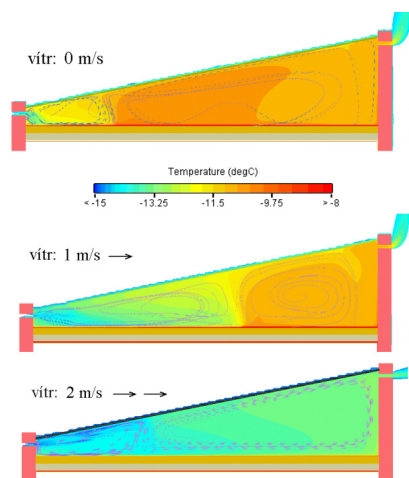
Sledována byla teplota a relativní vlhkost vzduchu před výstupním otvorem. Výsledky srovnávací analýzy jsou shrnuty v tab. 1. Je zřejmé, že ve většině případů poskytuje normová metodika výsledky na straně bezpečnosti výpočtu. Zvláště to pak platí o případech bezvětrí, pro které dává metodika ČSN 73 0540-4 výsledky opravdu výrazně nepříznivější. Na druhou stranu lze naopak očekávat,

že pro vyšší rychlosti proudění větru (od 2 m/s) budou výsledky normové metodiky mírně příznivější, než výsledky CFD analýzy. Nejlepší shoda mezi výsledky obou metodik panuje v případě rychlostí větru kolem 1 m/s.

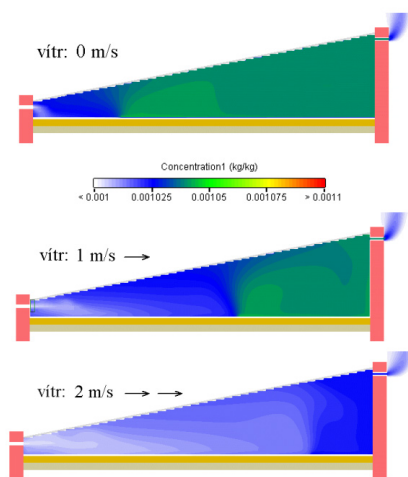
Příčiny velkých rozdílů ve výsledcích pro případy bezvětří jsou pravděpodobně způsobeny tím, že normový postup nijak nezohledňuje vedení tepla svislými stěnami, které se projevuje nejvíce u slabého proudění vzduchu dutinou. Svou roli samozřejmě sehrává i to, že v ČSN 73 0540-4 je zanedbán skutečný komplexní charakter proudění vzduchu ve větrané vrstvě, který je velmi dobře vidět na obr. 4.

Za drobnou poznámku stojí i prostorové rozložení měrných vlhkostí vzduchu ve větrané vrstvě modelové pultové střechy (obr. 5), které je zřetelně závislé na rychlosti větru (podobně jako rozložení teplot na obr. 4). Z měřítka grafického výstupu na obr. 5 je nicméně zřejmé, že reálné rozdíly mezi měrnými vlhkostmi v různých místech větrané vrstvy jsou minimální. Dokladem toho, že návrh modelové střechy je funkční, je pak skutečnost, že měrná vlhkost ve větrané vrstvě se v rámci celého jejího průřezu pohybuje jen těsně nad 1 g/kg (měrná vlhkost venkovního vzduchu). Pokud by vnitřní plášť střechy byl méně těsný či vzduchová vrstva hůře větraná, přesahovala by měrná vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě měrnou vlhkost venkovního vzduchu daleko výrazněji.

Výše popsané shody a rozdíly mezi CFD výpočtem a metodikou ČSN 73 0540



Obr. 4 Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě pultové střechy s převýšením otvorů 2 m a součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m².K)



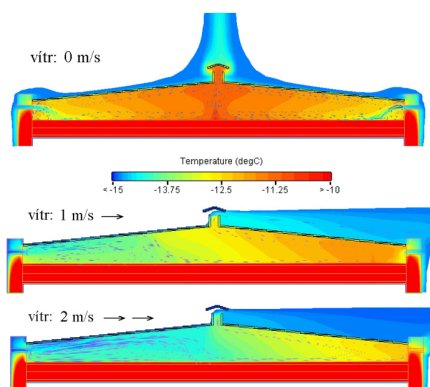
Obr. 5 Rozložení měrných vlhkostí vzduchu ve větrané vrstvě stejné pultové střechy jako na obr. 4

lze vysledovat i u dalšího základního typu dvouplášťové střechy – u střechy s průběžným středovým dýmníkem (obr. 6), a to přesto, že pro výpočet normovou metodikou je třeba hodnotit jen ideální polovinu střechy. U tohoto typu střechy je zajímavý vliv větru. Z CFD výpočtu totiž vychází poměrně uspokojivé větrání vzduchové vrstvy i pro větší rychlosti větru, což vyvrací občasné obavy praktiků z chování tohoto typu střechy za větrného počasí. Poměrně snadnou úpravou dýmníku – přidáním bočním šikmých krycích desek – lze ovšem obraz proudění i při větru změnit tak, aby vzduch stále odcházel převážně dýmníkem (obr. 7).

