

## **Cvičení 4 – Transport plynné a kapalné vody**

### **Transport vodní páry porézním prostředím**

Vzhledem k tepelné vodivosti vody a dalším nepříznivým vlastnostem a účinkům v porézních materiálech je s problémem tepelné izolace budov spojena též otázka odolnosti stavební konstrukce proti vlhkosti a kondenzace vodních par uvnitř konstrukce. Ve vzduchu obsažené vodní páry difundují porézním materiálem z míst vyššího parciálního tlaku do míst s nižším parciálním tlakem. Hnací silou transportu vodní páry porézním prostředím je tedy gradient parciálního tlaku, jemuž je úměrná hustota hmotnostního toku vodní páry dle rovnice

$$J = -\delta \text{grad}p$$

Konstantou úměrnosti je součinitel difúzní vodivosti  $\delta$ , jež vyjadřuje schopnost látky propouštět vodní páru difúzí a jehož číselná hodnota je shodná s hustotou toku páry daným materiálem při jednotkovém gradientu  $1 \text{ Pa m}^{-1}$  parciálního tlaku páry.

K základním fenomenologickým koeficientům patří také součinitel difúze vodní páry definovaný následujícím vztahem

$$D = \delta RT/M \quad (\text{m}^2 \text{s}^{-1}).$$

Ve stavební praxi se používá také faktor difúzního odporu

$$\mu = D_a / D, \quad (-)$$

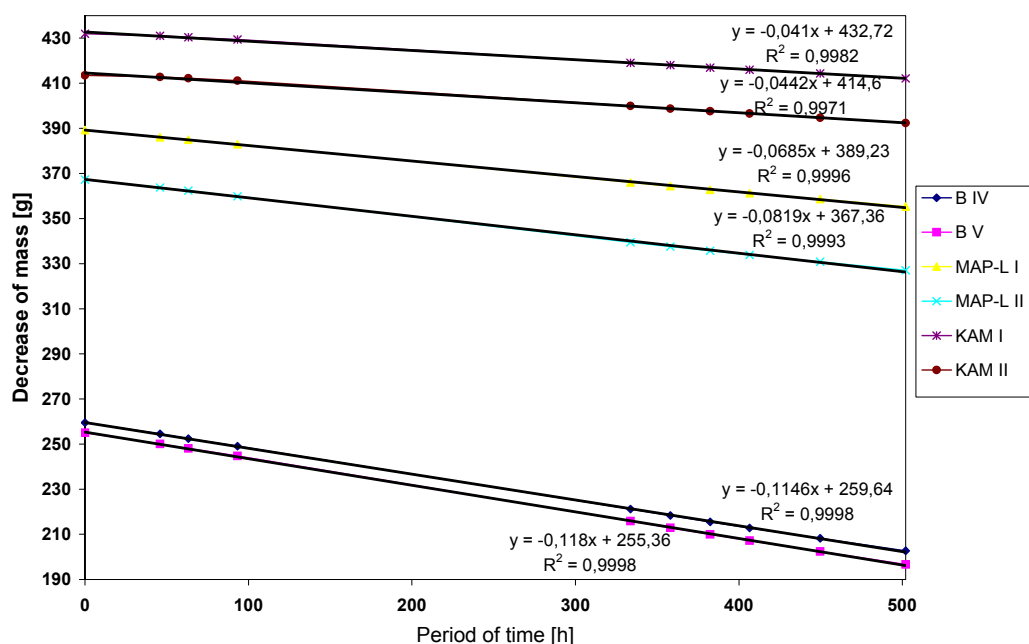
kde  $D_a = 2,3 \text{E-}05$ .

Z praktického hlediska lze znalosti difúze vodní páry aplikovat na kondenzaci vodní páry v konstrukci během zimního období. V tomto případě je nutné, aby tok par konstrukcí byl minimální, je tedy potřeba vnitřní povrchy stěn vlhkých místností osadit vrstvou s velkým difúzním odporem, zatímco vnější stranu stěny je vhodné osadit vrstvou s malým difúzním odporem a s velkým tepelným odporem.

