

Doc. Dr. Ing. Zbyněk SVOBODA

Využití CFD modelování při návrhu větrání dvouplášťových střech

CFD Simulation Utilisation for Twin-skin Roofs Ventilation Design

Recenzent
prof. Ing. František Drkal, CSc.

Autor porovnává možnosti návrhu větrání dvouplášťové střechy podle ČS 73 0540-4 a s využitím modelování CFD. Výpočty a modelová řešení rizika kondenzace vodní páry ukazují, že metodika dne ČSN poskytuje u jednodušších střešních konstrukcí výsledky s bezpečnostní rezervou. Normová metodika však nezahrnuje vliv všech faktorů působících na proudění vzduchu ve větrané mezeře – při takovém hodnocení se uplatní modelování CFD.

Klíčová slova: dvouplášťová střecha, větrání, difúze vodní páry, CFD modelování

The author compares the possibilities of twin-skin roofs ventilation design according to ČS 73 0540-4 standard with CFD simulation utilisation. The calculations and simulation solutions of the water vapours condensation risk indicate that the procedure according to ČSN standard provides results with security margin at simpler roof designs. However the standard methodology does not include the effect of all factors influencing the air flow in ventilated spacing – in such an evaluation the CFD simulation is of use.

Key words: twin-skin roof, ventilation, water vapour diffusion, CFD simulation

ÚVOD

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 projekčním úkolem. V posledních letech se u nových dvouplášťových střech velmi často objevují závažné vlhkostní poruchy, které se v dřívějších letech prakticky nevyskytovaly. Příčinou je kontinuální zvyšování požadavků na tepelnou ochranu budov, kvůli kterému 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 a s větší mírou pečlivosti než v minulosti tak, aby bylo zajištěno dokonalé větrání vzduchové vrstvy.

Pro výpočtové posouzení návrhů dvouplášťových střech se v ČR tradičně používá metodika ČSN 730540-4, která je sice poměrně jednoduchá a snadno aplikovatelná, ale na druhou stranu má řadu omezení.

ZÁKLADNÍ NORMOVÝ POPSTUP

Výpočtové posouzení tepelně vlhkostního chování dvouplášťových střech podle ČSN 73 0540-4 se provádí v několika navazujících krocích. Nejprve je třeba vytvořit 2D model větrané vzduchové vrstvy. V tomto modelu může

vzduch proudit jak svisle, tak vodorovně, ale stále jen v jedné rovině. 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. Rychlost proudění vzduchu ve výpočtu je 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 (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). Posledním krokem normové metodiky je stanovení relativní vlhkosti vzduchu ve větrané vrstvě. I zde se vychází z rovnováhy difúzních toků mířících 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).

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 modelování. Možnosti modelování jsou



Doc. Dr. Ing. Zbyněk Svoboda (1966)

Absolvent Fakulty stavební ČVUT v Praze (1991). Působí jako pedagogický a vědecký pracovník na katedře konstrukcí pozemních staveb tamtéž. Specializuje se na tepelnou ochranu budov, zvláště pak na numerické modelování šíření tepla a vodní páry. Autor řady aplikačních programů pro stavební fyziku.

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.

Další komplikací je to, že CFD programy obvykle nepočítají s difúzí vodní páry přes stavební konstrukce. Je-li cílem výpočtu stanovení pole relativních vlhkostí, musí se proto difúzní tok vodní páry přes spodní plášť modelovat ve výpočtu jako plošný vlhkostní zdroj. Tento zdroj je třeba umístit na vnější povrch spodního pláště a jeho výkon stanovit výpočtem.

