

# Závislost vlhkosti stavebních konstrukcí na kolísání hladiny podzemní vody

Milena Císlerová a Vladimíra Jelínková  
ČVUT v Praze, Fakulta stavební, KHMKI

Jedním z důsledků povodně v srpnu roku 2002, která poškodila celé městské čtvrti v Praze, nejvíce Karlín a část Holešovic, bylo podmáčení stávajících staveb a dlouhodobé kritické zvýšení vlhkosti zasažených objektů. Vzhledem ke skutečnosti, že hladina podzemní vody vltavské nivy je v těchto oblastech v relativně malé hloubce pod povrchem a v při zvýšených průtocích ve Vltavě stoupá, bylo zahájeno monitorování hloubky hladiny podzemní vody v řadě vybraných objektů v Karlíně. Cílem je zpracování studie zamokření zdiva v závislosti na hloubce hladiny podzemní vody. Vzlínající voda může narušením struktury způsobit vážné statické ohrožení konstrukce stavby. Méně viditelné, avšak nepříjemné následky zvýšené vlhkosti jsou snížení izolačních schopností ve vztahu k vedení tepla, zhoršení hygienických podmínek (např. vznik nebezpečných plísní a toxinů s dopadem na zdraví obyvatel), a j.. Šíření vlhkosti ve stavebních konstrukcích se dlouhodobě věnuje řada výzkumných pracovišť po celém světě. Složitost řešení této problematiky se odráží ve skutečnosti, že ve většině případů se studují jednotlivé dílčí procesy, které jsou v daných podmínkách dominantní. Například v praxi často řešené úlohy jsou spojené s prostupem tepla svislými izolačními stěnami v souvislosti s kondenzací vodních par (u nás Svoboda, 1999; 2002; 2004), případně difuzí vlhkosti ve stavebních materiálech (Černý et al., 2002; Pavlík a Černý, 2004).

## Řídící rovnice

Pohyb vlhkosti v pórovitém prostředí je složitý nerovnovážný proces zahrnující pohyb vody a vodních par, s komplexním polem hnacích sil (De Groot a Mazur, 1969). Změny vlhkosti jsou významně ovlivněny tokem tepla, roli hrají elektrokinetické efekty. Ve zjednodušeném pohledu jde o dvoufázové proudění vody a vodních par v neizotermním prostředí s mezifázovými přechody (Hall a Hoff, 2002). Vzhledem k nereálnosti měření všech veličin ovlivňujících proudění, často působících v mikroměřítku na úrovni molekul, se pro matematický popis využívá nejčastěji difuzní rovnice (Crank, 1975), v oblasti difuze vodních par se kombinuje s Kelvinovým vzorcem. Výstupem řešení jsou změny vlhkového pole (např. Hall a Hoff, 2002), nebo změny pole relativní vlhkosti vzduchu (Künzel, 1995), ve většině případů se uvažuje teplotní gradient.

Ve většině publikovaných případů týkajících se vlhkového poměru stavebních materiálů se jedná o šíření vlhkosti v částečně nasyceném pórovitém prostředí, kdy není třeba se zabývat plným nasycením, při kterém jsou v části zájmové oblasti všechny póry zcela vyplněny vodou a vytváří se zde volná hladina. Přejít do plného nasycení, kdy se vlhkovost rovná pórovitosti a je konstantní, difuzní rovnice neumožňuje. V půdní fyzice se pro popis vlhkového pole používá zjednodušená forma obecnějších rovnic proudění v pórovitém prostředí, uváděná jako rovnice Richardsova (RR).

Působící síly jsou zahrnuty prostřednictvím celkového potenciálu. Přesná termodynamická formulace tohoto potenciálu vychází ze specifické Gibbsovy energie, případně z chemického potenciálu. Celkový potenciál  $\phi$  [J/kg] v sobě zahrnuje řadu dílčích potenciálů. Exaktní rozklad celkového potenciálu do dílčích složek, reprezentujících různé typy působících sil, je dosti komplikovaný. Ve zjednodušeném přístupu se uvažuje pouze tlakový potenciál zastupující jak tlakové síly, tak i síly retenční a gravitační potenciál. Tato úmluva umožňuje formálně jednotný popis proudění v nasyceném i nenasyceném prostředí. Je možné pracovat s potenciály převedenými do tlakového tvaru [Pa] nebo, v inženýrských aplikacích, do

výškového tvaru:

$$H = \frac{\phi}{g} = h + z \quad [\text{m}] \quad , \quad h = \frac{\Psi_p}{g} = \frac{p}{\rho g} \quad (1)$$

kde  $H$  je hydraulická výška,  $\Psi_p$  tlakový potenciál a  $h$  tlaková výška. Výška  $z$  udává polohu v gravitačním poli, tj. svislou vzdálenost od libovolné srovnávací roviny,  $\rho$  je hustota vody,  $p$  je tlak a  $g$  gravitační zrychlení.