Měření součinitele difúze vodní páry **metodou bez teplotního spádu** je založeno na jednorozměrném šíření vodní páry vzorkem a spočívá v měření difúzního toku vodní páry prošlé vzorkem při znalosti parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu pod a nad měrným povrchem vzorku. Vzorek je vzduchotěsně upevněn v misce naplněné vodou. Miska se vzorkem se periodicky váží a zjištěné úbytky hmotnosti se vynesou v závislosti na době vážení do grafu. Po dosažení přímkového charakteru křivky se měření pokládá za ukončené. Součinitel difúze vodní páry se vyhodnocuje dle vztahu

$$\delta = \frac{\Delta m \cdot d}{S \cdot \tau \cdot \Delta p_p} \quad (\text{s}),$$

kde  $\Delta m$  je množství páry difundující vzorkem (kg),  $d$  je tloušťka vzorku (m),  $S$  je měrná plocha vzorku ( $\text{m}^2$ ),  $\tau$  je časové období korespondující s transportem hmoty vodní páry  $\Delta m$  (s) a  $\Delta p_p$  je rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu nad a pod měrným povrchem vzorku (Pa), vypočítává se z tabelovaných hodnot pro příslušnou teplotu a vlhkost.



Obr.2 Příklad průběhu a vyhodnocení transportu vodní páry porézními materiály

**Úkol:** 1. Změřte transport vodní páry daného materiálu miskovou metodou bez teplotního spádu a vypočítejte faktor difúzního odporu.

## Difúze vodní páry v konstrukci

[PDF verze článku](#)

**Autor:** Jiří Hejhálek, **Fotografie:** Archiv firmy, **Kontakt:**

*Co žene páru v zimním, chladném období dovnitř obvodové konstrukce a proč tu kondenzuje? Pára se do konstrukce dostává dvěma způsoby. Buď společně s proudícím vzduchem netěsnými místy v konstrukci nebo tzv. difúzí. U difúze se zastavíme.*

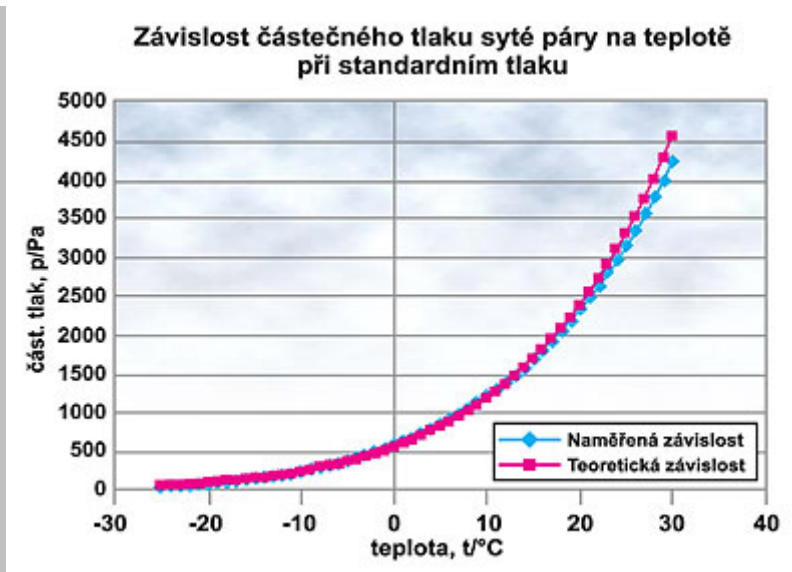
Difúze je transport látky který vyplývá ze statistického chování molekul látek, v našem případě molekul vodní páry, které jsou obsaženy ve vzduchu. Tyto molekuly konají ve vzduchu spontánní, chaotický pohyb do všech směrů. Z míst o vyšší koncentraci vodní páry se přirozeně šíří do okolí více molekul než z míst o nižší koncentraci. To směřuje k samovolnému vyrovnávání rozdílných koncentrací v různých místech. Po vyrovnání koncentrací pohyby molekul neustanou, pouze se kompenzují hmotnostní toky: stejné množství molekul páry, které v rovnováze z nějakého objemu "odteče", do něj z okolí zase "přiteče". To již za difúzi nepovažujeme.

