

ASSESSMENT OF HANGARS FOR CIVIL AIRPLANES UNDER WIND FLOW WITH RESPECT TO RESISTANCE AND STRUCTURE STABILITY

R. Král, S. Pospíšil, J. Náprstek ¹

Summary: *The paper assess a behavior and an impact of the air flow on two hangar buildings. For the first hangar the investigation was carried out using both wind tunnel testing and computational fluid dynamics (CFD). In case of the second one only the computation approach was applied. Its primary aim was to determine the pressure field on the building surfaces. Special attention was devoted to the roofing constructions. The bearing steel roof arch with tendons of the first hangar can have considerable influence on the loading and stability of the suspended roof. The second hangar is in comparison with the foregoing one slightly smaller and a solid roof structure is composed of trelliswork arches. Computation and measurement were performed for several configurations of the hangars depending on the position of the entrance gates and the wind flow direction. Experimental data were compared with results of numerical analysis, that has been based on the so-called stabilized Navier-Stokes equations. The stabilization was ensured by means of the Galerkin-Least square method implemented into the open code COMSOL. Very good agreement between the experiment and the numerical model has been achieved. Both used aerodynamic techniques proved, that the resulting pressure values do not exceed the design limits.*

1. Úvod

Začlenění účinku větru na konstrukci zastává důležitou úlohu při stanovení celkového zatížení stavebního objektu a jeho odezvy. Tlak, jakožto produkt působícího větru na povrch konstrukce, nabývá jak kladných tak záporných hodnot [1]. Jeho velikost je závislá mimo jiné na geometrii posuzovaného objektu, směru a rychlosti působícího větru. Pro jednoduché, frekventované stavby lze zatížení větrem poměrně přesně určit z normy nebo odpovídající příručky [2]. U staveb, které se svými vlastnostmi vymykají normativním kritériím (velké rozměry, atypický tvar, umístění stavby), je nutné zvláštní odborné posouzení zahrnující aerodynamické zkoušky. Standardním nástrojem ke stanovení tlaků na jednotlivé části povrchu objektu se pak s výhodou využívá geometricky podobných modelů umístěných v aerodynamickém tunelu. Jako určitou alternativou ke zkoušce ve větrném tunelu může sloužit numerická simulace proudění. S rozvojem výpočetní techniky a numerických metod je nyní možné vyšetřovat obtékání tvarově složitých konstrukcí pomocí numerického modelu v reálném měřítku. Nicméně, vzhledem k

¹ Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Prosecká 76, 190 00 Prague 9, e-mail kral@itam.cas.cz

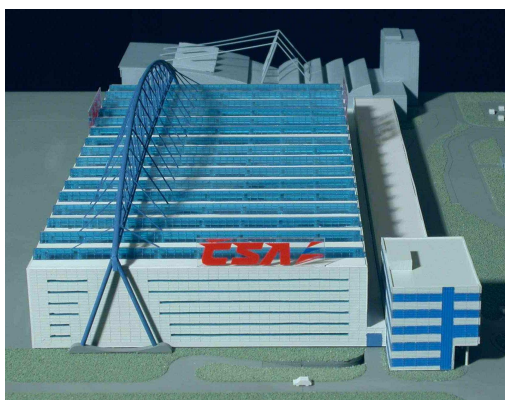
nedokonalostem simulace turbulentního proudění (nestabilita aerodynamických rovnic) [3] a z toho plynoucí nejistoty správného řešení je vhodné provést zkoušku v tunelu společně s numerickou simulací. Touto kombinací získáme velice účinný nástroj, jenž redukuje nedokonalost modelového řešení v tunelu a případnou nedostatečnost řešení numerického modelu.

Tento článek se zabývá posouzením dvou typů hangárů na účinky větru. V prvním případě se jedná o pozemní stavbu ve tvaru kvádrů o značných půdorysných rozměrech. Hlavní nosný prvek zastřešení tvoří ocelový oblouk, klenoucí se v podélném směru budovy se vzepětím cca 20 m. U druhého typu hangáru podobného tvaru je zvolena samonosná oblouková střecha. Vzhledem k rozměrům objektů a v prvním případě také netradičně řešenému zastřešení považujeme objekty jako atypické a tudíž je žádoucí vyšetřit účinky větru pomocí výše uvedených aerodynamických zkoušek.

2. Popis konstrukce hangárů

2.1 První typ hangáru

Plánovaný hangár na území Ruzyňského letiště je navržený ve tvaru kvádrů o velikosti $180 \times 80 \times 27$ m, jenž je schopen pojmout od tří letadel typu Boeing 777 až po osm letadel značky Airbus 321, viz. Obr. 1. Přes velké rozměry se podařilo díky zvolenému konstrukčnímu systému zastřešení vytvořit plnohodnotný prostor bez vnitřních podpěrných sloupů [4]. Tím se nejen významně sníží náklady na výstavbu objektu, ale především se docílí volného pojezdu a stání letadel. Téměř po celé délce hangáru jsou navržena dělená průjezdná vrata, jež lze otevřít v sedmi možných variantách. V těsné blízkosti hangáru se nachází objekty sloužící k jeho provozu. V následující analýze jsou však záměrně vypuštěny.