Rychlost proudění mezi dvěma sousedními místy prostředí je úměrná rozdílu celkového potenciálu v těchto místech. Do celkového potenciálu je možno zahrnout různý počet dílčích potenciálů podle toho, které hnací síly převládají nebo jsou zanedbatelné.

Pokud uvažujeme jednorozměrné izotermní darcyovské proudění vody v proměnlivě nasyceném tuhém pórovitém prostředí a předpokládáme, že plynná fáze má zanedbatelný vliv na proces proudění kapalně fáze, má Richardsova rovnice tvar:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial h}{\partial z} + K \right) \quad (2)$$

Pokud se za neznámou funkci v rovnici (2) považuje tlaková výška  $h(z,t)$ , vychází řešení z tzv. kapacitního tvaru Richardsovy rovnice:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) \quad , \quad -\infty < h < +\infty \quad (3)$$

kde

$$C(h) = -\frac{d\theta}{dh}$$

je retenční vodní kapacita, popisující sklon retenční křivky (druhá základní hydraulická charakteristika). Pokud je neznámou vlhkost  $\theta(z,t)$  jedná se o difuzní tvar RR:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right) \quad , \quad \theta < \theta_s \quad (4)$$

kde

$$D(\theta) = \frac{dh}{d\theta} K(\theta)$$

je difuzivita, která při  $h=0$  (plné nasycení) nabývá hodnoty nekonečna.

Řídící rovnice proudění řeší časoprostorový vývoj všech uvažovaných stavových veličin (vlhkosti, tlaku a rychlosti) uvnitř zvolené oblasti proudění.

### **Materiálové charakteristiky**

Reálné pórovité prostředí, v našem případě jednotlivé stavební materiály, je vzhledem k proudění vody definováno pomocí hydraulických charakteristik. Retenční křivka popisuje závislost mezi tlakovou výškou  $h$  a objemovou vlhkostí  $\theta$  a zjišťuje se experimentálně. Ve vztahu se uplatňuje hystereze. Změřené body retenční čáry se prokládají vhodným analytickým výrazem, parametry se vyšetří optimalizací (Brooks a Corey, 1964; van

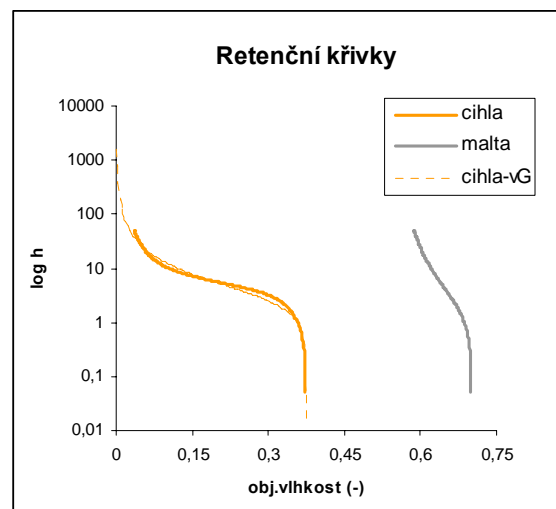
Genuchten, 1980).

Hydraulická vodivost je rychlostní charakteristika. K vyjádření funkce hydraulické vodivosti  $K(h)$  [LT-1] se zavádí bezrozměrná relativní hydraulická vodivost  $K_r(h)$  jako

$$K(h) = K_s K_r(h)$$

kde  $K_s$  je nasycená hydraulická vodivost [LT-1].

Na základě teorie kapilárních modelů se průběh relativní hydraulické vodivosti odvozuje z retenční čáry a měří se jenom hodnota nasycené hydraulické vodivosti (Mualem, 1976). Na obr. 1 jsou retenční křivky cihelného zdiva a malty převzaté z projektu HAMSTAD (Carmeliet et al., 2004; Roels et al., 2004, Pavlík a Černý, 2004).



**Obr. 1** Retenční křivky cihelného zdiva a malty. Pro cihly je vyneseno také graf van Genuchtenova proložení

Stavební materiály reprezentují pórovité prostředí s relativně pevnou strukturou, závislou na druhu použitých materiálů, ve většině případů jde o velmi heterogenní prostředí. Z hlediska materiálových vlastností je nezbytné k modelování pohybu vody změřit hydraulické vlastnosti každé vrstvy v plném rozsahu. Retenční čára je určující pro objem vody, která do konstrukce navzlíná, na hydraulické vodivosti závisí, jak rychle k tomu dojde.