To nemusí být právě 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 uspokojivě poradit. Například známý program Flovent [3] sice umožňuje zadat vlhkostní zdroj jako lineární funkci, ale využívá k tomu příliš jednoduchou rovnici

$$g_d = \beta \cdot (x_p - x_a), \quad (1)$$

která předpokládá, že teplota a relativní vlhkost vzduchu na povrchu vlhkostního zdroje je konstantní (a tedy že zadaná hodnota měrné vlhkosti vzduchu na povrchu zdroje x_p v kg/kg se nemění). To ovšem v případě dvouplášťových střešních konstrukcí není zcela korektní. U těchto konstrukcí je nutné hustotu toku vodní páry přes spodní plášť (a tedy velikost vlhkostního zdroje zatěžujícího větranou vrstvu) stanovit z obecného vztahu

$$g_d = \frac{p_i - p_a}{Z_{pl}}, \quad (2)$$

který lze dále s pomocí měrných vlhkostí vyjádřit jako

$$g_d = \frac{R_{H_2O}}{Z_{pl}} (x_i T_i \rho_i - x_a T_a \rho_a) \quad (3)$$

Ze srovnání vztahů (1) a (3) je zřejmá chybějící teplotní závislost (závislost na hustotě vzduchu by bylo možné pro běžné případy vzhledem k nevelkému významu zanedbat). Pro praktické výpočty však naštěstí není uvedená komplikace zásadní. Spokojíme-li se s výpočtem na straně bezpečnosti, lze použít jednoduchý vztah (2) a za parametry vzduchu ve větrané vrstvě dosadit parametry venkovního prostředí. Jak ukazuje tab. 1, nejsou rozdíly mezi reálně možnými hustotami difúzního toku do větrané vrstvy v obvyklých případech příliš velké (pro uvažovanou běžnou dvouplášťovou střechu max. 8 %). Zbývá dodat, že vztah (2) platí za předpokladu, že ve spodním plášti nedochází ke kondenzaci vodních par, což lze prakticky bez výjimek snadno splnit.

Tab. 1 Hustota difúzního toku vodní páry do větrané vrstvy spodním pláštěm s difúzním odporem $2,7 \cdot 10^{10}$ m/s (železobetonová deska 200 mm) při běžných parametrech vnitřního vzduchu (20 °C, 50 %)

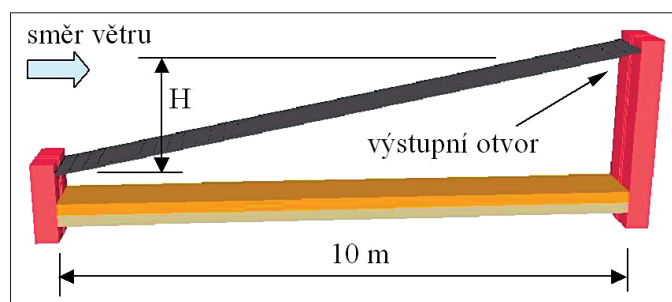
Teplota ve větrané vrstvě [°C]	Rel. vlhkost ve větrané vrstvě [%]	Hustota dif. toku vodní páry do větrané vrstvy [kg/(m ² ·s)]
-12	90	$3,9 \cdot 10^{-8}$
	80	$4,0 \cdot 10^{-8}$
	70	$4,1 \cdot 10^{-8}$
-15	90	$4,1 \cdot 10^{-8}$
	80	$4,1 \cdot 10^{-8}$
	70	$4,2 \cdot 10^{-8}$

Hustotu toku vodní páry z větrané vrstvy přes horní plášť do exteriéru lze obvykle zanedbat vzhledem k většinou velmi vysokému difúznímu 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 střešních konstrukcí. V této souvislosti je samozřejmě velmi zajímavé, jaké lze očekávat rozdíly ve výsledcích dosažených CFD výpočtem a standardní normovou metodikou.

POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ 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. 1). Tepelně vlhkostní chování této střechy závisí především na tepelném odporu spodního pláště, na převýšení větracích otvorů a na rychlosti větru.