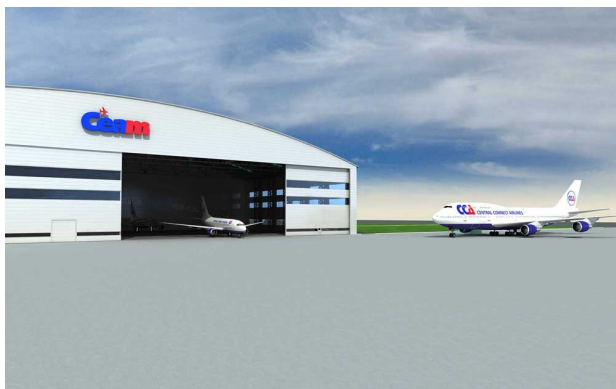


Obr. 1 Maketa plánovaného ruzyňského hangáru.

2.2 Druhý typ hangáru

Druhý typ hangáru s rozměry $147 \times 80 \times 34.5$ m se řadí mezi hangáry klasického tvaru. Je projektovaný v blízkosti areálu Letiště Ostrava-Mošnov jako halová konstrukce s obloukovou střechou, viz. Obr. 2. Bude sloužit pro účely technicky náročné i lehké opravárenství a údržbu letadel.

Nová opravárenská základna pro velkokapacitní dopravní letouny bude schopna pojmout v jednu chvíli dva letouny Boeing 747, jeden stroj třídy MD11 plus několik menších letadel. Vrata, podobně jako u prvního typu hangáru, jsou posuvné ve třech variantách. Střešní obloukové příhradové nosníky, tvořící hlavní nosný prvek zastřešení, jsou uloženy rovnoběžně s podélnou osou objektu. Vzepětí oblouků činí 12 m. K budově hangáru jsou připojeny kancelářské prostory, jednací místnosti, přednáškové sály a obchody. Ty jsou v následující části příspěvku zanedbány.



Obr. 2 Počítačový návrh vzhledu hangáru v Mošnově.

3. Experimentální a numerické posouzení hangárů

Posuzované hangáry jsou si tvarově podobné. V obou případech se jedná o halové konstrukce velkých rozměrů s převládajícím jedním rozměrem nad ostatními. Zásadní rozdíl však spočívá v zastřešení. V první případě je plochá střecha s minimálním sklonem zavěšena ocelovými táhly ke střešnímu oblouku. Lze předpokládat, že jeho přítomnost může výrazně negativně ovlivnit účinek větrného proudu na jinak flexibilní konstrukci střešního pláště.

Pro první typ jsou nepříznivé především ty kombinace zatížení, při kterých je střešní plášť účinkem větru nadlehčován. Předepnutá táhla vnášejí vnitřní síly do střešního oblouku a stabilizují ho proti působení vertikálních sil. Dojde-li k nadměrnému nadlehčení střešního pláště, hrozí riziko vybočení oblouku s následkem ztráty stability celého zastřešení. Střešní konstrukce u druhého typu hangáru je z hlediska statického v porovnání s prvním typem tužší a vzhledem ke svému tvaru lépe odolává zatížení větrem.

Zatímco u většiny pozemních staveb se stanovuje účinek větru jen na svrchní plášť objektu (obálka), zde je nutno brát zřetel také na provozní podmínky hangárů. Při otevřených vjezdových vratech vniká větrný proud do vnitřních prostor objektu. Zde podle směru větru vzniká budpřetlak, nebo podtlak. Vrata lze tedy charakterizovat jako tzv. otevřenou stěnu, kde se výsledné zatížení z účinku větru na konstrukci stanovuje jako součet tlaků (sání) na vnitřním a vnějším povrchu hangáru.

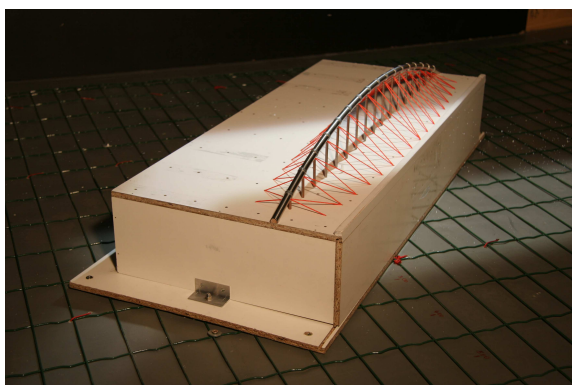
3.1 První typ hangáru

Posouzení ruzyňského hangáru na působení větru je provedeno jak pomocí experimentu ve větrném tunelu, tak numerickým výpočtem. Bylo třeba zvážit, v jaké možné kombinaci směru větru a variantě otevření vrat nastane nejnepříznivější stav zatížení. Z několika desítek možných kombinací jsou vybrány a vyšetřeny ty, jenž se jeví jako nebezpečné.

