

## LABORATORNÍ PŘÍSTROJE A POSTUPY

### VIZUALIZÁCIA A ANALÝZA DIFÚZNYCH PROCESOV NA FÁZOVOM ROZHRAŇÍ MINERÁL – VODA

JOZEF ČERNECKÝ a ELENA PIVARČIOVÁ

*Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene, Masarykova 24, 960 53 Zvolen  
jozef.cernecky@tuzvo.sk, elena.pivarciova@tuzvo.sk*

Došlo 31.1.12, prijato 10.5.12.

Kľúčové slová: holografická interferometria, difúzny koeficient, konštanta rozpúšťania, sadrovec

#### Úvod

Sadrovcové krasy existujú na celom svete. Nestabilita týchto krasov a možnosť ich potenciálneho podmývania ukazuje dôležitosť porozumenia evolúcie krasu<sup>1</sup>. Prítomnosť rozpusteného sadrovca vo vode ovplyvňuje rozpúšťanie minerálov obsahujúcich imisie (najmä z uránových baní). Štúdium takejto kontaminácie vyžaduje tiež znalosť hodnôt súvisiacich s rozpúšťaním sadrovca<sup>2</sup>. Existencia veľkého množstva rozpusteného minerálu môže tiež pozmeniť kvalitu pitnej vody<sup>3</sup>. Znalosti o rozpúšťaní sadrovca sú požadované aj v ropnom priemysle a plynárenstve, kde je sadrovec nežiadúcim minerálom<sup>4</sup>.

Na pochopenie interakcie na fázovom rozhraní sadrovec – voda a mechanizmov zapojených do tohto procesu je potrebná znalosť zapojených kvantitatívnych parametrov, ako je difúzny koeficient a rýchlostná konštanta rozpúšťania.

Metódou holografickej interferometrie sme sledovali proces rozpúšťania a difúzie sadrovca v destilovanej vode, vypočítali sme hodnoty rýchlostnej konštanty rozpúšťania  $k$  a difúzneho koeficientu  $D$ .

#### Experimentálna časť

##### Materiál

Sadrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , dihydrát síranu vápenatého) môže byť bezfarebný, biely, šedý, žltkastý, priehľadný. Vyskytuje sa v podobe zrnitých a vláknitých agregátov. Kryštalové jedince môžu dosahovať až niekoľko metrov. Dá sa štiepiť, na štiepných plochách je sklenené až perleťovo lesklý. Je veľmi mäkký, je možné rýpať do neho

aj nechtom.

Používa sa na výrobu sadry, cementu, omietkovín a prefabrikátov. V menšom množstve sa využíva v poľnohospodárskom a farmaceutickom priemysle, pri výrobe skla a papiera.

Sadrovec má aj geochemický význam, pretože sa spolu s kalcitom podieľa na množstve vápnika v prírodných vodách.

Sadrovec je rozpustný vo vode, stály je do teploty 40 °C, pri vyššej teplote dochádza k dehydratácii.

Geochemický systém sadrovec – voda možno popísať rovnovážnou rovnicou:



Tento proces je reverzibilný. Rovnica z ľava do prava vyjadruje kryštalový rast a z prava do ľava rozpúšťanie. Stupeň presýtenia  $\Omega$  udáva proces, ktorý bude prebiehať a je možné odvodiť ho zo vzťahu pre výpočet zmeny Gibbsovej funkcie:

$$\Delta G = RT \ln(Q/K) \quad (2)$$

kde  $\Delta G$  je Gibbsova energia,  $R$  je plynová konštanta,  $T$  je teplota,  $Q = \Pi(a_i)^{\nu_i}$  je reakčný kvocient, vyjadrujúci stechiometrický súčin aktivít koeficientov jednotlivých reaktantov ( $\Pi$  vyjadruje súčin<sup>5</sup>),  $K$  je rovnovážna konštanta,  $(Q/K) = \Omega$ .

