

# Výpočetní ověření vlivu podchlazování povrchových vrstev zateplených objektů na jejich vlhkostní saturaci

Stanislav Šťastník, Radek Steuer

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců  
e-mail: [stastnik.s@fce.vutbr.cz](mailto:stastnik.s@fce.vutbr.cz), [steuer.r@fce.vutbr.cz](mailto:steuer.r@fce.vutbr.cz)

## Abstrakt

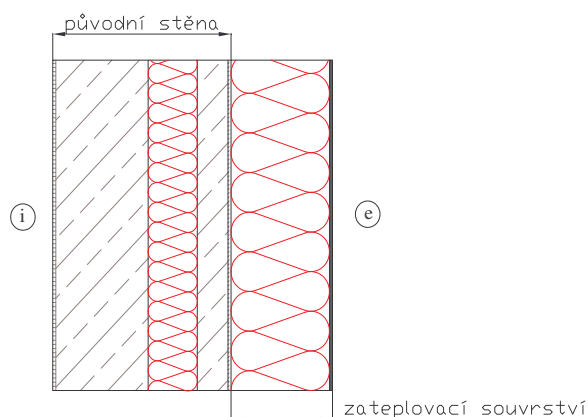
Príspevek pojednává o výpočetním ověřování průběhu podchlazování vnějších povrchů zateplených objektů vlivem vyzařování tepla do jasné noční oblohy a následného vzniku povrchové kondenzace vodní páry. Noční kondenzace vody na povrchu stavebních konstrukcí způsobuje dlouhodobě zvýšenou vlhkost vnější omítkové vrstvy. Vysoká vlhkost podmiňuje povrchovou degradaci materiálů.

## 1. Úvod

Hustota radičního tepelného toku z vnějšího povrchu stavební konstrukce směrem do atmosféry dosahuje za jasných nocí relativně vysokých hodnot. U zateplených budov s povrchovými omítkovými vrstvami izolovanými tepelnou izolací od tepla akumulovaného ve stavební konstrukci dochází vlivem tepelných ztrát radiací k podchlazování povrchových vrstev omítky. Bilancováním tepelných toků lze prokázat ochlazování povrchu stavební konstrukce, přičemž rychlost ochlazování a celkové snížení povrchové teploty pak závisí zejména na výsledku bilance tepelných toků včetně vnitřních zdrojů tepla z kondenzace vodní páry a na tepelně akumulaci schopnosti povrchové vrstvy. Důsledkem snížení povrchové teploty je za jistých podmínek vznik povrchové kondenzace ze vzdušné vlhkosti a není-li stěna během dne vystavena oslunění, aby se voda mohla přes den odpařit, bývá důsledkem dlouhodobá vlhkostní saturace ve vnější vrstvy sterkové omítky. Tento stav podmiňuje povrchovou degradaci materiálů.

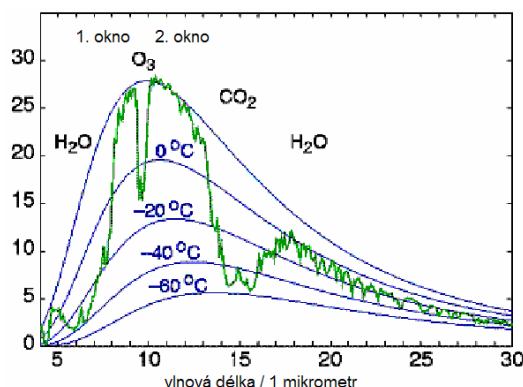
## 2. Noční podchlazování vnějších povrchů zateplených budov

Příčinou toho je poměrně nízká akumulaci vlastnost tenkovrstvé sterkové omítky na vnějším povrchu kontaktního zateplovacího systému a tak se periodicky na vnějším povrchu stěny vytváří vodní kondenzát. Nedostatečné oslunění stěn, zejména severně orientovaných povrchů, může podmínit výskyt tzv. biokoroze vegetací řas.



**Obr. 1. Obvyklé uspořádání materiálových vrstev vnější obvodové stěny s instalovanou kontaktní zateplovací vrstvou na vnějším líci**

Způsobem, jak se vyhnout výše zmíněnému procesu je výběr a následné použití nátěrů s nízkou emisivitou. Snížení hodnoty emisivity vnějších povrchových vrstev způsobí, že poklesne úroveň radiční hustoty vyzařovaného tepelného toku.



**Obr. 2. Spektrum vyzařování z letní (vlhké) atmosféry ( $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ) v závislosti na vlnové délce ( $\mu m$ )**

Vyzařování země do vesmíru ve srovnání s hladkými spektry záření černého tělesa o teplotě 20°C a méně. Vyzařování z povrchu země do vesmíru nastává ve dvou oblastech vlnových délek (tzv. oknech).

Příčinou vytváření kondenzátu jen za jasných nocí je skutečnost, že vodní pára sice dlouhovlnné záření významně pohlcuje, ale pokud část páry zkondenzuje do kapalně fáze, pohltivost se zvyšuje až pokryje celé spektrum. Při oblačnosti pak na zemský povrch září spodní rovina oblačnosti, která je teplejší než vzduch nad ní.