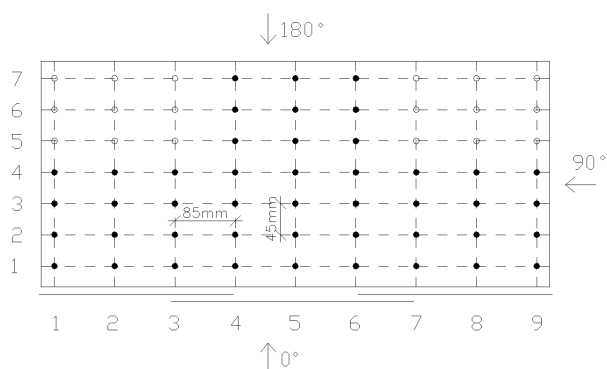
- aerodynamická zkouška ve větrném tunelu

Měření tlaků na povrchu aerodynamického modelu hangáru společně s vizualizací proudění bylo provedeno ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu v Letňanech. Model vytvořený v měřítku 1 : 200 byl umístěn do měřicí sekce větrného tunelu s otočným stolem. Podlaha tunelu určena pro vývoj mezní vrstvy byla pokryta ocelovým pletivem, viz. Obr. 3a, jehož struktura odpovídala odvozenému parametru drsnosti terénu na hodnotu $z_0 = 0,22 \text{ mm}$. Délka turbulence ve směru větru byla $L_{u,x} = 0,46 \text{ m}$. Uvedené hodnoty měly za cíl v co nejvyšší míře respektovat charakteristiky skutečného proudu větru a imitovat okolní terén hangáru. Měření bylo provedeno pro rychlost větru 12 m s^{-1} , přičemž režim obtékání hangáru je určen Reynoldsovým číslem v hodnotě okolo 10^5 .

a)



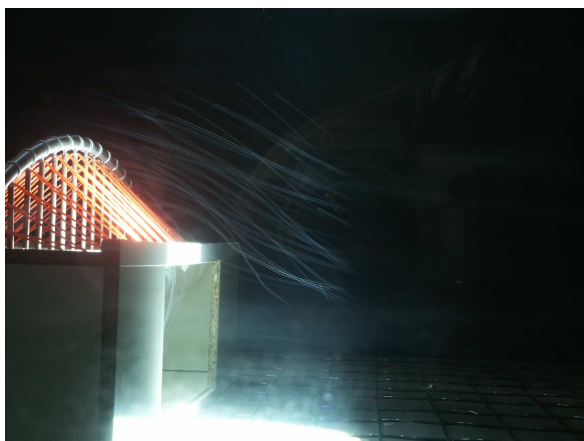
b)



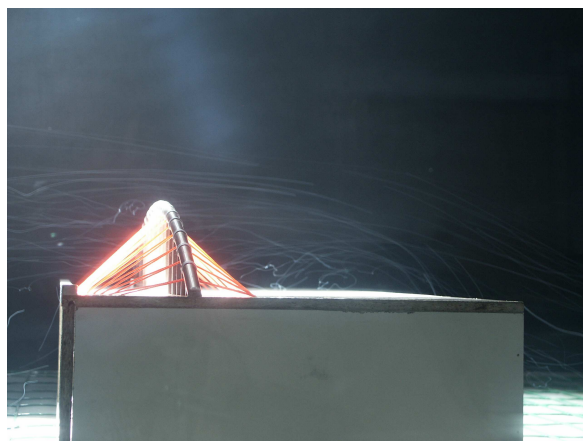
Obr. 3 Pohled na repliku hangáru v měřítku 1:200, umístěnou ve větrném tunelu - pletivo jako generátor mezní vrstvy (a); - síť měřených bodů na střešním pláště hangáru (b).

Cílem experimentu bylo stanovit tlakové pole na střeše modelu. Jako součást simulace s využitím vizualizační techniky byla zkoumána možnost vzniku periodické síly vyvolané odtrháváním vírů. Obr. 3b ukazuje schéma měřících bodů střešního pláště. K měření tlaků bylo použito citlivých tlakových senzorů značky Honeywell pevně uchycených na jedné z vnitřních ploch modelu. Spojení mezi primárními vstupy jednotlivých senzorů a měřícími body na povrchu střešního pláště bylo zajištěno pomocí vinylových trubic. Podobným způsobem se propojily sekundární vstupy senzorů se sondou měřící statický tlak uvnitř tunelu. Všechny signály byly zesíleny a zpracovány na přenosném počítači s AD převodníkovou kartou a později převedeny do tvaru lokálních aerodynamických koeficientů.

a)



b)



Obr. 4 Vizualizace proudění; - bílé čáry značí trajektorie proudu kolem hangáru s otevřenými středovými vraty na návětrné straně (a), - závětrné straně (b).