Ak  $\Omega = 1$ ,  $\Delta G = 0$  a systém je v rovnováhe. Ak  $\Omega < 1$ , roztok je nenasýtený a minerál sa rozpúšťa, ak  $\Omega > 1$ , roztok je presýtený a minerál sa zráža<sup>6</sup>.

Kinetika rozpúšťania/rastu kryštálu môže byť riadená buď transportom produktov od/k fázovému rozhraniu alebo povrchovou reakciou. Ak je rýchlosť povrchovej reakcie extrémne vysoká, rýchlosť procesu je riadená transportom (molekulárnou difúziou alebo konvekciou) produktov do/z roztoku. V prípade malej rýchlosti rozpúšťania/rastu zabezpečí transport (napr. difúzia) homogénnu koncentráciu v celom roztoku a rýchlosť rozpúšťania/rastu je riadená povrchovou reakciou.

Ak sú rýchlostná konštanta reakcie/rozpušťania na povrchu a transportná konštanta molekulárnej difúzie rozpustených zložiek podobné, je rýchlosť rozpúšťania/rastu sadrovca riadená zmiešanou reakčno-transportnou kinetikou<sup>1</sup>.

Rýchlosť rozpúšťania/rastu sadrovca vo vodnom roztoku je riadená obidvoma procesmi:

a) chemickou reakciou na povrchu, ktorá závisí od chemického zloženia roztoku blízko povrchu (koncentrácia  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  iónov),

b) molekulárnou difúziou cez fázové rozhranie hrúbky  $\varepsilon$ .

Keďže hrúbka difúzneho fázového rozhrania  $\varepsilon$  závisí

od hydrodynamických podmienok, môže byť transport molekulárnou difúziou ovplyvnený meniacimi sa hydrodynamickými podmienkami.

V stacionárnom stave sa tok hmoty  $R_s$ , spojený s povrchovou reakciou, rovná toku  $R_t$  spojenému s transportom z povrchu. Oba procesy ovplyvňujú rýchlosť rozpúšťania/rastu.

Pre povrchovo kontrolovanú rýchlosť rozpúšťania/rastu  $R_s$  rôznych minerálov platí rovnica<sup>7</sup>:

$$R_s = k_s (1 - c_s / c_{eq})^n = k_s (1 - \dot{c}_s)^n \quad (3)$$

V prípade sadrovca  $c_s$  je celková koncentrácia  $\text{Ca}^{2+}$  (vápenatých iónov) blízko minerálneho povrchu,  $c_{eq}$  je rovnovážna koncentrácia sadrovca v  $\text{mol l}^{-1}$ ,  $k_s$  je rýchlostná konštanta povrchovej reakcie v  $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , a  $\dot{c}_s = c_s / c_{eq}$ . Ak je minerál v roztoku s fázovým rozhraním hrúbky  $\varepsilon$ , transport do roztoku je ovplyvňovaný molekulárnou difúziou. Rýchlosť  $R_t$  pri molekulárnom transporte je:

$$R_t = k_t (\dot{c}_s - \dot{c}_B), \quad k_t = \frac{D}{\varepsilon} \cdot c_{eq} \quad (4)$$

kde  $\dot{c}_B = c_B / c_{eq}$ . Symbol  $c_B$  predstavuje celkovú koncentráciu  $\text{Ca}^{2+}$  v celom roztoku.  $D$  je difúzny koeficient<sup>8</sup>. Celková rýchlosť rozpúšťania látky na fázovom rozhraní  $R$  je daná pri  $R_s = R_t$  rovnicou:

