



VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ TEPELNĚ VLHKOSTNÍHO CHOVÁNÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Autoři:
Ing. Iveta SKOTNICOVÁ, Ph.D.
Ing. Vladan PANOVEC

CZ.1.07/1.3.05/02.0026
Rozvoj profesního vzdělávání pedagogů SOŠ v oblasti dřevovýroby a stavebnictví



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ TEPELNĚ VLHKOSTNÍHO CHOVÁNÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Abstrakt

Příspěvek porovnává výsledky experimentálního měření a numerického řešení průběhů teplot a vlhkosti uvnitř lehkých dřevěných konstrukcí v zimním i letním období. Vyhodnocuje vhodnost použití teoretických výpočtových metod pro predikce tepelně vlhkostního chování konstrukcí.

Klíčová slova

Tepelně vlhkostní chování dřevěných konstrukcí, experimentální měření, numerický simulační výpočet.

1 ÚVOD

Experimentální dřevostavba v pasivním standardu, využívána jako Výzkumné a inovační centrum Moravskoslezského dřevařského klastru (MSDK), byla vybudována v areálu Fakulty stavební Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v roce 2012. V současné době je již budova uvedena do provozu zhruba rok a celou dobu jsou průběžně monitorovány technické vlastnosti a chování stavebních konstrukcí, zeminy pod základovou deskou, vnitřního prostředí i celé budovy. Naměřené hodnoty jsou porovnávány s výsledky teoretických výpočtových metod využívajících jak stacionárních, tak nestacionárních okrajových podmínek.

V tomto článku se zaměříme na výsledky monitorování průběhů teplot a vlhkosti uvnitř obvodového pláště dřevostavby a jejich porovnání s výsledky teoretických analýz.

2 VÝSLEDKY MONITOROVÁNÍ TEPELNĚ VLHKOSTNÍHO CHOVÁNÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Tepelně vlhkostní chování stavebních konstrukcí je monitorováno pomocí snímačů, které jsou osazeny ve vybraných konstrukcích tak, aby bylo možné sledovat průběhy teplot a vlhkosti v celém příčném profilu konstrukce. Pro měření vnějších a vnitřních povrchových teplot konstrukcí jsou použity teplotní snímače TG68-60 Pt1000 a TG7 Pt1000, pro měření teploty a vlhkosti uvnitř konstrukce stěn a stropů jsou použity snímače HC2-C04 RH/T Rotronic, pro měření teplot v zemině jsou použity odporové platinové teplotní snímače TR 087B-60 Pt1000 (tř. A, teplotní rozsah -25 +70 °C). Veškerá naměřená data jsou ukládány a archivovány prostřednictvím vícekanálové ústředny dataTaker DT80G.

Jednotlivé pozice mají umožnit sledování tepelně vlhkostního chování konstrukce s ohledem na různé faktory:

- vliv skladby konstrukce (bez a s odvětrávanou vzduchovou mezerou),
- vliv tepelných mostů,

¹ Ing. Iveta Skotnicová, Ph.D., Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 957, e-mail: iveta.skotnicova@vsb.cz.

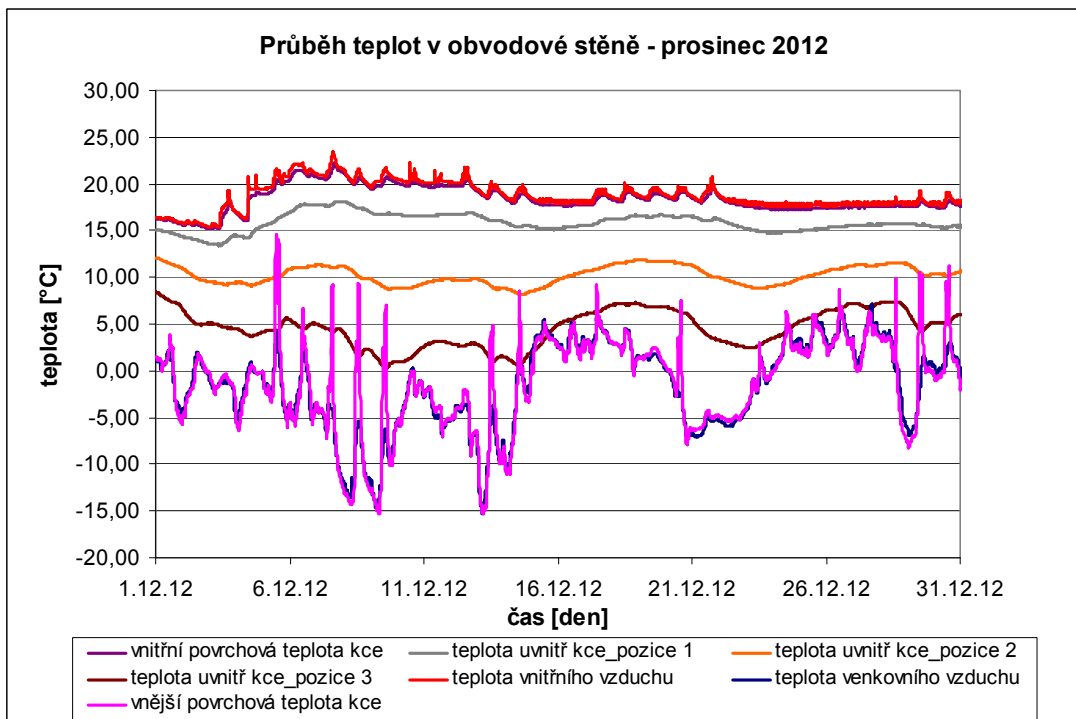
² Ing. Vladan Panovec, Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 941, e-mail: vladan.panovec@vsb.cz.