Aerodynamická zkouška se nejprve provedla pro tři varianty otevření při základním směru větru, přičemž u první varianty byla otevřena velká středová vrata, u druhé malá krajní a nakonec velká krajní vrata. Tento postup se systematicky prováděl pro úhly náběhu větru 45, 90 a 180 stupňů. Každé měření bylo zaznamenáno po dobu 20 s. Následně se do tunelu instalovala vizualizační technika. Před model se umístil generátor bublin z vodní emulze a sledovalo se jejich chování. Obr. 4a, (b) zachycuje trajektorie proudění kolem otevřeného hangáru s vraty na návětrné (závětrné) straně. Z obrázku 4a je patrné, že hlavní proud zvedající se nad střechu modelu naráží na konstrukci střešního oblouku a za ním je již chování proudu nepravidelné až chaotické. Dále

bylo pozorováno, že i když byla návětrná stěna tzv. otevřená, jen velmi malé množství bublin vniklo přes vstupní vrata do vnitřního prostoru hangáru. Avšak z videozáznamu byly znatelné případy, kdy trajektorie bubliny vedla do vnitřního prostoru a poté ho zase skrz otvor opustila.

- aerodynamická zkouška pomocí numerického modelu

Podobně, jako v případě modelové zkoušky ve větrném tunelu, byly vytvořeny tři numerické modely hangáru. K simulaci proudění bylo využito prostředí komerčního softwaru COMSOL, modifikovaného podle vlastní procedury [5]. Chování tekutiny se řídilo upravenou Navier-Stokesovou rovnicí pro nestlačitelnou tekutinu. Numerická nestabilita řešení nelineárních rovnic byla eliminována pomocí kombinace Galerkinovy variační metody a metody nejmenších čtverců [6], [7]:

$$\int \left(\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \left[(-p) \mathbf{I} + \eta (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \rho ((\mathbf{u}) \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) d\Omega +$$

$$+ \sum_{e=1}^{n_{el}} \int \left(\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \eta \Delta \mathbf{u} + \rho ((\mathbf{u}) \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p \right) \tau \left(-\eta \Delta \hat{\mathbf{u}} + \rho ((\mathbf{u}) \cdot \nabla) \hat{\mathbf{u}} + \nabla \hat{p} \right) d\Omega =$$

$$= \int \hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{h} d\partial\Omega \quad (1)$$

$$- \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

kde

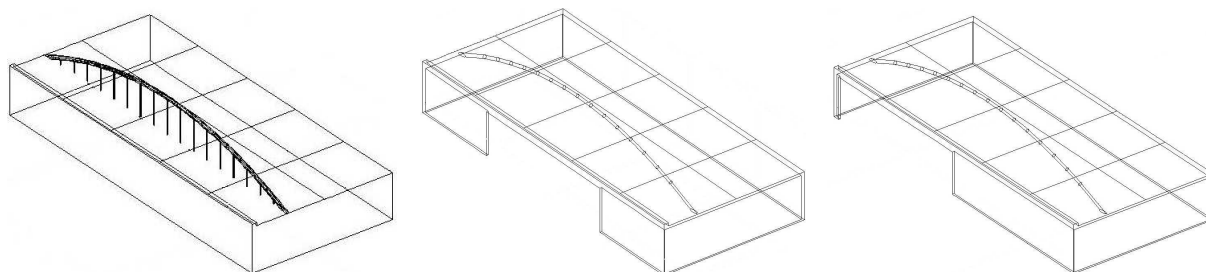
- ρ - hustota vzduchu;
- $\mathbf{u} = \{u, v, w\}^T$ - rychlost vzduchu vzhledem k souřadnicím x, y, z ;
- p - tlak;
- η - dynamická viskozita a $\mathbf{I}$ značí jednotkovou diagonální matici.

Stabilizační parametr τ , jehož hodnota vyjadřuje podíl metody nejmenších čtverců na řešení soustavy rovnic, je ve tvaru

$$\tau = \left(\left(\frac{1}{\theta \Delta t} \right)^2 + \left(\frac{2\|\mathbf{u}\|}{h} \right)^2 + 9 \left(\frac{4\nu}{h^2} \right)^2 \right)^{-1/2}, \quad (3)$$

kde ν je kinematická viskozita, Δt a h časový krok a velikost prvku. Hodnota parametru θ závisí na zvolené metodě časové diskretizace.

S ohledem na velikost objektu a rychlost proudění větru byla zvolena délka simulace po dobu 60 vteřin. Během tohoto časového úseku se postupně formovaly tlaky na površích hangáru, ovlivněny pravidelným oddělováním vírů.



Obr. 5 Tři typy numerických modelů hangáru.