### *Difúze vodní páry a hnací síly*

Mluvíme-li o difúzi vodní páry ve stavebnictví, máme na mysli pouze transport molekul vodní páry ve vzduchu, nebo ve vzduchem vyplněných pórech a kanálcích stavebních materiálů. Při výpočtech většinou nepracujeme s koncentracemi, ale částečnými tlaky vodní páry (tlak, kterým by molekuly páry působily na stěny nádoby, kdyby byly v nádobě samy, bez ostatních atmosférických plynů). Předpokládejme, že spolu sousedí dvě prostředí s různými počátečními částečnými tlaky vodní páry. Většinou nás zajímají případy, kdy jde o vnitřní a venkovní vzduch oddělený obvodovou zdí. Potom molekuly s vyšším částečným tlakem putují do sousedství ve větší míře, než je tomu naopak, dokud se částečné tlaky nevyrovnají. Zeď tomuto pohybu klade tím větší překážku, čím je tlustší a čím menší je její součinitel difúzního prostupu, což je analogie součinitele prostupu tepla. Přestože molekuly "necítí", že by byly někam hnány a pohybují se zcela nahodile, z makroskopického pohledu vystupuje jako hnací síla pro difúzní transport páry rozdíl částečných tlaků vodní páry (dělený vzdáleností míst s různými částečnými tlaky). Tato síla a tudíž i difúze zaniknou s vyrovnáním částečných tlaků. V případě vodní páry - na rozdíl od většiny běžných plynů - může transport zkomplikovat kondenzace vodní páry.

### *Rosný bod*

Vodní pára má vlastnost, že při běžných teplotách přijatelných pro život může její částečný tlak ve vzduchu stoupat od nuly pouze do hodnoty částečného tlaku syté páry. Další přírůstky vodní páry při nezměněné teplotě jen kondenzují, ale obsah vodní páry ve vzduchu nezvyšují. Částečný tlak velmi silně, exponenciálně závisí na teplotě, viz obr. 1.



Obr. 1 Hodnoty částečných tlaků syté vodní páry při různých teplotách při standardním tlaku 101 325 Pa. Modrá křivka ukazuje naměřené hodnoty [1], červená ukazuje teoretickou závislost vyjádřenou exponenciální funkcí.

Je-li částečný tlak vodní páry ve vzduchu rovný částečnému tlaku syté páry, říkáme, že vzduch má relativní vlhkost 100 %. Například vzduch o teplotě 20 °C, v němž je částečný tlak vodní páry roven 2336,74 Pa, má (při dané teplotě 20 °C) maximální možnou vlhkost a tedy relativní vlhkost 100 %. Jestliže při stejné teplotě je tlak vodní páry jen 1168,37 Pa, má vzduch relativní vlhkost 50 %. Vzduch o teplotě 25 °C s obsahem vodní páry o částečném tlaku 2336,74 má relativní vlhkost 73,83 %. Rosný bod (přesněji teplota rosného bodu) takového vzduchu je 20 °C; neboť jeho ochlazením na tuto teplotu začíná kondenzace. Z exponenciální závislosti tlaku syté páry na teplotě plynou některé vážné důsledky. I když je doma sucho a venku je vlhký vzduch, pára intenzivně difunduje zevnitř ven díky vysoké vnitřní teplotě. Vskutku: jestliže je v zimě -15 °C a relativní vlhkost 100%, pak je částečný tlak páry 165 Pa (obr. 1). Je-li uvnitř 20 °C a relativní vlhkost 50 % (sucho), potom je částečný tlak syté páry 1168,37 Pa. Rozdíl tlaků je 1003 Pa. Při tloušťce obvodové konstrukce 0,45 m je zobecněná síla, která "žene" difuzi vodní páry z vnitřku ven,  $1003/0,45 = 2229 \text{ Pa/m}$ .