### Scénáře simulací

Je evidentní, že Richardsova rovnice ve výše uvedené formě nemůže popsat komplexní pohyb kapalné a plynné fáze vody ve stavebních konstrukcích. Její aplikace je možná pouze pro velmi zjednodušený scénář, který však může poskytnout užitečné podklady pro hlubší analýzu, případně pro vývoj komplexního modelu pohybu vlhkosti. Určí množství zasáklé vody a rychlost zamokřování v závislosti na pohybu hladiny podzemní vody. Přesnost simulací závisí na přesném určení hydraulických charakteristik. K simulaci proudění ve svislém sloupci za isotermních podmínek, s předpokladem, že v okolí konstrukce je vzduch plně nasycen vodními parami, neproudí a jeho tlak odpovídá atmosférickému tlaku, byl použit simulační model HYDRUS 5.0 (Vogel et al., 1996). Model řeší numericky jednorozměrný pohyb vody, transport rozpuštěných látek a proudění tepla v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí. V pilotních simulacích byla zvolena výška zdiva 1m, na horním okraji byla zadána konstantní rovnovážná okrajová podmínka ve formě nulové rychlosti, na spodním okraji měřená výška podzemní vody. Vzhledem k tomu, že v tomto případě jde o procesy v

oblasti blízké nasycení, lze tyto zjednodušující předpoklady pro první výpočty akceptovat. Z výsledků simulací vyplývá, že kritickým faktorem zamokření zdiva je funkce hydraulické vodivosti, v kombinaci s rychlostí stoupání hladiny podzemní vody. Na základě výsledků citlivostní analýzy, provedené pro vybrané stavební materiály, budou navrženy další scénáře, využívající data hladin podzemní vody, která byla v letošním roce měřena ve vybraných objektech v zájmové oblasti Karlína. V současnosti se v jednom objektu osazují tlaková čidla k monitorování sacích tlakových výšek.

### **Poděkování**

Výzkumné práce jsou prováděny v rámci výzkumného záměru MSM 6840770005 Udržitelná výstavba.

### **Citovaná literatura**

- BROOKS, R.H. a COREY, A.T., 1964: Hydraulic properties of porous media, Hydrology Papers 3, Colorado University, Fort Collins
- CARMELIET, J., HENS, H., ROELS, S., ADAN, O., BROCKEN, H., ČERNÝ, R., PAVLÍK, Z., HALL, C., KUMARAN, K., a PEL, L., 2004: Determination of Liquid Water Diffusivity from Transient Moisture Transfer Experiments, Journal of Thermal Env. & Bldg.Sci., 27, 4, 277-305.
- CRANK, J., 1975: The mathematics of diffusion, Oxford University Press
- ČERNÝ, R., PODĚBRADSKÁ, J., DRCHALOVÁ, J., 2002: Water and Water Vapor Penetration Through Coatings, Journal of Thermal Envelope and Building Science 26
- DE GROOT, S.R. a MAZUR, P., 1969: Non-Equilibrium Thermodynamics, North-Holland Publishing Company, Amsterdam
- HALL, Ch. a HOFF, W.D., 2002: Water Transport in Brick, Stone and Concrete, Spon. Press, London and New York
- KÚNZEL, H. M., 1995: Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and Two- Dimensional Calculation using Simple Parameters. IRB Verlag, Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, Stuttgart (ISBN 3-8167-4103-7).
- MUALEM, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12: 513-522.
- PAVLÍK, Z., ČERNÝ, R., 2004: Application of TDR Measurement Technology for Construction Materials in Semi-Scale Experiments. International Agrophysics 18, ISSN 0236-8722
- ROELS, S., CARMELIET, J., HENS, H., ADAN, O., BROCKEN, H., ČERNÝ, R., PAVLÍK, Z., ELLIS, A.T., HALL, C., KUMARAN, K., PEL, L., PLAGGE, R., 2004: A Comparison of Different Techniques to Quantify Moisture Content Profiles in Porous Building Materials. Journal of Thermal Envelope and Building Science 27, ISSN 1097-1963
- SVOBODA, Z., 1999: The Analysis of the Convective-Conductive Heat Transfer in the Building Constructions. In: Proceedings of the 6th IBPSA Building Simulation Conference, Vol. I, Kyoto 1999, pp. 329-335.
- SVOBODA, Z., 2000: The Convective-Diffusion Equation and Its Use in Buildings Physics.

In: International Journal on Architectural Science, Vol. I, No. 2 (2000), pp. 68-79.

SVOBODA, Z., 2004: Vliv šíření vzduchu prouděním na tepelně vlhkostní chování konstrukcí. In: Sborník materiálů 11. mezinárodní konference Tepelná ochrana budov 2004, Praha, pp. 27-32.

VAN GENUCHTEN, M.Th., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci Soc Am J., 44: 892-8.

VOGEL, T., HUANG, K., ZHANG, R. and VAN GENUCHTEN, M.TH., 1996: The HYDRUS code for simulating One-Dimensional Water Flow, Solute Transport, and Heat Movement in Variably-Saturated Media. Version 5.0, Research Report No. 140, U.S. Salinity Lab., ARS, USDA, Riverside, CA.