Na Obr. 5 jsou vykresleny varianty tří modelů, které byly podrobeny numerickému posouzení. Okrajové podmínky výpočetní oblasti byly splněny následovně:

- vstup: rychlostní profil hladkého proudu U
- výstup: tlak $p_0 = 0$
- povrchy: $\mathbf{u} = \mathbf{0}$
- ostatní: neutrální

Rychlostní profil je stanoven podle [8] s tím, že

$$U = u^* \times \left(\frac{h}{10} \right)^{0.32}, \quad (4)$$

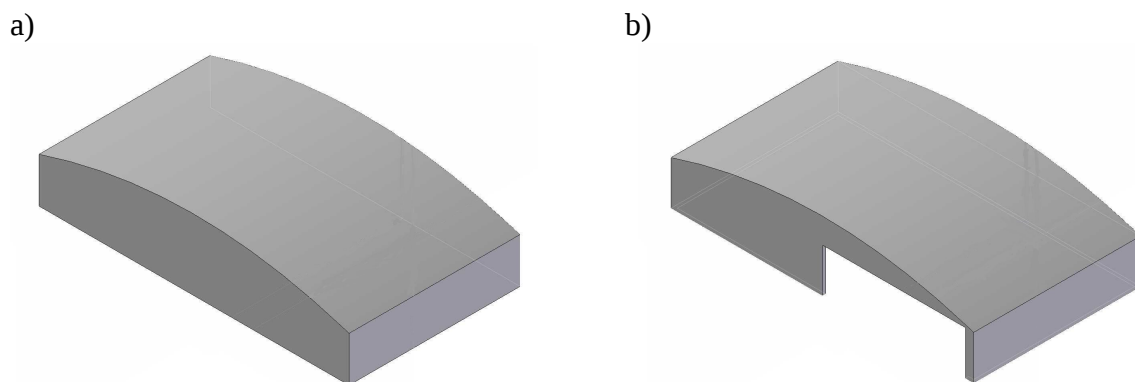
kde $u^* = 30 \text{ m s}^{-1}$ je referenční rychlost.

Výpočtová oblast byla dělena pomocí nestrukturovaných prvků Lagrangeova typu s proměnnou velikostí. V okolí konstrukce hangáru velikost prvků nepřekročila hodnotu 2.5 m , průměrný počet stupňů volnosti se pohyboval kolem čísla 400 000.

3.2 Druhý typ hangáru

Pro tento typ hangáru se účinky větru vyšetřovaly jen s využitím numerického modelu. Důvodem tohoto rozhodnutí byl v první řadě nedostatek času, potřebný pro výrobu aerodynamického modelu a provedení tunelové zkoušky. Nicméně, posouzení tohoto hangáru bylo vypracováno v době, kdy autoři již byli seznámeni s výsledky srovnání numerického modelu a experimentu u ruzyňského hangáru.

Numerická simulace proudění byla realizována ve stejném výpočtovém prostředí jako u prvního hangáru, viz. odst. 3.1. Byly aplikovány shodné výpočtové metody, okrajové podmínky, směry působícího větru na budovu i struktura dělení oblasti na konečné prvky. Obr. 6 zachycuje numerický model mošnovského hangáru ve dvou variantách, a to uzavřený, Obr. 6a, a s otevřenými levými vraty, Obr. 6b.



Obr. 6 Dva typy numerických modelů mošnovského hangáru.

Hlavní pozornost byla opět kladena na stanovení účinků větru na střešní konstrukci. Zatížení, vyvolané působením větru, nesmělo překročit hodnoty stanovené projektovou dokumentací. Pro tento typ konstrukce byla nepříznivá výsledná reakce od tlaku větru ve směru tíhového zrychlení. Bylo také nutné zvážit současnost působení zatížení větrem s jiným nahodilým zatížením.

4. Srovnání experimentu s výsledky z numerického modelu

Z provedených aerodynamických zkoušek hangárů jsou v příspěvku prezentovány jen ty, které se řadí mezi zatěžovací stavy kritické. Jak již bylo uvedeno výše, jedná se o takové kombinace směrů větru a poloh vrat, u nichž dochází v případě ruzyňského hangáru k nadlehčení ploché