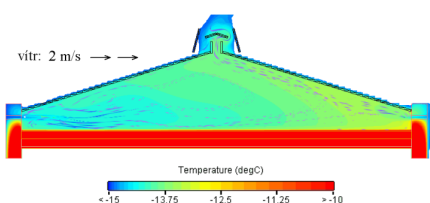
Podívejme se ještě závěrem srovnávací studie na poslední častější typ dvouplášťové střechy. Jedná se o stře-

Tab. 1 Výsledky srovnávacího výpočtu CFD/ČSN pro pultovou střechu

Rozdíl výšek větracích otvorů	Souč. prostupu tepla spodního pláště	Rychlost větru	Teplota vzduchu před výstupem		Rel. vlhkost vzduchu před výstupem	
			θ [°C]		ϕ [%]	
H [m]	U [W/(m².K)]	v [m/s]	CFD	ČSN	CFD	ČSN
2,0	0,4	0,0	-8,3	-10,2	53	58
		1,0	-10,9	-10,5	60	60
		2,0	-12,2	-11,1	67	61
	0,2	0,0	-10,3	-12,2	63	71
		1,0	-12,3	-12,4	69	70
		2,0	-13,2	-12,8	73	71
	0,1	0,0	-11,5	-13,5	69	81
		1,0	-13,4	-13,6	76	78
		2,0	-14,0	-13,8	78	78
1,0	0,4	0,0	-6,6	-10,1	48	51
		1,0	-10,5	-10,4	58	58
		2,0	-11,8	-11,1	65	61
	0,2	0,0	-9,5	-12,2	64	73
		1,0	-11,9	-12,4	67	70
		2,0	-13,1	-12,8	72	71
	0,1	0,0	-11,1	-13,5	71	85
		1,0	-13,1	-13,6	74	78
		2,0	-13,8	-13,8	76	78
0,3	0,4	0,0	-4,9	-10,1	45	64
		1,0	-9,4	-10,3	56	58
		2,0	-11,4	-11,0	63	60
	0,2	0,0	-7,2	-12,2	54	80
		1,0	-11,3	-12,3	64	70
		2,0	-12,7	-12,8	70	71
	0,1	0,0	-10,0	-13,5	67	94
		1,0	-12,5	-13,6	71	78
		2,0	-13,6	-13,8	75	78



Obr. 6 Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě střechy s dýmníkem, s převýšením otvorů 1 m a součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m².K)



Obr. 7 Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě střechy s dýmníkem opatřeným bočními krycími deskami (převýšení otvorů 2 m, souč. prostupu tepla 0,2 W/(m².K))

chu označovanou často jako motýlková, která patří z hlediska větrání mezi dosti problematická řešení a většinou odborníkům není doporučována. Z obr. 8 je jasně patrné, proč je tomu tak. Za bezvětří se totiž tato střecha chová v podstatě jako jednoplášťová – vzduch prakticky jen cirkuluje v rámci vzduchové vrstvy a výměna do exteriéru je minimální. Důsledkem je pak nasycení vzduchu vodní párou a následná kondenzace na vnějším plášti. Chování střechy se samozřejmě radikálně zlepší, jakmile začne na střechu působit vítr, což potvrzují obě srovnávané metodiky (shody a rozdíly metodik jsou i pro tuto střechu obdobné).