- vliv tepelných vazeb (kouty),
- vliv vnitřního a vnějšího prostředí (zimní a letní období).

Kromě teplot a vlhkosti v obvodových konstrukcích (stěny a střecha) se monitorují rovněž venkovní teploty vzduchu (stíněné teplotní čidlo na severní fasádě), vnitřní teploty (teplota vnitřního vzduchu i celková vnitřní teplota vzduchu) v jednotlivých místnostech a teploty v zemině pod podlahou.

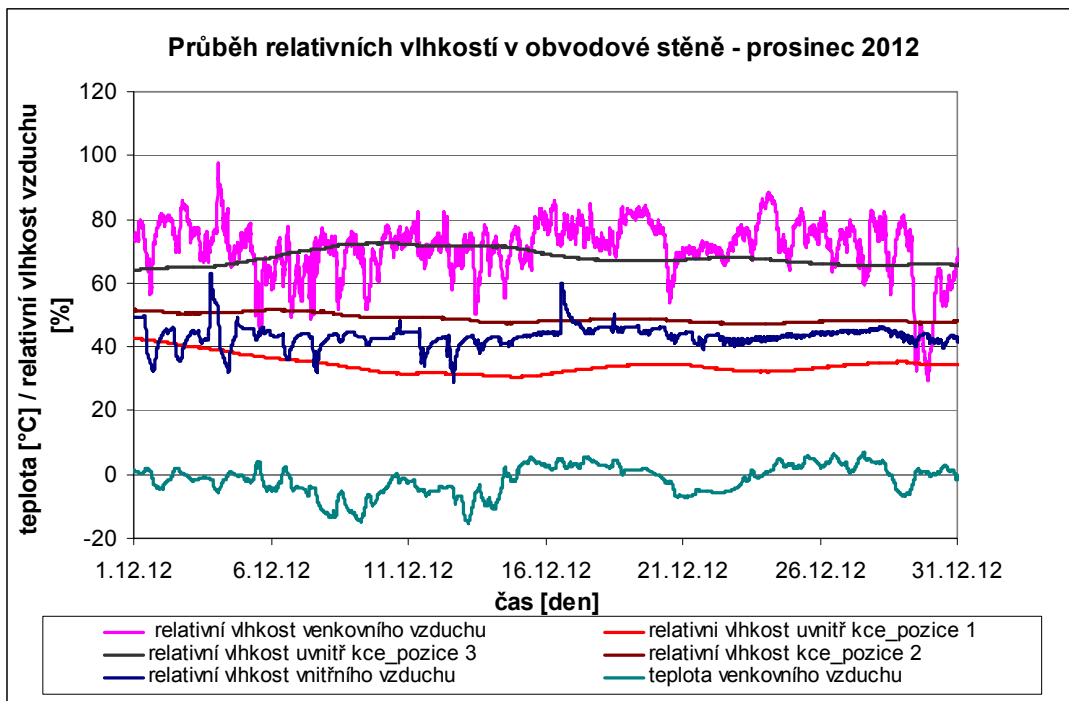
2.1 Obvodová stěna dřevostavby

Na Obr. 1 až Obr. 3 jsou uvedeny naměřené průběhy teplot a relativních vlhkostí v obvodové stěně dřevostavby orientované na jižní stranu v zimním období v měsíci prosinci a v letním období v měsíci srpnu. Hodnoty teplot a relativních vlhkostí uvnitř konstrukce označené pozicí 1,2,3 znázorňují umístění měřicích čidel směrem od vnitřní strany konstrukce ven.