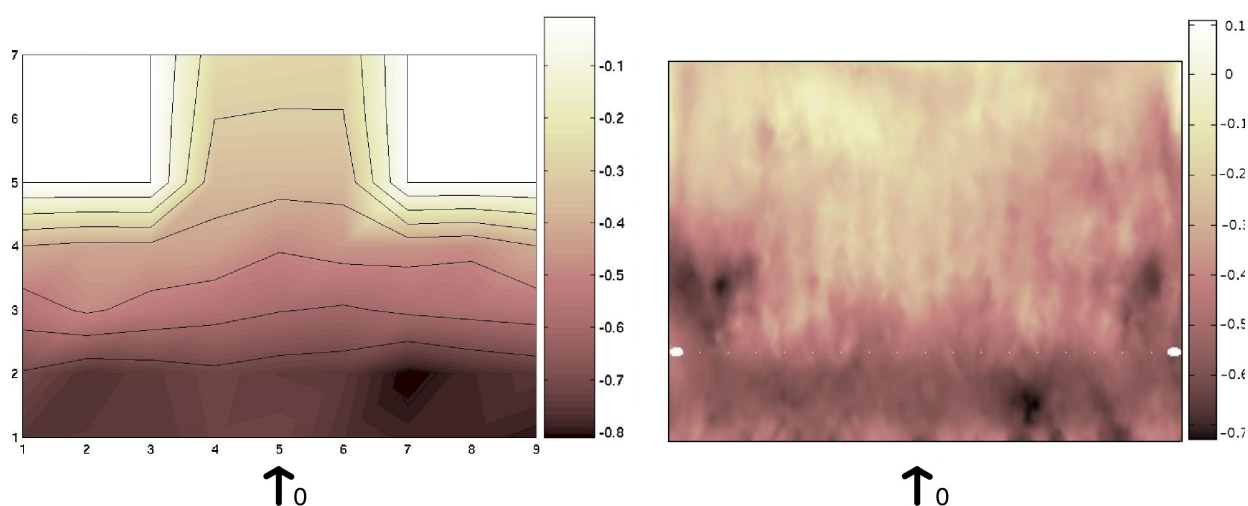
střechy. Naopak u mošnovského hangáru jsou uvedeny případy, kdy je střešní konstrukce tlačena k zemi.

4.1 První typ hangáru

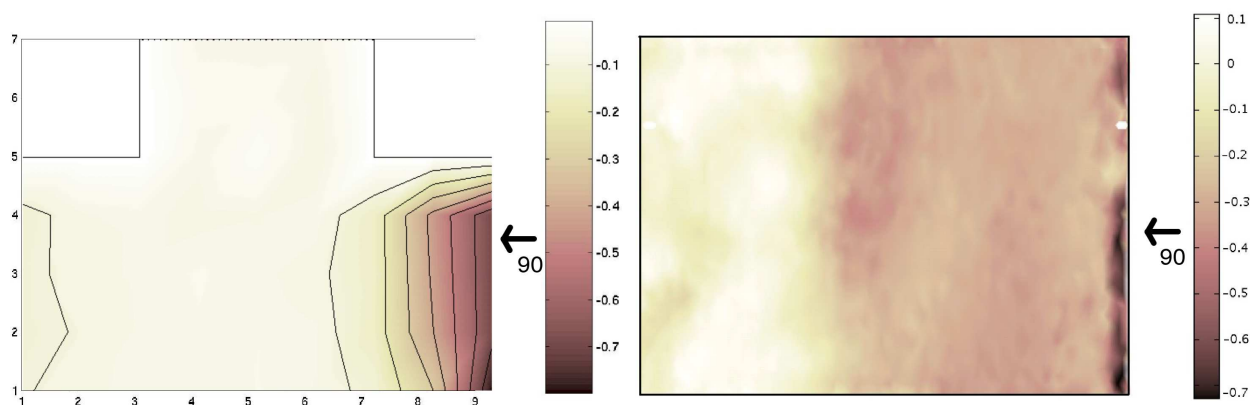
Obr. 7 až 9 ukazují tlakové pole na vnějším plášti střechy pro různé směry větru při otevřených středových vratech. Na pravé straně jsou znázorněny výsledky z experimentu v tunelu, levá strana prezentuje výpočty z numerického modelu. Vzhledem k tomu, že měření v tunelu bylo provedeno jen v určitých místech modelu, jsou horní pravé a levé rohy obrázků bezpředmětné.

Tab. 1 Střední hodnoty tvarových koeficientů uvnitř hangáru při otevřených středních vrátech.