Obr. 1 Modelová pultová střecha

V parametrické studii byla uvažována pro všechny varianty jednotná geometrie větrané vrstvy i jednotná velikost větracích otvorů (100 x 100 mm v osové vzdálenosti 1 m). Shodné byly i okrajové podmínky (vnitřní vzduch 21 °C a 50 %, vnější vzduch –15 °C a 84 %). Proměnný byl tepelný odpor spodního pláště a převýšení větracích otvorů. Ty byly předpokládány zcela volné, aby se předešlo rozdílu způsobeným odlišným modelováním vřazených otvorů (sítky, mřížky).

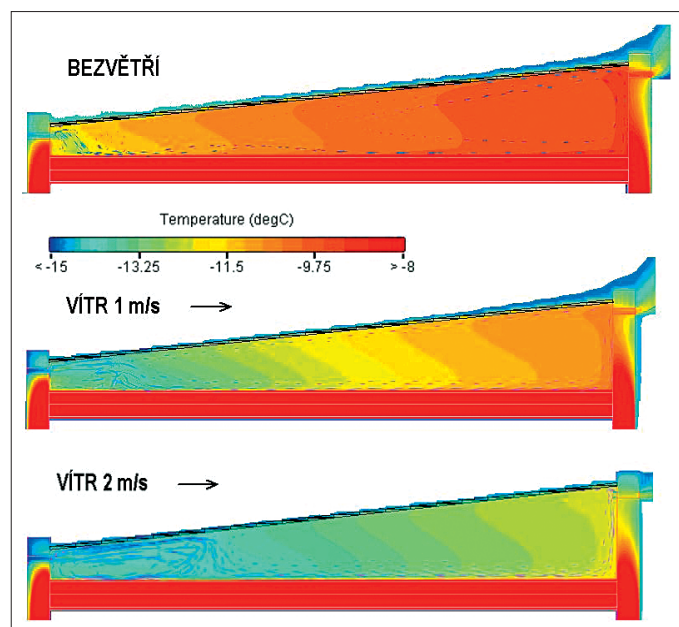
Sledována byla teplota a relativní vlhkost vzduchu před výstupním otvorem. Výsledky srovnávací analýzy jsou shrnuty v tab. 2. Je zřejmé, že ve většině případů poskytuje normová metodika výsledky na straně bezpečnosti výpočtu. Zvláště to pak platí o případech bezvětrí. Na druhou stranu lze naopak očekávat, 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 rozdílu ve výsledcích pro případy bezvětrí jsou pravděpodobně způsobeny tím, že normový postup nijak nezohledňuje vedení tepla do svislé atiky, což se projevuje nejvíce u slabého proudění vzduchu dutinou. Svou roli samozřejmě sehrává i to, že v ČSN 73 0540-4 je zanedbán skutečný charakter proudění vzduchu ve větrané vrstvě, který je velmi dobře vidět na obr. 2.

Podobné shody a rozdíly jako pro pultovou střechu lze vysledovat i pro další základní typ dvouplášťových střešních konstrukcí – pro střechu s průběžným středovým dýmníkem (obr. 3), 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. 4).