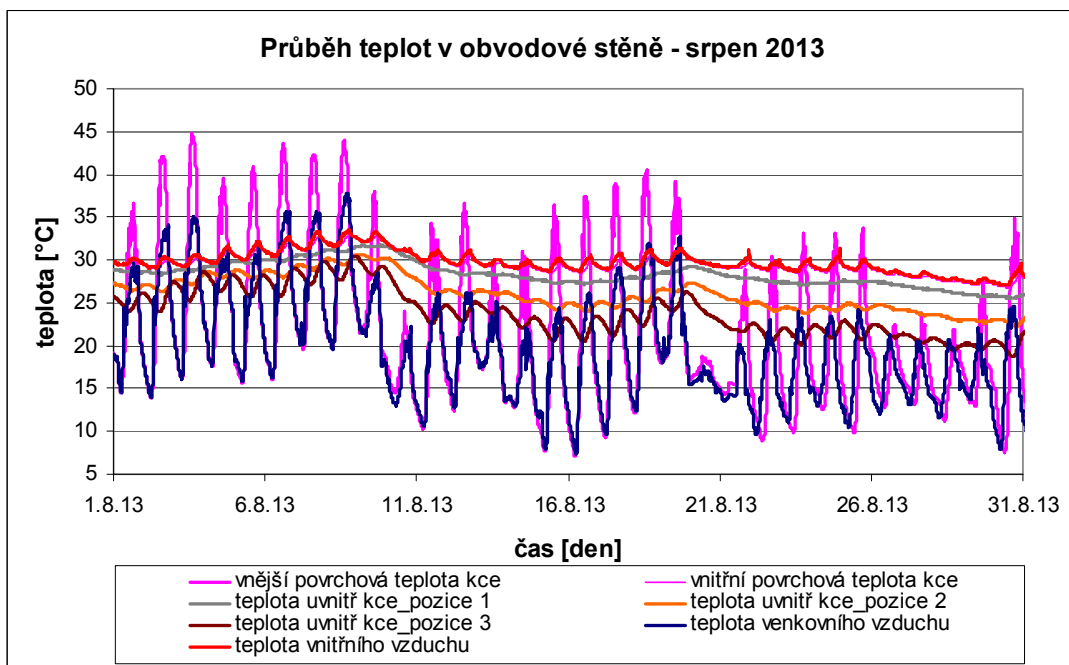


Obr. 1: Průběh naměřených teplot v konstrukci obvodové stěny-orientace jih

Naměřené průběhy teplot ukazují, jakým způsobem se konstrukce díky svým tepelně izolačním vlastnostem vyrovnává s teplotní zátěží v zimním období. Zatímco vnější povrch konstrukce je zatěžován velkým rozdílem povrchové teploty v průběhu měsíce prosince (od -15,3 °C až 9,1°C), vnitřní vrstvy konstrukce včetně povrchu vykazují velice malé výchyly v teplotách (15,2 °C až 21,2 °C). Přičemž průběh vnitřní povrchové teploty je ovlivněn vnitřní teplotou vzduchu a provozním režimem vytápění. Průběh relativních vlhkostí uvnitř konstrukce prokazuje, že v průběhu měsíce prosince nedochází ke vzniku kondenzace uvnitř této difúzně otevřené konstrukce.