$$k_s (1 - \dot{c}_s)^n = k_t (\dot{c}_s - \dot{c}_B) = R \quad (5)$$

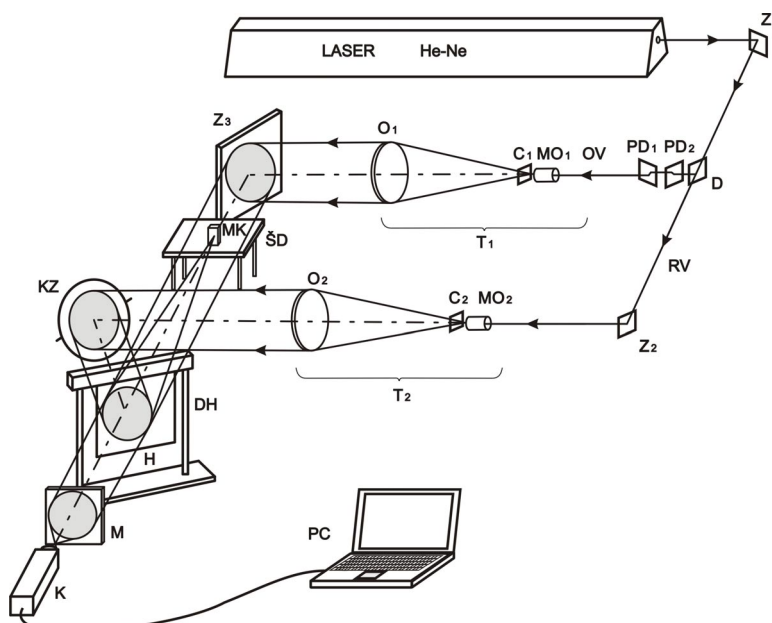
Riešením rovnice (5) môže byť vypočítaná povrchová koncentrácia  $\dot{c}_s$  a efektívna rýchlosť  $R$ . Vzhľadom na to, že  $\dot{c}_s$  závisí od pomeru  $k_t/k_s$  a tieto dva parametre sú závislé na sebe, na získanie  $k_s$  je potrebné poznať hodnotu  $k_t$ .

## Metóda

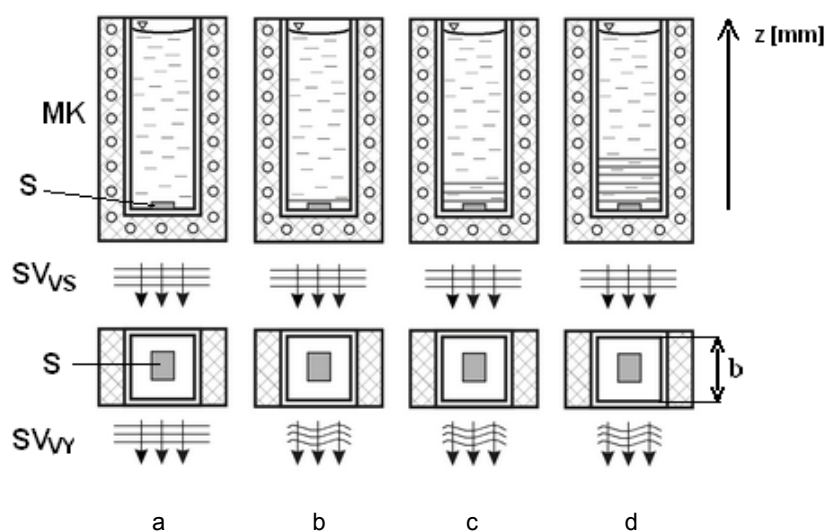
Pre vizualizáciu koncentračných polí v transparentnom prostredí je možné použiť optické vizualizačné metódy. Pre výskum transparentných nehomogenít (napr. koncentračných polí v priehľadných tekutinách) môže byť použitá interferometrická metóda<sup>9,10</sup>, ktorá umožňuje zviditeľniť nehomogenity v tekutinách vďaka ich odlišnému indexu lomu. Z hľadiska optiky sa za optickú nehomogenitu považuje aj zmena koncentrácie v určitom prostredí.

Interferenčná metóda je založená na identifikácii zmeny fázy svetelnej vlny, ktorá prešla optickou nehomogenitou. Zo zmeny fázy sa určuje rozdelenie indexu lomu. Prostredie s vyššou koncentráciou ako okolie (referenčné prostredie) má vzhľadom k nemu inú hustotu a preto tiež iný index lomu. Určenie veľkosti indexu lomu v rôznych miestach prostredia umožňuje určiť koncentráciu.