### ***Zóna kondenzace***

Pokud teploty v konstrukci - zejména teploty ve vrstvě izolace - klesají rychleji než teplota rosného bodu, což je v zimě často, může v konstrukci dojít nejprve ke vzniku rosného bodu, později místo, kde se začala srážet pára, rozšíří do oblasti konečné tloušťky, tzv. zóny kondenzace. Za velmi studeného počasí vzniká v určité hloubce od vnitřního povrchu různě tlustá zóna kondenzace prakticky u všech typů konstrukcí, jednovrstvých i vícevrstevných. V teplém období se většinou kondenzát odpaří.

Nejméně náchylné ke vzniku zóny kondenzace jsou vícevrstvé stěny s mohutnou vrstvou tepelné izolace z venkovní strany tehdy, jestliže vnitřní stěny propouštějí vodní páru málo a venkovní vrstva izolace propouští vodní páru výrazně lépe než vnitřní vrstvy a je odvětrávána. Za uspokojivé je pokládáno (z pohledu difúze) i obrácené řešení, kdy silná vrstva tepelné izolace z venkovní strany propouští páru velmi málo, ale tepelně izoluje tak dobře, že v nosné vnitřní vrstvě nevzniká v zimě významný teplotní pokles. Díky tomu vzniká případná

kondenzace jen v izolaci, ale její množství je tak malé (dík malé difúzní propustnosti izolantu), že toto řešení je považováno za trvanlivé a bezpečné.

<sup>1</sup> Pojem zobecněné síly je ve fyzice častý. Např. rozdíl polohové energie mezi dvěma místy dělený rozdílem výšek obou míst je známá mechanická síla  $f$  měřená v newtonech. Rozdíl teplot mezi dvěma místy dělený jejich vzdáleností - teplotní gradient -  $\Delta T/d$  je zobecněná síla, která určuje velikost toku tepla, např. podle rovnice  $Q = \lambda \cdot (\Delta T / d)$ . Konečně difúzní tok hmoty  $\Psi$ , vyvolaný rozdílem částečných tlaků  $\Delta p$  mezi dvěma prostředími oddělenými stěnou tloušťky  $d$  o součiniteli difúze  $\delta$ , je dán rovnicí  $\Psi = \delta \cdot (\Delta p / d)$ .

## ***Transport kapalné vody***

Transport vody porézním materiálem vyjadřuje diferenciální rovnice

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{grad} u),$$

kde  $u$  je obsah vlhkosti a  $\kappa$  součinitel vlhkostní vodivosti ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ).

Vzorky pro měření nasákavosti jsou po obvodu izolovány (zajištění jednorozměrného transportu vlhkosti), neizolovaná spodní strana je 1-2 mm ponořena pod vodní hladinu. Konstantní vodní hladina je udržována pomocí vodou naplněné lahve, ve které jsou zapařeny dvě kapiláry, jedna s vnitřním průměrem 2 mm je ponořena pod hladinu, druhá o průměru 5 mm dosahuje nad hladinu. Vzorek je zavěšený na automatické digitální váze zaznamenávající nárůst hmotnosti vzorku. Ze známé hodnoty vodního toku do vzorku během nasákání se vypočítá součinitel vlhkostní vodivosti. Experiment je samozřejmě možné provádět manuálně, kdy ve zvolených časových intervalech provádíme stanovení hmotnosti měřeného vzorku.