Obr. 2: Průběh naměřených relativních vlhkostí v obvodové stěně – orientace jih



Obr. 3: Průběh naměřených teplot v konstrukci obvodové stěny-orientace jih

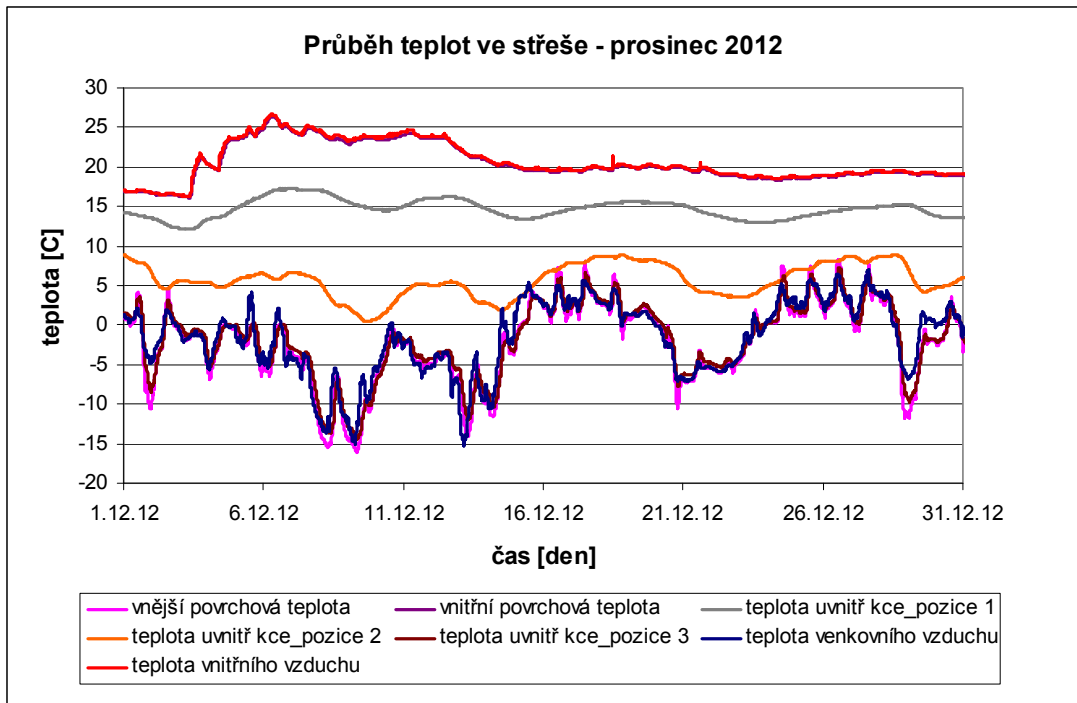
V lením období v měsíci srpnu, kdy venkovní teploty vzduchu dosahovaly v první polovině měsíce nadprůměrné hodnoty, byla naměřena maximální vnější povrchová teplota konstrukce 44,7 °C. Zatímco na vnitřní straně konstrukce dosahovala průměrná teplota vzduchu 29,7 °C. Naměřené vyšší vnitřní teploty vzduchu byly ovlivněny provozním režimem, kdy v rámci zajištění stejných okrajových podmínek pro měření nebyl vnitřní prostor ochlazován větráním venkovního vzduchu v nočních hodinách.

2.2 Střešní konstrukce dřevostavby

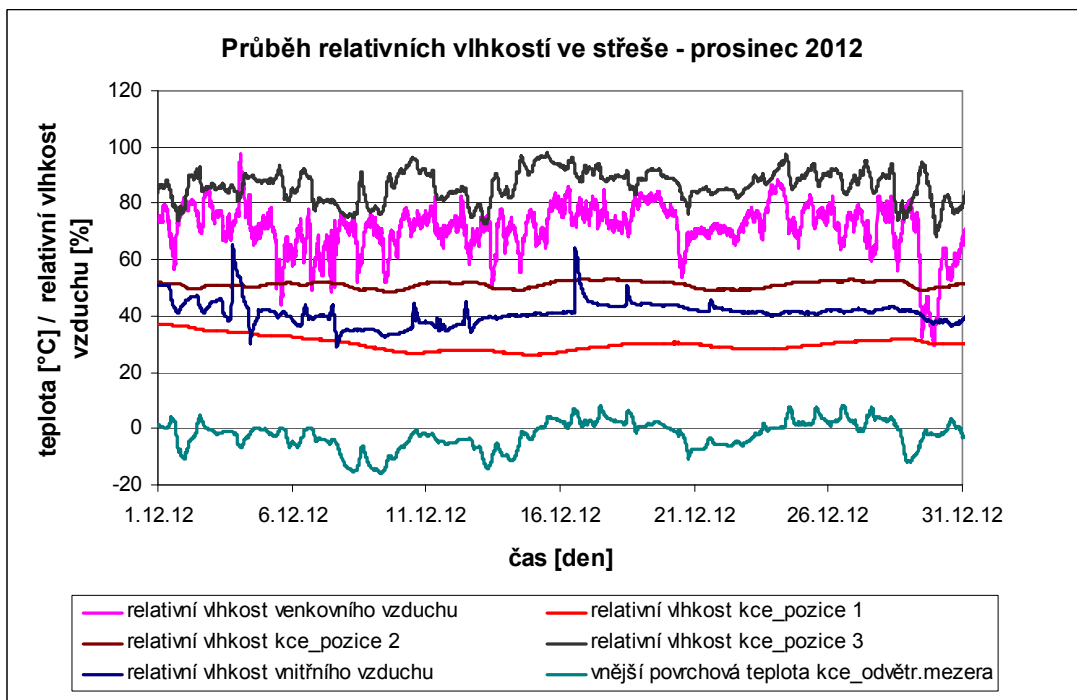
Na Obr. 5, Obr. 6 a Obr. 7 jsou uvedeny naměřené průběhy teplot a relativních vlhkostí ve střešní konstrukci dřevostavby v zimním období v měsíci prosinci a v letním období v měsíci srpnu. Hodnoty teplot a relativních vlhkostí uvnitř konstrukce označené pozicí 1,2,3 (Obr. 4) znázorňují umístění měřicích čidel směrem od vnitřní strany konstrukce ven.