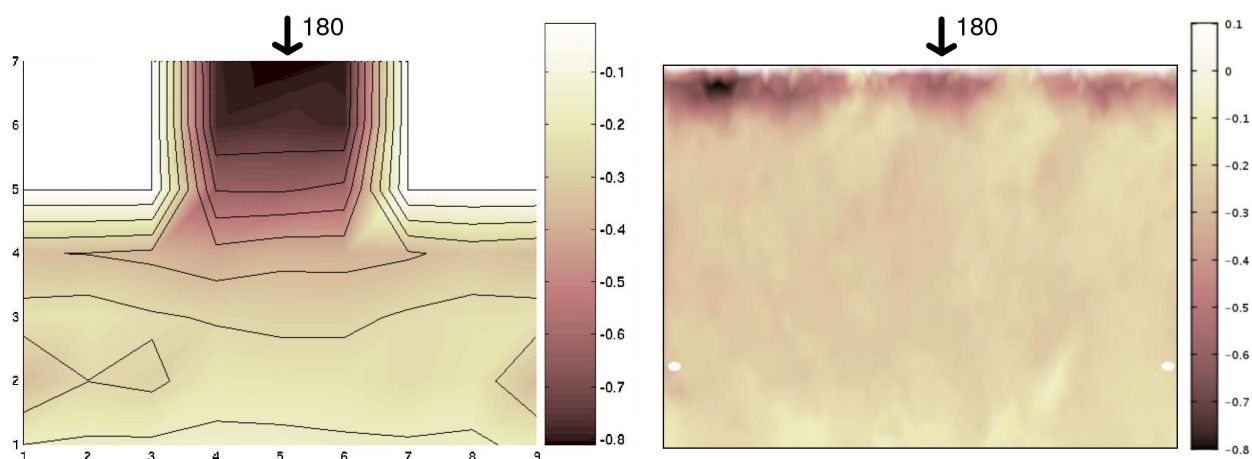
Směr větru	Experiment	Numerika
0°	0.41	0.51
90°	-0.21	-0.27
180°	-0.25	-0.28



Obr. 7 Rozdělení tlaků na střešním plášti hangáru při základním směru větru; experiment (vlevo) a numerický model.



Obr. 8 Rozdělení tlaků na střešním plášti hangáru při směru větru 90 °; experiment (vlevo) a numerický model.



Obr. 9 Rozdělení tlaků na střešní plášti hangáru při směru větru 180° ; experiment (vlevo) a numerický model.

S využitím Tab. 1, která uvádí střední hodnoty aerodynamických součinitelů uvnitř hangáru pro jednotlivé směry větru a typy otevření, a Obr. 7, 8 a 9 lze stanovit nejnepríznivější hodnotu zatížení. Té je dosaženo při působení větru v základním směru 0° a hodnota lokálního aerodynamického koeficientu činí -1.2 . V rovině oblouku vztlak nepřekročil hodnotu -1.0 . Podobná analýza byla provedena a vyhodnocena pro zbývající kombinace.

4.2 Druhý typ hangáru

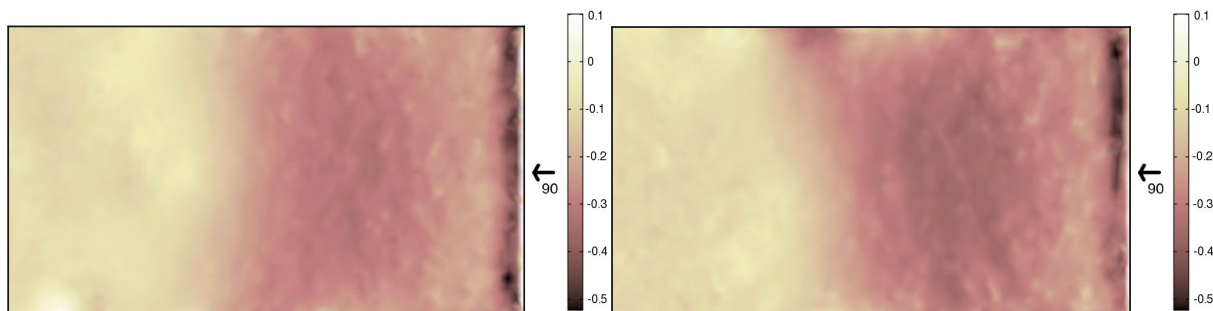
Tab. 2 zahrnuje vypočtené střední hodnoty tvarových součinitelů při otevřených vratech na levé straně budovy. Z pohledu projektanta jsou důležité hodnoty při působení větru v 90° a 180° , kdy uvnitř objektu vzniká podtlak a střešní konstrukce je tlačena k zemi.

Tab. 2 Střední hodnoty tvarových koeficientů uvnitř hangáru při otevřených levých vratech.

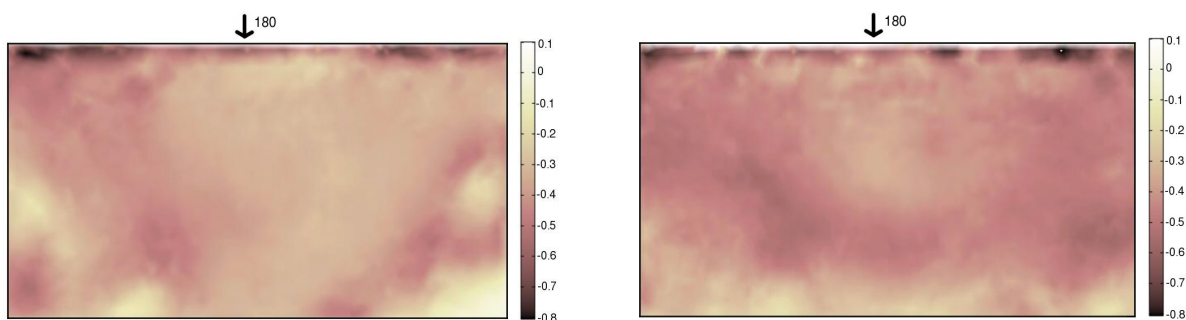
Směr větru	Numerika
0°	0.38
90°	-0.28
180°	-0.30