### 3. Modelování tepelně-vlhkostních procesů ve stěnách

Studiem teplotních a vlhkostních poměrů ve vnějším prostředí a na vnějším povrchu stěny lze prokázat, že proces povrchové vlhkostní saturace nastává v noční době a není omezen pouze na jarní či podzimní období. Podmínky k tomu nastávají v průběhu celého roku.

Při relativní vlhkosti vzduchu přes 95 % silně vzrůstá vlhkostně akumulací schopnost pórovitých látek. Tady začíná oblast koexistence kapalně kapilární vlhkosti (často nazývaná nadhygroskopickou oblastí) a hygroskopické látky mohou vodu nabírat až do stavu volného nasycení vodou. Podmínka termodynamické rovnováhy vyjadřuje vztah mezi relativní vlhkostí vzduchu  $\varphi$  nad zakřiveným meniskem vodní hladiny a kapilárním tlakem  $p_k$  ve tvaru:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{p_k}{\rho_w \cdot R_d \cdot T}\right), \quad (1)$$

kde:  $\varphi$  relativní vlhkost vzduchu,  
 $\rho_w$  objemová hmotnost vody,  
 $p_k$  kapilární tlak,  
 $R_d$  plynová konstanta pro vodní páru,  
 $T$  absolutní teplota.

Pokud se v okolí staviva poruší rovnováha, nastává přívod nebo odvod vlhkosti do okolí. Podle působícího účinku mohou nastoupit různé příčiny vlhkostního pohybu. Ve stavební fyzice se uplatňují většinou následující jevy šíření vlhkosti:

$$\dot{q}_{vlhko} = \dot{q}_d + \dot{q}_{kap} + \dot{q}_{konvece}, \quad (2)$$

kde:  $\dot{q}_{vlhko}$  hustota celkového vlhkostního toku,  
 $\dot{q}_d$  hustota difúzního toku vodní páry,  
 $\dot{q}_{kap}$  hustota toku kapaliny kapilárním vedením,  
 $\dot{q}_{konvece}$  hustota toku vodní páry v důsledku konvekce vlhkého vzduchu.

	Mechanismus	Řídící veličina	Rovnice
Šíření tepla	Vedení tepla	Teplota	$\dot{q} = -\lambda(u) \cdot \frac{d\theta}{dx}$
	Sálání tepla	Teplota	$\dot{q} = \sigma(\varepsilon_s \cdot T_s^4 - \varepsilon_0 \cdot T_0^4)$
Šíření vodní páry	Difúze vodní páry	Parciální tlak vodní páry	$\dot{q}_d = -\frac{\delta_{air}}{\mu(u)} \frac{dp_d}{dx}$
	Efúze vodní páry	Parciální tlak vodní páry	
Šíření kapalně fáze	Kapilární vedení	Kapilární tlak	$\dot{q}_{kap} = -\kappa(u) \cdot \frac{du}{dx}$

**Table 1. Přehled mechanismů šíření tepla a vlhkosti v pórovitých stavebních látkách**

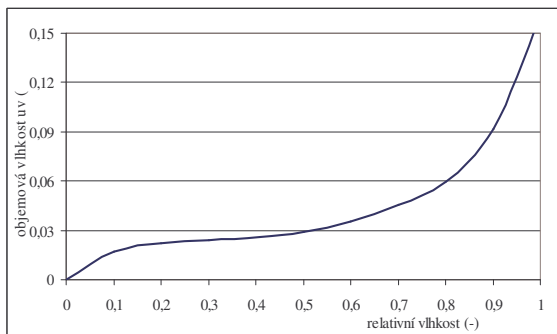
Za základ výpočtového modelu byly použity nestacionární rovnice šíření tepla, vodní páry a kapalně fáze ve tvaru [3]:

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + L_{23} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta_{air}}{\mu} \frac{\partial p_d}{\partial x} \right), \quad (3)$$

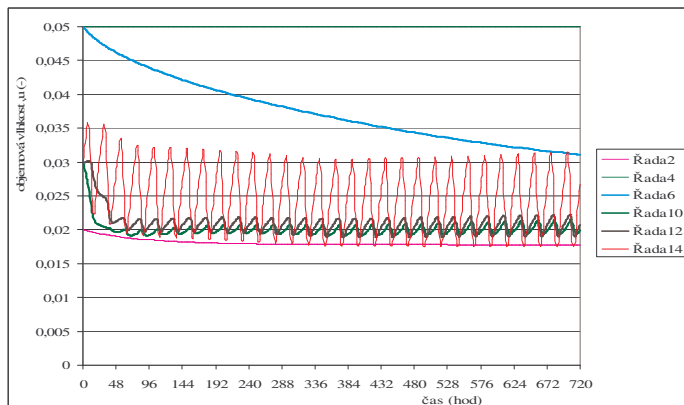
$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_w \cdot \kappa(u) \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta_{air}}{\mu} \frac{\partial p_d}{\partial x} \right) \Big|_{p_d \leq p_d''(\theta)}, \quad (4)$$