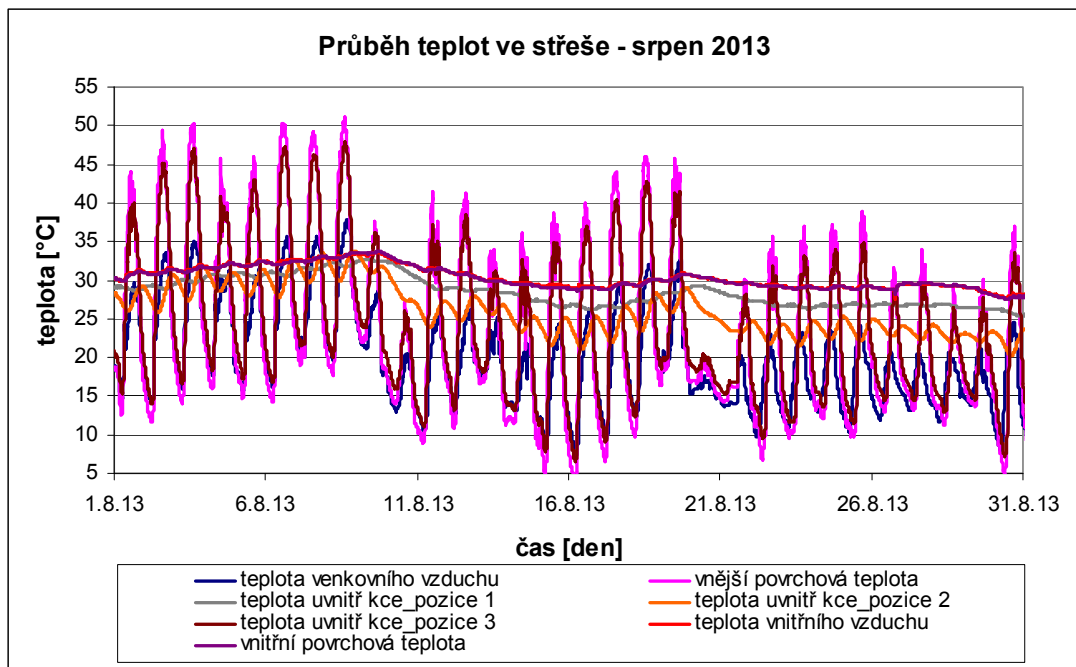
Obr. 4: Umístění měřicích čidel na vnější straně střešní konstrukce (odvětrávaná mezera)



Obr. 5: Průběh naměřených teplot ve střešní konstrukci



Obr. 6: Průběh naměřených relativních vlhkostí ve střešní konstrukci



Obr. 7: Průběh naměřených teplot ve střešní konstrukci

Naměřené průběhy teplot ukazují podobně jako u obvodové konstrukce, jakým způsobem se střešní plášť díky svým tepelně izolačním vlastnostem vyrovnává s teplotní zátěží v zimním období. Zatímco vnější povrch konstrukce je zatěžován velkým rozdílem povrchové teploty v průběhu měsíce prosince (od $-16,1$ °C až $8,4$ °C), vnitřní vrstvy konstrukce včetně povrchu vykazují průměrnou povrchovou teplotu konstrukce $20,5$ °C. Přičemž průběh vnitřní povrchové teploty je ovlivněn vnitřní teplotou vzduchu a provozním režimem vytápění. Průběh relativních vlhkostí uvnitř konstrukce prokazuje, že v průběhu měsíce prosince nedochází ke vzniku kondenzace uvnitř této difúzně otevřené konstrukce.

V lením období v měsíci srpnu, kdy venkovní teploty vzduchu dosahovaly v první polovině měsíce nadprůměrné hodnoty, byla naměřena maximální vnější povrchová teplota konstrukce v odvětrávané vzduchové mezeře $51,1$ °C. Zatímco na vnitřní straně konstrukce dosahovala průměrná teplota vzduchu $30,3$ °C. Naměřené vyšší vnitřní teploty vzduchu byly ovlivněny provozním režimem, kdy v rámci zajištění stejných okrajových podmínek pro měření nebyl vnitřní prostor ochlazován větráním venkovního vzduchu v nočních hodinách.