Průměrná hodnota součinitel vlhkostní vodivosti se dá vypočítat pomocí rovnice

$$\kappa = D_w \approx \left( \frac{A}{w_{cap}} \right)^2 \quad [\text{m}^2\text{s}^{-1}],$$

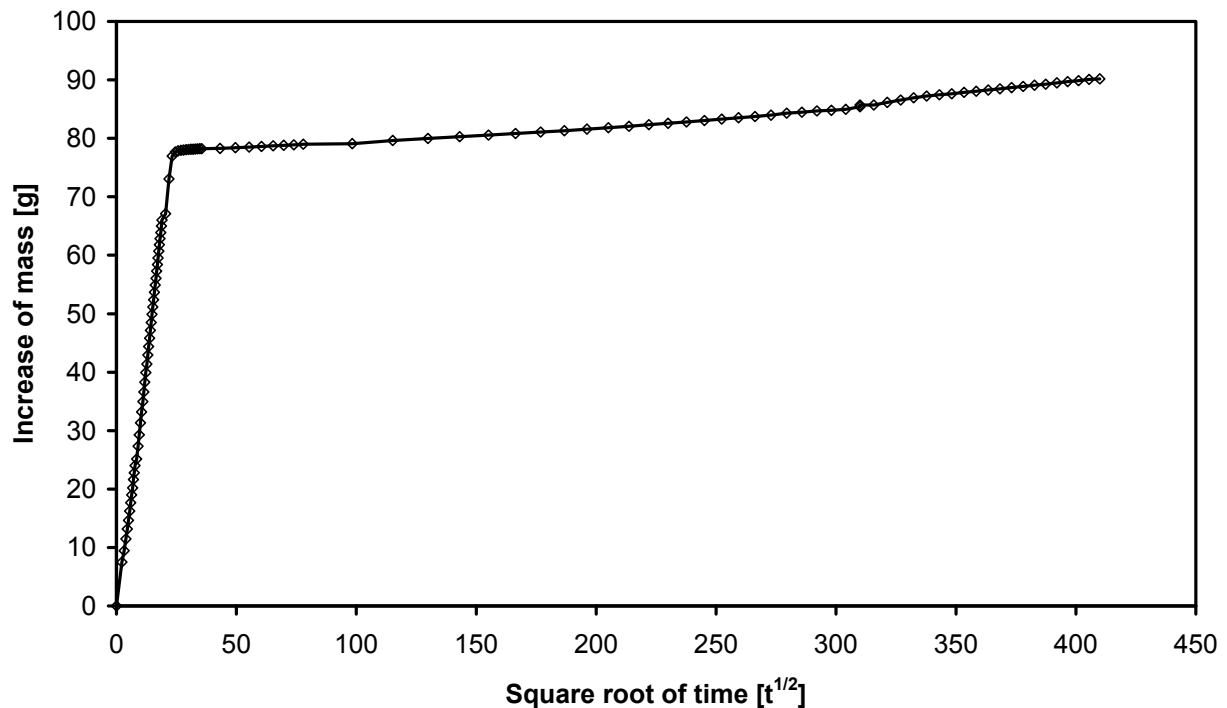
kde  $A$  je absorpční koeficient vody [ $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$ ],  $w_{cap}$  je kapilární obsah nasycené vlhkosti [ $\text{kg m}^{-3}$ ].

Absorpční koeficient vody se určuje přímo z přímkové počáteční závislosti kumulativního obsahu vody v materiálu [ $\text{kg m}^{-2}$ ] na odmocnině z času [ $\text{s}^{1/2}$ ].

Hodnotu kapilární nasycené vlhkosti můžeme stanovit dle následující vztahu

$$W_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V}, \quad [\text{kg m}^{-3}]$$

kde  $m_{cap}$  je hmotnost vzorku odpovídající kapilární nasákavosti,  $m_0$  hmotnost suchého vzorku a  $V$  objem měřeného vzorku.



Obr.1 Typická křivka nasákavosti.

**Úkol:** Změřte křivku nasákavosti daných materiálů, určete hodnotu absorpčního koeficientu pro vodu  $A$ , následně vypočítejte průměrnou hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti  $\kappa$ .

### Laboratorní protokol:

Titulní strana: název experimentu

jméno studenta (nebo členů pracovní skupiny)

datum

Vlastní protokol: krátký popis testovaných materiálů

popis použitých experimentálních metod

seznam použitých pomůcek a přístrojů

naměřené hodnoty a použité konstanty

výpočtové a výsledné hodnoty

vyhodnocení