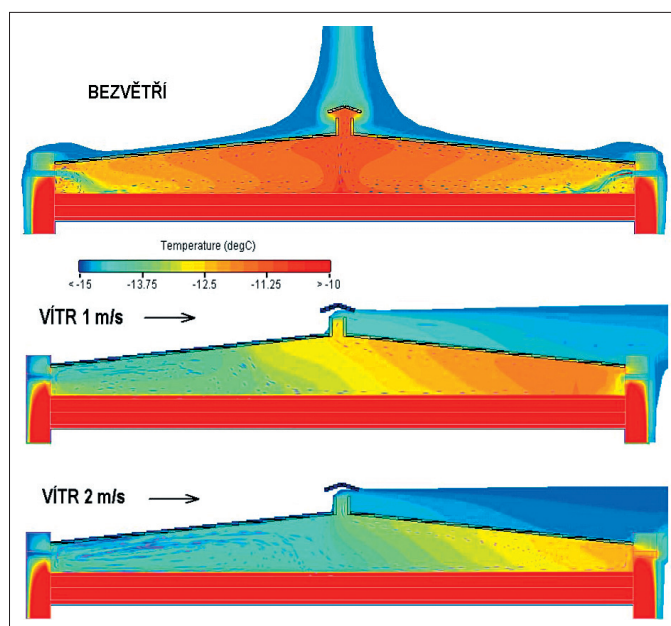
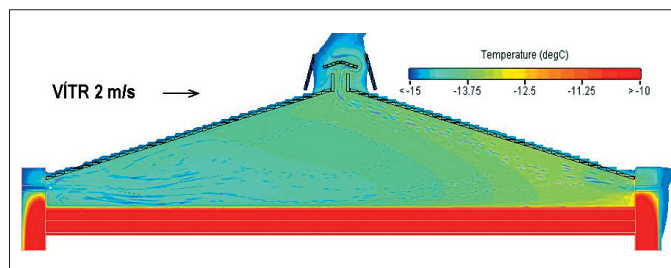
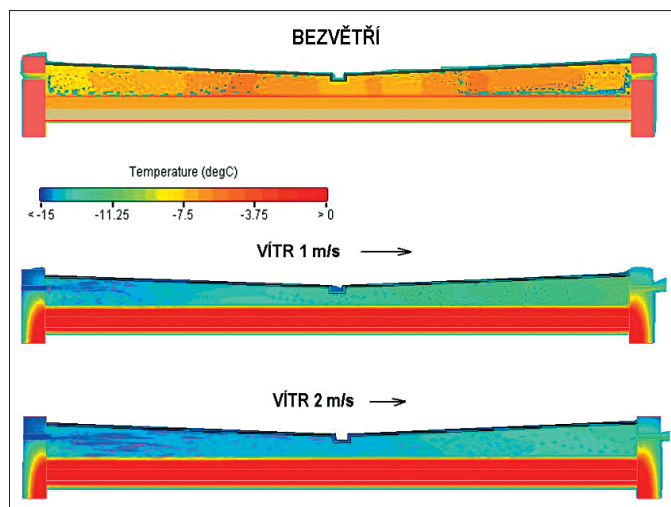
Tab. 2 Výsledky srovnávacího výpočtu CFD/ČSN pro pultovou střechu

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


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

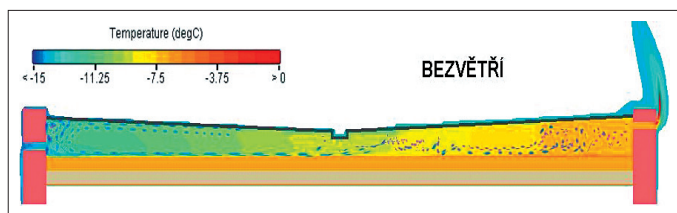
Podívejme se ještě závěrem srovnávací studie na poslední častější typ dvouplášťové střechy. Jedná se o tzv. motýlkovou střechu, která patří z hlediska větrání mezi dosti problematická řešení a většinou odborníků není doporučována. Z obr. 5 je jasné patrné, proč je tomu tak. Za bezvětrí se totiž tato 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, jakmi-


Obr. 3 Rozložení teplot a směr 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. 4 Rozložení teplot a směr proudění vzduchu ve větrané vrstvě střechy s dýmníkem opatřeným bočními krycími deskami (převýšení otvorů 2 m, souč. prostupu tepla 0,2 W/(m².K))

Obr. 5 Rozložení teplot a směr proudění vzduchu ve větrané vrstvě motýlkové střechy se souč. prostupu tepla spodního pláště 0,2 W/(m².K)

le 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 bezvětrí tím, že od sebe mírně vertikálně posunou protilehlé větrací otvory. Toto posunutí nemůže být obvykle příliš velké, nicméně výsledky CFD analýzy ukazují, že i to může pomoci (obr. 6). Vždy samozřejmě záleží na konkrétní situaci, protože velmi významnou roli hraje skladba střechy,