3 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ S EXPERIMENTÁLNÍM MĚŘENÍM V ZIMNÍM OBDOBÍ

Teoretický výpočet průběhu tepla a vlhkosti uvnitř konstrukcí byl řešen numerickou simulací [1, 2] s využitím stacionárních i nestacionárních okrajových podmínek. Výpočet v podmínkách ustáleného teplotního stavu nahrazuje nestacionární děj stacionárním modelem. Protože vlhkostní setrvačnost je z hlediska ustálení podstatně dlouhodobější než tepelná setrvačnost, je výsledek výrazně na straně bezpečnosti.

Při výpočtu se neuvažuje přenos vlhkosti v kapalném stavu, který se uplatňuje při vyšších vlhkostech v konstrukci (kapilární vodivost). Rovněž se zanedbává změna tepelné vodivosti materiálu při jeho zvlhčení v kondenzační oblasti. Pro teoretické výpočty tepelně vlhkostního chování konstrukcí za stacionárních okrajových podmínek byl použit software AREA 2011 (Svoboda software). Program umožňuje řešení dvourozměrného vedení tepla,

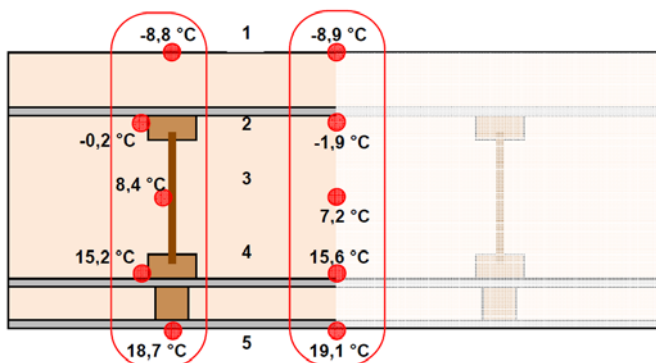
kteře nastává v místech tepelných mostů a vazeb konstrukcí. Okrajové stacionární podmínky výpočtu byly stanoveny dle normy ČSN 73 0540.

Pro teoretické výpočty tepelně vlhkovního chování konstrukcí za nestacionárních okrajových podmínek byly použity programy ANSYS 12 a WUFI 2D.

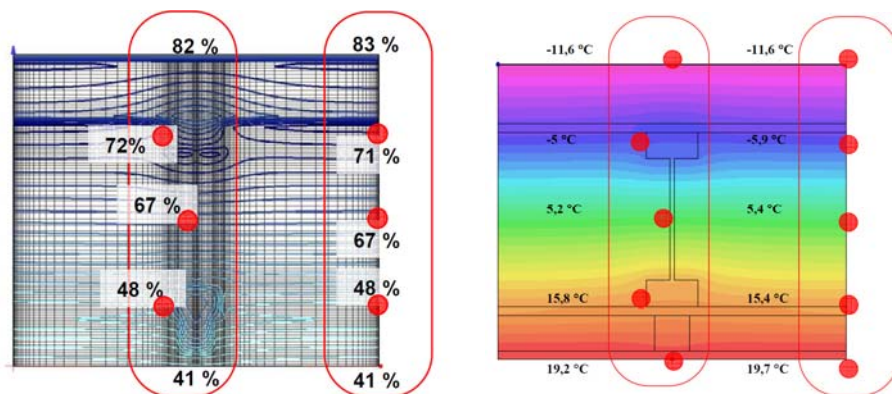
Software ANSYS 12 umožňuje modelovat dynamické dvojrozměrné a trojrozměrné šíření tepla i vlhkosti ve stavebních konstrukcích a materiálech na základě nestacionárních okrajových podmínek. Vnější okrajové podmínky výpočtu byly převzaty z Referenčního roku Českého hydrometeorologického ústavu pro katastr Poruba. Vnitřní okrajové podmínky byly do výpočtu zahrnuty jako konstantní, odpovídající normovým hodnotám dle ČSN 73 0540.

Software WUFI 2D umožňuje modelovat dynamické dvojrozměrné šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a materiálech na základě nestacionárních okrajových podmínek. Díky tomu je možné přesněji vyhodnotit rizika spojená s nadměrnou akumulací vlhkosti nebo s kondenzací vodní páry ve stavebních konstrukcích. Okrajové podmínky byly převzaty z Referenčního roku (z databáze softwaru).