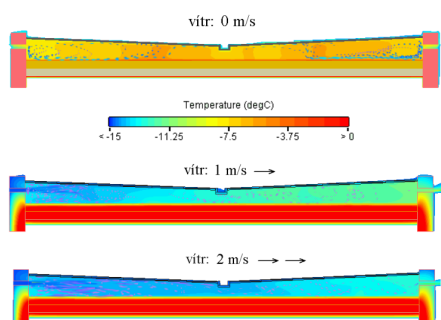
Projektanti se obvykle u tohoto typu střechy snaží zajistit větrání i při bezvětří tím, že od sebe mírně vertikálně posunou protilehlé větrací otvory. Toto posunutí nebývá obvykle příliš velké, nicméně výsledky CFD analýzy ukazují, že i to může pomoci (obr. 9). Vždy samozřejmě záleží na konkrétní situaci, protože velmi významnou roli hraje skladba střechy, vzdálenost mezi větracími otvory, případné překážky ve větrané vrstvě

a parametry mikroklimatu pod střechou. Zde uvedené výsledky je proto pochopitelně nutné vnímat jako ilustrativní a pouze ukazující určité tendence. Každá specifická střecha by měla být samozřejmě konkrétně posouzena.

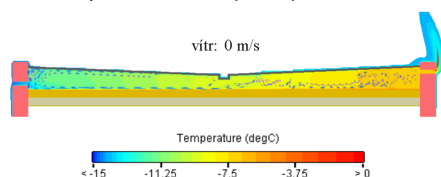
Závěrem

Výsledky srovnávací studie tří základních typů dvouplášťových střech vyznívají pro jednoduchou metodiku ČSN 73 0540-4 velmi pozitivně. Její výsledky mají u všech hodnocených střech pro normou požadovaný případ bezvětří spolehlivou bezpečnostní rezervu a mohou tak sloužit k bezproblémovému ověření návrhu podobných jednodušších střešních konstrukcí.

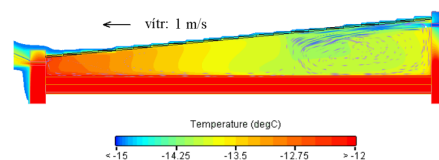
Normová metodika ovšem není zcela univerzální, jak již bylo zmíněno v úvodu. Kromě toho, že neumožňuje zohlednit prostorově složité tvary střech, vliv slunečního záření či působení výměny sáláním s oblohou, nelze s její pomocí modelovat například ani situaci, kdy je vítr orientován proti směru přirozeného proudění vzduchu ve větrané vrstvě. Jen s použitím CFD programů lze v podobných případech ověřit, jaký z faktorů působících na proudění vzduchu ve větrané vrstvě bude rozhodující (obr. 10). Bez CFD výpočtů se



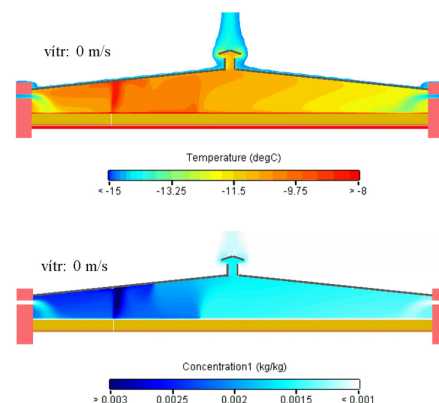
Obr. 8 Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu ve větrané vrstvě motýlkové střechy se součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m².K)



Obr. 9 Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu v motýlkové střechě se součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m².K) a s větracími otvory posunutými vertikálně o 300 mm



Obr. 10 Rozložení teplot a orientací proudění vzduchu v pultové střechě s převýšením otvorů 1 m a součinitelem prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m².K) při opačné orientaci větru



Obr. 11 Ilustrace vlivu lokálního otvoru 20 x 20 mm ve vnitřním plášti střechy s dýmníkem

nelze pustit ani do zajímavých analýz vlivu lokálních netěsností ve vnitřním plášti střech (obr. 11). To jsou však dosud skutečně spíše témata pro vědecké práce – z hlediska praktické projektové činnosti se zatím metodika ČSN 73 0540-4 jeví jako dostatečně přesný nástroj.

Literatura

- [1] ČSN 73 0549 *Tepelné technické vlastnosti konstrukcí a budov* – Výpočtové metody, ÚNM Praha 1977
- [2] ČSN 73 0540-4 *Tepelná ochrana budov* – Výpočtové metody, ČNI Praha 2005
- [3] Flovent 6.1, Flomerics PLC, Hampton Court 2005
- [4] MORTENSEN, L.H., WOLOSZYN, M., HOHOTA, R., RUSAOUE, G., CFD modelling of moisture interactions between air and constructions, *Proceedings of the 9th International IBPSA Conference – Building Simulation 2005*, Montreal 2005, Vol. II, str. 801-808
- [5] SVOBODA, Z., Využití CFD modelování při návrhu dvouplášťových střech, *Sborník příspěvků 4. národní konference SBTP 2006*, Praha 2006, str. 3-8