Výsledky na vnějším plášti střechy jsou vyobrazeny v následujících schématech. Obr. 10 zachycuje rozložení tlaků pro úhel náběhu větru 90° . Levý náčrt je pro uzavřený hangár, pravý pro hangár s otevřenými levými vraty. Z obrázku je patrné, že částečně otevřená boční stěna hangáru nemá výrazný vliv jak na velikost tlaků, tak ani na jejich distribuci. Oblast s vysokou intenzitou sání leží v blízkém okolí návětrné hrany. Asi do $1/4$ rozpětí negativní tlak mírně klesá s tím, že pak se jeho hodnota dále do středu zvyšuje. Na zbylou část střechy působí jen slabé sání. Z toho plyne, že střešní plášť, potažmo střešní obloukové vazníky, je zatížen větším sáním převážně na jedné polovině svého rozpětí.

Totožné charakteristiky znázorňuje Obr. 11 pro vítr proudící ze směru 180° .



Obr. 10 Rozdělení tlaků na střešním plášti hangáru při směru větru 90° ; uzavřený hangár (vlevo) a hangár s otevřenými krajními vraty (vpravo).



Obr. 11 Rozdělení tlaků na střešním plášti hangáru při směru větru 180° ; uzavřený hangár (vlevo) a hangár s otevřenými krajními vraty (vpravo).

S ohledem na uvedené výsledky lze konstatovat, že nejnepříznivější výsledná hodnota lokálního aerodynamického koeficientu je -0.30 . Tohoto čísla bylo dosaženo na jedné polovině plochy střechy při účinku na otevřený hangár ve směru větru 90° . Vypočtená hodnota splňuje požadavky projektanta.

5. Závěr

Článek popisuje stanovení účinků větru na dva typy hangárů mimořádných svou konstrukcí a rozměry. Záměrem bylo určit a posoudit jejich odezvu. K tomu byla u prvního hangáru využita modelová zkouška ve větreném tunelu společně s numerickou simulací. U druhého hangáru se uplatnil jen numerický přístup. Hlavní pozornost byla věnována působení větrného proudu na střešní konstrukce. Kvůli několika možným pozicím průjezdných vrat hangárů bylo nutné provést aerodynamické zkoušky v několika konfiguracích pro různé směry větru. Rozložení tlaků na površích je zaznamenáno ve formě lokálních aerodynamických koeficientů.

S ohledem na obdržené výsledky bylo u ruzyňského hangáru zjištěno, že velikost zatížení střešního pláště není nepříznivě ovlivněna střešním obloukem. Z vizualizace proudění bylo patrné, že soustředěný proud větru, zvedající se nad střechou hangáru, naráží na konstrukci oblouku. Docházelo ke změně režimu obtékání a charakteru větrného proudu. To mělo za následek snížení účinků negativního tlaku na střešní plášť. Následně byly výsledky experimentu srovnány s numerickým výpočtem.

U obou hangárů metody prokázaly, že výsledná hodnota tlaků nepřekročí přípustnou hodnotu danou projektem. Rovněž se nepotvrdila náchylnost střechy ke kmitání nebo ztrátě aerodynamické stability.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory GAČR 103/06/0099, 103/05/2396, A2071401 a výzkumného záměru AV0720710524.

7. Literatura

- 1 E. Simiu, R.H. Scanlan: *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- 2 V. Koloušek, M. Pirner, O. Fischer, J. Náprstek: *Wind Effects on Civil Engineering Structures*, Academia, Praha, 1983.
- 3 J. Donea, A. Huerta: *Finite Element Methods for Flow Problem*. John Wiley & Sons, Chichester, 2004.
- 4 V. Janata: Prestressed tendons in steel structures, in: *CD-ROM Proc of International Symposium on New Olympic, New Shell and Spatial Structures, IASS-APCS2006*, Beijing, 2006.
- 5 R. Král, S. Pospíšil, J. Náprstek: Numerical model of nonlinear wind-structure interaction, in: *Proc CWE2006*, JAWE, Yokohama, Japan, pp. 311-314.
- 6 B. Jiang: *The Least-Squares Finite Element Method*. Springer, Berlin, 1998.
- 7 T.E. Tezduyar, M. Behr, S. Mittal, A.A. Johnson: Computation of unsteady incompressible flows with the stabilized Finite Element Method: Space-Time Formulations. Internet conference: *New Methods in Transient Analysis*, University of Minnesota: PVP-Vol. 246/AMD-Vol. 143, 1992.
- 8 ČSN 73 0035, *Loading of building structures* (Czech national standard). Czech office for standardisation, Praha, 1978.