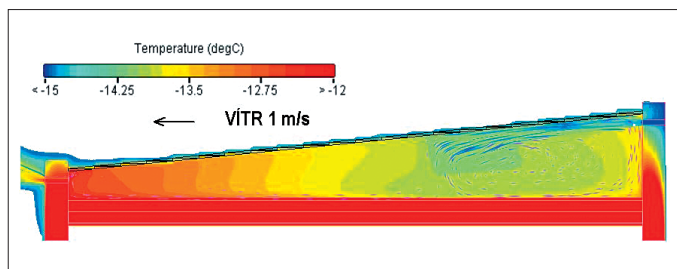


Obr. 6 Rozložení teplot a směr proudění vzduchu ve větrané vrstvě motýlkové střechy se souč. prostupu tepla spodního pláště $0,2 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ a s větracími otvory posunutými o 300 mm

vzdálenost mezi větracími otvory 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 konkrétně posouzena, jak bude ještě ukázáno v závěru příspěvku.

Závěry 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 bezvětrí 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 příspěvku. Kromě toho, že nezohledňuje vliv slunečního záření či působení výměny sáláním s oblohou, nelze s ní modelovat ani situaci, kdy je vítr orientován proti směru přirozeného proudění vzduchu ve větrané vrstvě. V podobných případech je CFD modelování neocenitelným pomocníkem. Jen s použitím CFD programů lze například ověřit, jaký z faktorů působících na proudění vzduchu ve větrané vrstvě bude rozhodující (obr. 7).

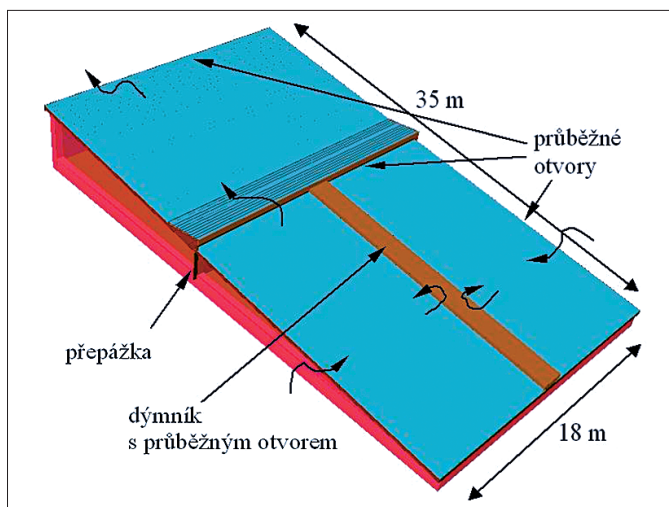


Obr. 7 Rozložení teplot a směr proudění vzduchu v pultové střeše s převýšením otvorů 1 m a souč. prostupu tepla spodního pláště $0,2 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ při opačné orientaci větru

VYUŽITÍ CFD VÝPOČTŮ PŘI NÁVRHU STŘECHY PLAVECKÉHO BAZÉNU

Nedostatkem normové metodiky je také to, že s ní nelze dostatečně přesně posoudit střechy, v nichž proudí vzduch skutečně všemi třemi směry. Typickým příkladem takové střechy je nedávno projektovaná dvouplášťová střešní konstrukce krytého plaveckého bazénu (obr. 8). Finální návrh – v podstatě intuitivně vytvořený projektantem – byl s pomocí CFD výpočtu prověřen teprve následně. Pro srovnání byly rovněž vyhodnoceny i ostatní původně uvažované varianty řešení střechy.