Z důvodu možného srovnání naměřených a vypočtených hodnot, bylo vybráno datum 27.1. 2013, kdy venkovní teplota klesla až na $\theta_e = -12\text{ }^{\circ}\text{C}$, což odpovídá jak návrhové (výpočtové) teplotě, tak teplotě ve vybraném dni Referenčního roku. Průběh teplot a vlhkosti byl porovnáván pro čas 6,0 hodin ráno. Měření a výpočet jsou porovnávány ve dvou místech obvodové stěny – v místě osy mezi nosnými sloupky a v místě nosného sloupku (tepelného mostu). Obvodová stěna je orientována na sever. Jednotlivá čidla jsou na těchto obrázcích očíslovány směrem od exteriéru k interiéru (viz obr. 8, obr. 9).



Obr. 8: Výsledky naměřených teplot dne 27. 1. 2013



Obr. 9: Výsledky teoretického výpočtu vlhkosti v programu WUFI 2D a teploty v programu AREA

V tab. 1 a 2 jsou porovnány výsledky experimentálního měření teplot a vlhkosti v příčném profilu obvodové stěny dřevostavby (v obou místech) s výsledky teoretických výpočtových analýz.

Tab. 1: Teploty v příčném profilu obvodové stěny dřevostavby

| | Teplota v ose mezi sloupky [°C] | | | | |
|------------------------|---------------------------------|------|-----|------|------|
| Č.sondy | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Experimentální měření | -8,9 | -1,9 | 7,2 | 15,6 | 19,1 |
| Výpočet programem AREA | 11,6 | -5,9 | 4,9 | 15,4 | 19,7 |
| Výpočet progr. ANSYS | -8,0 | -4,1 | 5,7 | 15,6 | 19,6 |
| Výpočet progr. WUFI 2D | -12,5 | -2,5 | 6,8 | 14,5 | 19,3 |
| | Teplota v místě sloupku [°C] | | | | |
| Experimentální měření | -8,8 | -0,2 | 8,4 | 15,2 | 18,7 |
| Výpočet programem AREA | -11,6 | -5,0 | 5,2 | 15,8 | 19,2 |
| Výpočet progr. ANSYS | -8,0 | -3,4 | 6,0 | 15,9 | 19,2 |
| Výpočet progr. WUFI 2D | -12,5 | -1,2 | 7,1 | 14,9 | 19,0 |

Tab. 2: Relativní vlhkosti v příčném profilu obvodové stěny dřevostavby

| | Relativní vlhkost v ose mezi sloupky [%] | | | | |
|---------------------------|--|----|----|----|----|
| Č.sondy | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Experimentální měření | 65 | 65 | 37 | 22 | 23 |
| Výpočet programem AREA | 85 | 64 | 38 | 20 | 56 |
| Výpočet programem WUFI 2D | 83 | 71 | 67 | 48 | 41 |
| | Relativní vlhkost v místě sloupku [%] | | | | |
| Experimentální měření | 65 | 60 | 38 | 23 | 23 |
| Výpočet programem AREA | 84 | 60 | 38 | 20 | 57 |
| Výpočet programem WUFI 2D | 82 | 72 | 67 | 48 | 41 |

4 ZÁVĚRY

Přímé srovnání naměřených a vypočtených hodnot je poněkud problematické z důvodu odlišných okrajových a počátečních podmínek, přesto je můžeme vyhodnotit následovně:

- **teplota vnitřního vzduchu**

Zatímco návrhová (výpočtová) teplota vnitřního vzduchu je $\theta_{ai} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, skutečná (naměřená) teplota vnitřního vzduchu stoupala během zimních měsíců od $21 \text{ }^\circ\text{C}$ po $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Příčinou vyšší vnitřní teploty vzduchu jsou tepelné zisky od datového serveru umístěného v místnosti sledovaných měřících čidel.

Poznámka: Skutečná teplota vnitřního vzduchu je prakticky shodná se skutečnou vnitřní teplotou (liší se řádově v desetínách $^\circ\text{C}$), což odpovídá předpokladům pro pasivní budovy.

- **relativní vlhkost vnitřního vzduchu**

Naměřená relativní vlhkost vnitřního vzduchu naopak během zimy klesala (pokles souvisí s postupným vysycháním zabudované vlhkosti v materiálech) až ke 28 %. Toto je velmi nízká hodnota a pravděpodobně souvisí s nestandardním užíváním budovy. Návrhová (výpočtová) relativní vlhkost vnitřního vzduchu u stacionárního výpočtového modelu je $\varphi_{ai} = 50 \text{ } \%$, relativní vlhkost vnitřního vzduchu u nestacionárního modelu kolísá v závislosti na předpokládaném provozu mezi 40 % až 60 %.