kde:  $\theta$  teplota,  
 $u, u_v,$  vlhkostní obsah v pórovitém materiálu (-) obj.,  
 $u_{100}$  vlhkostní obsah v pórovitém materiálu, který náleží 100 % R.H.,  
 $\tau$  čas,  
 $x$  délková pořadnice,  
 $H$  entalpie vlhkého staviva,  
 $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti,  
 $\delta,$  resp.  $\delta_{air}$  součinitel difúzní vodivosti, resp. součinitel difúzní vodivosti vzduchu,  
 $\kappa(u)$  součinitel kapilární vodivosti,  
 $p_d,$  resp.  $p''_d$  částečný tlak vodní páry, resp. parciální tlak nasycené vodní páry,  
 $\rho,$  resp.  $\rho_w$  objemová hmotnost, resp. objemová hmotnost vody,  
 $c$  tepelná kapacita materiálu.

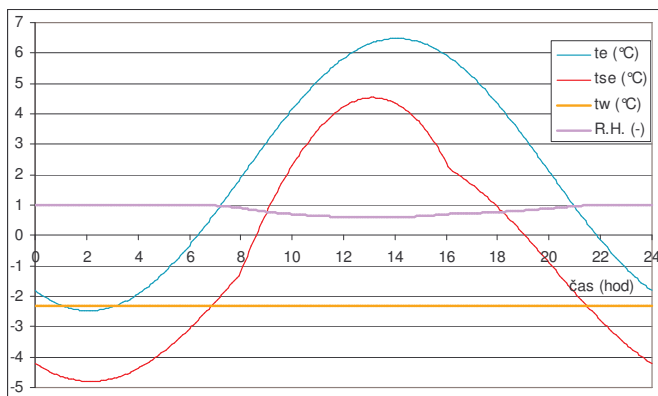
Vlastní algoritmus byl naprogramován v prostředí programovacího jazyka Pascal, vlastní výpočet zahrnuje iterační postup stanovení veličin teploty a materiálové vlhkosti ve vybraných rovinách, zejména u vnějšího okraje stěny. Vzhledem k pomalému postupu stávajícího výpočtu se předpokládá jeho další optimalizace, zejména využití účinnější iterace. Cílem modelování bylo u vybraných skladebných typů obvodových konstrukcí stanovit interval změn vlhkostní saturace, vymezit projev emisivity různých druhů fasádních nátěrů a definovat míru vlivu sálavé složky na celkových tepelných ztrátách v závislosti na absolutní teplotě a teplotním spádu mezi povrchem konstrukce a okolím (okolními objekty). Ukazuje se, že zvýšený vlhkostní obsah stavebních materiálů v podpovrchové zóně u vnějšího líce je příčinou řady degradačních procesů, které jsou iniciovány přítomnou vlhkostí.



**Obr. 3. Vyobrazení průběhu sorpční závislosti vnější stěrkové povrchové úpravy kontaktního zateplovacího souvrství s pěnovým polystyrénem**



**Obr. 4. Vypočtené vlhkostní průběhy ve vnější povrchové vrstvě a skladebných vrstvách zateplovacího systému**



**Obr. 5. Průběh teploty vnějšího vzduchu, povrchové teploty na stěně, relativní vlhkosti a teploty rosného bodu v jednodenní časové závislosti - tloušťka vnější stěrkové vrstvy  $d = 3 \text{ mm}$**

Z výsledků modelování vyplývá, že periodické vlhkostní změny v materiálu povrchové vrstvy jsou řízeny vnějšími klimatickými podmínkami. Cyklická materiálová saturace vnější povrchové vrstvy vlhkostí nastává po dobu prakticky celého roku. V pozdním podzimu a začátkem jarního období, kdy teploty vnějšího povrchu dosahují bodu mrazu, se může intenzivně projevit materiálová degradace objemovými změnami přítomné pórové vlhkosti. Nežádoucím jevem takových stěn, které si trvale udržují zvýšený vlhkostní obsah, je jejich zelený vzhled způsobený vegetací řas, které jsou posuzovány spíše jako pohledová vada.

**Poděkování:** Tento příspěvek byl vypracován za podpory projektu GA ČR 103/05/H044 a výzkumného záměru MSM 0021630511.

## Reference

- [1] ČSN 73 0540, Tepelná ochrana budov, část 2 – Funkční požadavky, ČNI 2002
- [2] Blaich, J., Algen auf Fassaden, kapitola v knize Die Gebäudehülle, první vydání, Dübendorf – Schweiz, EMPA, 2000, ISBN 3-6167-4724-8, S. 46-58.
- [3] Holm, A.H., Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygroskopischen Bauteilbe-rechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes, Lehrstuhl der Bauphysik, TU Stuttgart 2001.