Na obr. 1 je znázornená optická schéma holografického zariadenia pre záznam a rekonštrukciu hologramov. Svetlo s vlnovou dĺžkou  $\lambda = 632 \text{ nm}$ , vychádzajúce z lasera dopadá na delič (D), ktorý rozdelí úzky zväzok laserového žiarenia na časť predmetovú a časť referenčnú. Predmetový zväzok lúčov je po odraze od zrkadla ( $Z_1$ ) rozšírený mikroobjektívom ( $\text{MO}_1$ ) a dopadá na objekt (O). Svetlo odrazené od objektu dopadá na záznamové prostredie – holografickú dosku (HD). Úzky zväzok referenčných lúčov je po odraze od zrkadla ( $Z_1$ ) rozšírený mikroobjektí-



Obr. 1. Schéma holografického variantu jednovlnového Mach-Zehnderovho interferometra; OV – objektívna vetva, RV – referenčná vetva, D – delič, H – holografická doska, DH – držiak holografickej dosky, KZ – zrkadlo v kardanovom závесе, O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> – objektívy, Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub> – zrkadlá, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> – dierkové clony, MO<sub>1</sub>, MO<sub>2</sub> – mikroskopické objektívy, PD<sub>1</sub>, PD<sub>2</sub> – planparalelné doštičky, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> – teleskopické sústavy, ŠD – špeciálny držiak, MK – makrokyveta, M – matnica, K – kamera, PC – počítač



Obr. 2. Schéma vytvárania interferenčných prúžkov v makrokyvete; a) makrokyveta naplnená destilovanou vodou po vložení sadrovca, b) vznik interferenčného prúžku na dne makrokyvety, c) d) rozpúšťanie sadrovca spôsobujúce vznik interferenčných prúžkov; MK – makrokyveta ( $10 \times 10 \times 40$  mm), SVvs – svetelná vlna na vstupe do makrokyvety, SVvy – svetelná vlna na výstupe z makrokyvety, S – sadrovec ( $5 \times 5 \times 1$  mm), b – dĺžka optickej dráhy v makrokyvete

vom ( $\text{MO}_2$ ) a je usmernený priamo na holografickú dosku (HD) bez toho, aby bol cestou rušený nejakou optickou nehomogenitou. Pretože opticko-mechanická zostava interferometra je navrhnutá tak, aby boli splnené podmienky interferencie, vzniká v rovine záznamového prostredia interferenčný záznam a po fotochemickom spracovaní vzniká hologram.

Úzky zväzok laserového žiarenia sa po odraze od zrkadla ( $Z_1$ ) rozdelí na kontinuálnom deliči (D) na dva zväzky – predmetový (OV) a referenčný (RV). Časť svetla kontinuálny delič (D) prepúšťa a svetlo sa šíri pôvodným smerom. Objektový zväzok (OV) je zoslabený planparalelnými doštičkami ( $\text{PD}_1$ ) a ( $\text{PD}_2$ ), ktoré sa do zostavy zaraďujú pri rekonštrukcii obrazu, kvôli lepšiemu kontrastu. (OV) a (RV) sa ďalšími zrkadlami ( $Z_2$ ,  $Z_3$ ) a zrkadlom umiestneným v kardánovom závесе (KZ) usmernia na holografickú dosku (H). Aby bolo možné zaznamenať väčšiu šírku poľa, úzky zväzok je potrebné zväčšiť na zväzky väčších priemerov použitím teleskopických sústav ( $T_1$ ,  $T_2$ ). Za mikroobjektív ( $\text{MO}_1$ ,  $\text{MO}_2$ ) sa zvyčajne vkladá dierková clona ( $C_1$ ,  $C_2$ ), ktorá odfiltráva vyššie ohybové rády a tým odstraňuje zo svetelného zväzku ohybové a interferenčné efekty pochádzajúce od nečistôt na optických prvkoch. Natáčaním zrkadla (KZ) okolo dvoch od seba nezávislých osí je možné nastavovať konečnú a nekonečnú šírku prúžkov v referenčnej oblasti za hologramom. Hologram sa získa súčasným osvitom holografickej dosky obidvoma svetelnými zväzkami väčšinou pri homogénnom rozdelení indexu lomu v meracom priestore.