- **teplota a relativní vlhkost venkovního vzduchu**

Srovnání vnějších okrajových podmínek je ještě problematictější, než vnitřních. Venkovní teplota a relativní vlhkost vzduchu kolísají během roku ve velkém rozsahu, navíc každý rok je z hlediska teplotního i vlhkostního průběhu jiný. Pro stacionární model byla zvolena konstantní venkovní teplota $\theta_e = -12 \text{ }^\circ\text{C}$ (odvětrávaná vzduchová mezera) a relativní vlhkost $\varphi_e = 84 \text{ } \%$. Pro nestacionární model byl vybrán Referenční rok pro oblast Ostrava-Poruba (pro software ANSYS) a Referenční rok pro oblast Hof (Německo, západní strana Krušných hor), na stejné zeměpisné šířce jako Ostrava (cca 50°) pro software WUFI 2D.

- **zabudovaná (počáteční) vlhkost materiálů**

Skutečná počáteční zabudovaná vlhkost materiálů v konstrukcích je velkou neznámou (stavba byla provedena v zimních měsících a následující léto měly konstrukce možnost vyschnout) a to je také pravděpodobně důvodem značných rozdílů mezi vypočtenými a skutečnými hodnotami relativních vlhkostí uvnitř konstrukce. Právě výpočtová počáteční vlhkost, standardně zadávaná v programu WUFI, se nestačí během modelování od 1. 9. do 27. 1. vypařit a to je možným vysvětlením větších rozdílů mezi skutečností a výpočtem u nestacionárního modelu. Nicméně z výpočtů je patrná klesající tendence obsahu vlhkosti v konstrukcích, takže během dalších modelových roků budou zřejmě výsledky blíže ke skutečnosti.

- **teploty a relativní vlhkosti uvnitř obvodové stěny**

Z uvedených naměřených hodnot a výstupů teplot z programů AREA, ANSYS a WUFI je zřejmé, že vliv tepelného mostu (nosného sloupku) v obvodové stěně se projevuje zvýšeným prostupem tepla v daném místě. Rozdíl teplot v jednotlivých místech konstrukce se pohybuje u naměřených hodnot v rozmezí $0,1\text{-}1,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Porovnání výsledků průběhů relativní vlhkosti uvnitř hodnocené difúzně otevřené konstrukce obvodové stěny dřevostavby prokázalo, že konstrukce zatím dobře difúzně funguje a nedochází v ní při běžných podmínkách provozu (experimentálního domu) ke kondenzaci vodní páry. I když srovnání výsledků měření a jednotlivých výpočetních postupů je problematické z důvodu navzájem těžko porovnatelných okrajových podmínek, ukazuje se, že výpočtové postupy při uvažování nestacionárního přenosu tepla a vlhkosti se více přibližují svými hodnotami

k naměřeným veličinám než stacionární výpočty. Výpočtové postupy při uvažování stacionárního přenosu tepla a vlhkosti (Glaserova metoda) ale vychází s dostatečnou přesností na straně bezpečnosti a jsou tedy rovněž vhodné pro běžnou projekční práci.

LITERATURA

- [1] BARRIOS, Guillermo et al. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*. 2012, v. 50, pp. 120–127. ISSN 0378-7788. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.030>AUTHOR, C. & AUTHOR D. Contribution title. *Journal name*. 2005, XXVI. Nr. 2, pp. 56-58. ISSN 1234-5678.
- [2] STANĚK, Kamil. *Tepelná dynamika a tepelné zatížení konstrukcí* [online]. Poslední revize 23. 2. 2011 [cit. 20. 10. 2012]. Dostupné z:
< http://kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=1984 >
- [3] Výpočetní program AREA 2011
- [4] Výpočetní program ANSYS 12
- [5] Výpočetní program WUFI 2D

RESULTS OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MEASUREMENT OF THERMAL MOISTURE BEHAVIOR OF BUILDING CONSTRUCTIONS

Keywords

Timber frame wall, numerical modeling, dynamic thermal performance, experimental analysis.

Summary

The contribution deals with hygrothermal performance of external timber frame constructions in a passive house. There are compared the results of experimental measurements of the hygrothermal performance of building structures in a timber-frame passive house under real boundary conditions (during the winter) with theoretical calculations using the dynamic simulation methods.