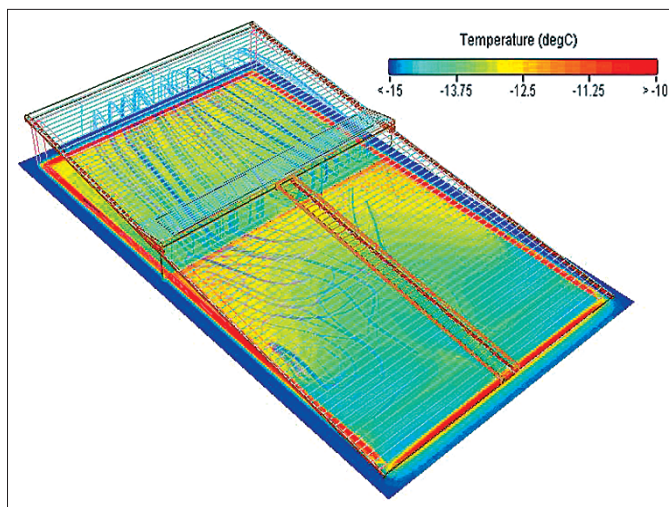
Ve výpočtu byl uvažován navržený spodní plášť s difúzním odporem $8,6 \cdot 10^{12} \text{ m/s}$ a s tepelným odporem $5,0 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ (hodnota sice nesplňuje požadavek ČSN 73 0540-2, ale to je nicméně z hlediska vlhkostního chování dvouplášťové střechy příznivější – vzduch ve větrané vrstvě bude teplejší a pohltí více vodní páry). Při hodnocení finální verze střechy byl zohledněn orientačně i vliv případných netěsností v parozábraně redukcí jejího difúzního odporu na 10 % laboratorní hodnoty. Hustota toku vodní páry přes spodní plášť do větrané vrstvy byla uvažována $4,0 \cdot 10^{-10} \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ pro stav s těsnou parozábranou a $3,9 \cdot 10^{-9} \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ pro variantu



Obr. 8 Střecha plaveckého bazénu s vyznačením směru proudění vzduchu předpokládaných projektem

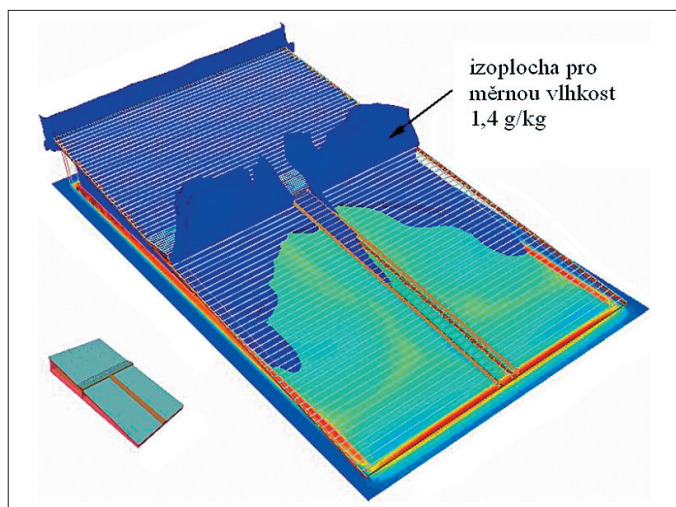
s mírně netěsnou parozábranou (obě hodnoty byly stanoveny pro vnitřní vzduch o teplotě $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti 85 %). Posouzení bylo provedeno pro teplotu venkovního vzduchu $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost 84 %.

Na obr. 9 je vidět výsledné teplotní pole ve vodorovné rovině 500 mm nad úrovní tepelné izolace (a orientačně také směry proudění vzduchu) pro finální návrh střechy. Maximální relativní vlhkost ve větrané vrstvě vyšla velmi pozitivně v rozmezí od 72 do 79 % (podle těsnosti parozábrany). Proudění vzduchu ve větrané vrstvě spodní části střechy nicméně neprobíhá podle předpokladů projektanta – vzduch ze spodní úrovně spíše stopupá ve směru podélné osy střechy, než aby odcházel středovým dýmníkem v jeho spodní části. Celkově je ale spodní část střechy větrána lépe než část horní, která se vyznačuje poměrně vysokou vzduchovou vrstvou a nepřilži výhodným umístěním vstupních větracích otvorů.