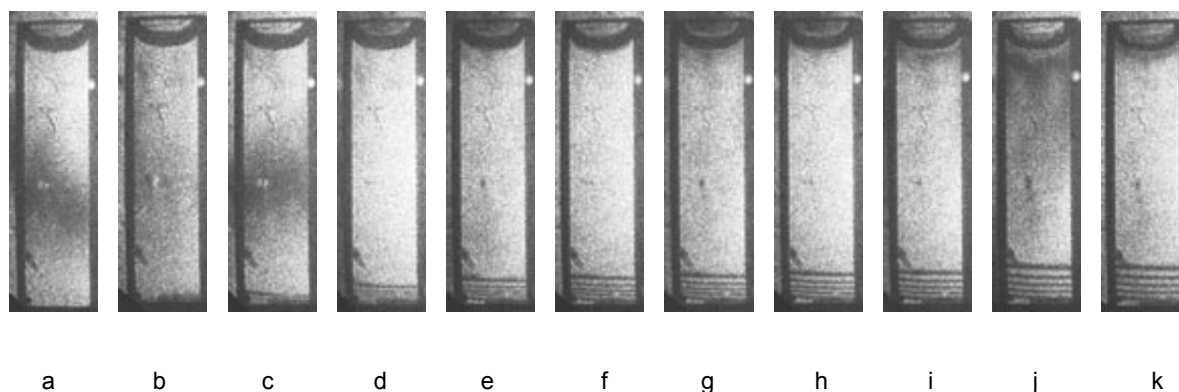
Pre riešenie úloh prestupu látky je dôležité navrhnúť vhodné zariadenie pre uskutočňovanie experimentov a jeho začlenenie do zostavy holografického interferometra.

Na obr. 2a–d je schéma vytvárania interferenčných prúžkov koncentračných polí pri nastavení interferometra na nekonečnú šírku interferenčných prúžkov v reálnom čase. Pri tomto nastavení interferometra sa zmena fázy svetelnej vlny prejaví vznikom interferenčných prúžkov, ktoré môžeme sledovať na matnici alebo na nejakom vizualizačnom prístroji, ako je kamera alebo fotoaparát. Na obrázkoch vidieť nárast hrúbky medznej vrstvy (postupné pribúdanie interferenčných prúžkov).

Interferenčné metódy výskumu fázových predmetov sú založené na vzájomnom pôsobení dvoch koherentných vln, z ktorých jedna sa deformuje prechodom cez optickú nehomogenitu a druhá prechádza cez opticky nerušenú oblasť. Na matnici je potom možné vidieť striedajúce sa maximá a minimá intenzity svetla (interferenčné prúžky), z ktorých možno určiť zmeny indexu lomu v sledovanej oblasti. Na obr. 2 je zobrazený vplyv optickej nehomogenity. V mieste, kde je vyššia koncentrácia, je iný index lomu a teda dochádza k deformácii svetelnej vlny, čo sa prejavuje vytváraním interferenčných prúžkov.