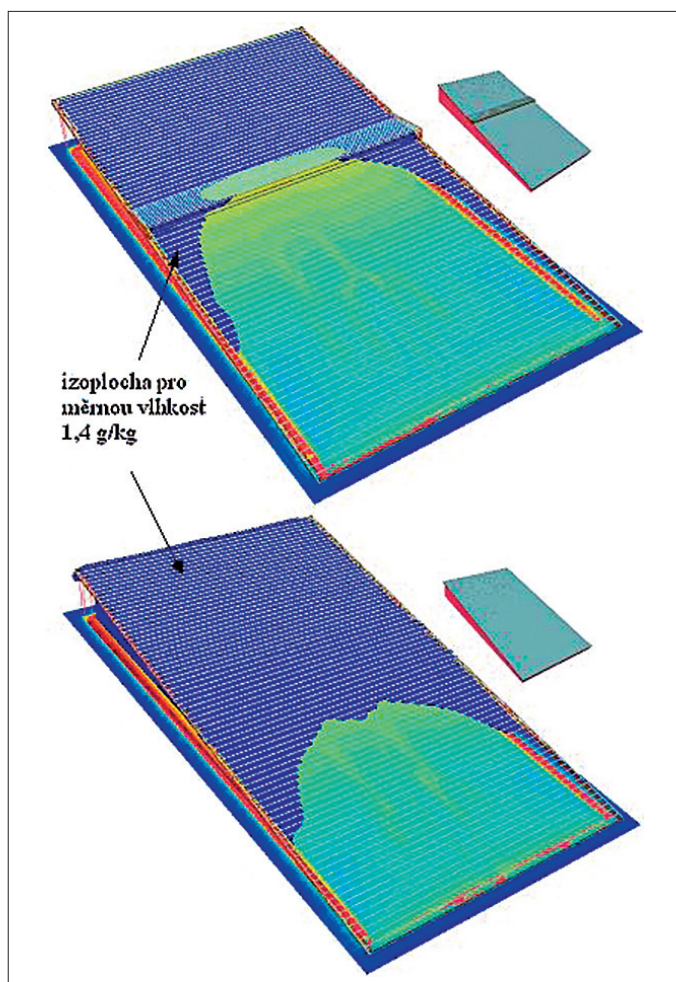


Obr. 9 Směr proudění vzduchu a teplotní pole v úrovni 500 mm nad spodním pláštěm ve střeše bazénu za bezvětrí

Přepážka, navržená mezi spodní a horní částí střechy, se ukázala jako velmi pozitivní opatření. Pokud by nebyla provedena, střecha by sice za předpokladu dokonale těsné parozábrany fungovala také vyhovujícím způsobem (maximální relativní vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě 86 %), ale jakmile by parozábrana byla již jen mírně netěsná, situace by byla podstatně horší. Relativní vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě by dosáhla ve značné části střechy 100 % a střecha by byla tedy ohrožena kondenzací vodní páry (obr. 10). Příčinou je pravděpodobně to, že podélný dýmník není ve spodní části funkční a vzduch z této části střechy proudí až do části horní a přináší tam vodní páru (obr. 11). Podobně nevyhovující stav nastane do



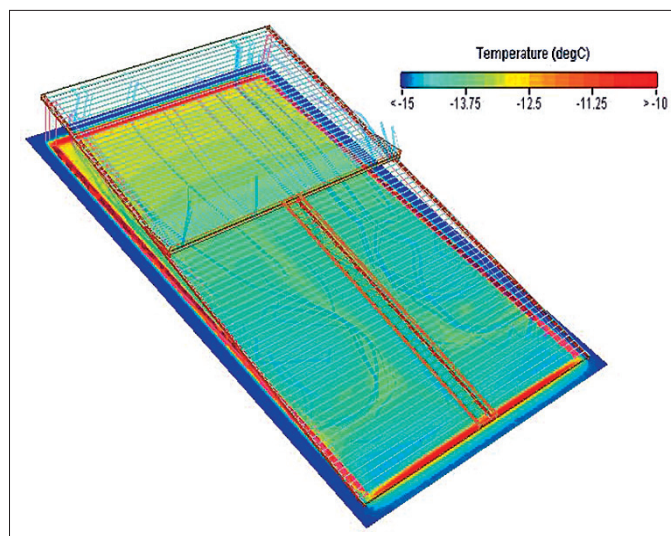
Obr. 10 Rozsah zóny s příliš vysokou vlhkostí vzduchu u střešy bez přepážky s mírně netěsnou parozábranou za bezvětrí



Obr. 12 Rozsah zóny s příliš vysokou vlhkostí vzduchu u původních variant střešy za bezvětrí (stav s dokonale těsnou parozábranou)

konce i s dokonale těsnou parozábranou u střešy bez podélného dýmníku a samozřejmě i u střešy jednoduchého pultového typu (obr. 12). Na všech grafických výstupech je znázorněna zóna s měrnou vlhkostí vzduchu nad 1,4 g/kg. To je totiž zhruba hranice, od které hrozí při daných teplotách vzduchu ve větrané vrstvě jeho nasycení.

Z výsledků posouzení tedy vyplývá, že finální návrh řešení střešní konstrukce je skutečně tou nejlepší variantou z uvažovaných možností. Intuice zkušeného projektanta byla v tomto případě evidentně správná.



Obr. 11 Směr proudění vzduchu a teplotní pole v úrovni 500 mm nad spodním pláštěm ve střeše bazénu bez přepážky za bezvětrí

ZÁVĚREM

Moderní CFD programy jsou ve stavební praxi stále více používány, a to i u nás. Většina CFD analýz se sice dosud zaměřuje na oblast techniky prostředí, ale podrobné výpočty proudění vzduchu a šíření tepla nalézají své uplatnění i při návrhu samotných stavebních konstrukcí.

Nejcennější pomoc mohou CFD výpočty poskytnout projektantům během ověřování návrhů složitých dvouplášťových konstrukcí – tedy stěn a střeš s větranou vzduchovou vrstvou. Přes drobné komplikace lze stávající CFD programy k tomuto účelu s výhodou použít a rozšířit tak záběr výpočtového hodnocení i na konstrukce, jejichž hodnocení nemůže postihnout jednoduchá metodika ČSN 73 0540-4.

Tento článek byl podpořen výzkumným záměrem MSM 6840770005.

Kontakt na autora: svoboda.zbynek@quick.cz

Použité zdroje:

- [1] ČSN 73 0549: 1977. Tepelné technické vlastnosti konstrukcí a budov – Výpočtové metody. Praha: ÚNM.
- [2] ČSN 73 0540-4: 2005. Tepelná ochrana budov – Výpočtové metody. Praha: ČNI, 2005.
- [3] Flomerics Ltd. Flovent 6.1.

Přehled označení

- g_d hustota difúzního toku vodní páry [kg/(m²·s)]
- p_i parciální tlak vodní páry ve vnitřním vzduchu [Pa]
- p_a parciální tlak vodní páry ve větrané vrstvě [Pa]
- R_{H_2O} plynová konstanta vodní páry [J/(kg·K)]
- T_a absolutní teplota vzduchu ve větrané vrstvě [K]
- T_i absolutní teplota vnitřního vzduchu [K]
- x_a měrná vlhkost vzduchu ve větrané vrstvě [kg/kg]
- x_i měrná vlhkost vnitřního vzduchu [kg/kg]
- x_p dtto na horním líci spodního pláště [kg/kg]
- Z_{pl} difúzní odpor vnitřního pláště [m/s]
- β součinitel přestupu vodní páry [kg/(m²·s)]
- ρ_a hustota vzduchu ve větrané vrstvě [kg/m³]
- ρ_i hustota vnitřního vzduchu [kg/m³]