## Experiment

Makrokyveta s rozmermi  $10 \times 10 \times 40$  mm bola upevnená v špeciálnom držiaku a pred experimentom bola naplnená destilovanou vodou s teplotou  $25^\circ\text{C}$ . Pri udržiavaní konštantnej teploty vody bol urobený referenčný hologram (obr. 3a), ktorý bol potrebný na to, aby bolo možné sledovať celý difúzny proces v reálnom čase. Z obr. 3a vidieť, že na referenčnom holograme sa v spodnej časti nenachádza sadrovec. Na obr. 3b vidieť v spodnej časti makrokyvety vložený rozštiepený kryštál sadrovca



Obr. 3. Interferogramy rozpúšťajúceho sa sadrovca v destilovanej vode; a) referenčný hologram, b) začiatok procesu, c) po 5 min, d) po 30 min, e) po 66 min, f) po 99 min, g) po 109 min, h) po 128 min, i) po 160 min, j) po 237 min, k) po 286 min

z hlohoveckej tehelne s rozmermi  $5 \times 5 \times 1$  mm. Hneď po vložení sadrovca do makrokyvety bol urobený záznam obrazu na začiatku rozpúšťania (obr. 3c). Následne boli zaznamenávané interferogramy v časových intervaloch uvedených pod obr. 3.

Svetelná vlna, ktorá prechádza cez transparentné prostredie, sa deformuje, mení sa fáza svetelnej vlny, preto tieto optické nehomogenity z hľadiska optiky nazývame aj fázové predmety. Interferometer umožňuje zobrazit' ľubovoľnú zmenu fázy svetelnej vlny  $\Delta\varphi = 2\pi b\Delta n/\lambda$  ( $b$  je dĺžka optickej dráhy v makrokyvete, pozri obr. 2) a teda ľubovoľnú zmenu indexu lomu  $\Delta n$  tekutiny. Preto môže byť zaznamenaná zmena molality rozpustenej látky  $\Delta m = \Delta n/(\partial n/\partial m) = N\lambda/(b(\partial n/\partial m))$  v roztoku<sup>11</sup>, kde  $N$  je interferenčný rád (číslo interferenčného prúžku).

Na obr. 3 vidieť svetlú homogénnu zónu nad prúžkami, ktorá je považovaná za čistú vodu, heterogénna šedá zóna (napr. na obr. 3c, 3j) je považovaná za zónu s parazitnými prúžkami, ktoré sú spôsobené chvením v laboratóriu, napr. prechodom osôb v budove, čo vyvoláva náhodnú zmenu optickej dráhy a prejavuje sa to na obraze.

Na obr. 3b nie je badateľná žiadna zmena farby v porovnaní s referenčným hologramom, to znamená, že fáza ostala nezmenená a môžeme usudzovať, že v tejto zóne ešte nenastal proces rozpúšťania a teda nie je vytvorený interferenčný prúžok.

Na obr. 3c vidieť prvý interferenčný prúžok, ktorý vznikol zmenou fázy svetelnej vlny zapríčinenou zmenou molality prostredia v makrokyvete  $\Delta m = \lambda/(2b(\partial n/\partial m))$ . Postupným rozpúšťaním sadrovca dochádzalo k narastaniu hrúbky difúzneho fázového rozhrania, ktoré sa prejavuje zvyšovaním počtu interferenčných prúžkov. Na obr. 4 vidno postupne zrekonštruovanú molalitu v celej makrokyvete.

$$m(z, t) = m^{sat} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) - \exp \left[ \frac{k\beta z}{D\rho m^{sat}} + \left( \frac{k\beta}{D\rho m^{sat}} \right)^2 Dt \right] \times \operatorname{erfc} \left[ \frac{z}{2\sqrt{Dt}} + \frac{k\beta}{D\rho m^{sat}} \sqrt{Dt} \right] \right] \quad (8)$$

#### Analýza údajov

Na dne makrokyvety prebieha chemická reakcia podľa vzťahu (1). Vzhľadom na súmernosť experimentu to môže byť redukované na jednorozmerný difúzny problém pozdĺž vertikálnej osi.

Použitá metóda je citlivá na zmenu indexu lomu  $n$  bez ohľadu na druh spôsobujúci túto zmenu. V skutočnosti oba ióny  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  spôsobujú modifikáciu  $n$ , navyše tam môže byť podiel iónových párov a nečistôt. Preto je experimentálne sprístupnená účinná molalita rozpusteného sadrovca na pozícii  $z$  v čase  $t$ <sup>11</sup>:

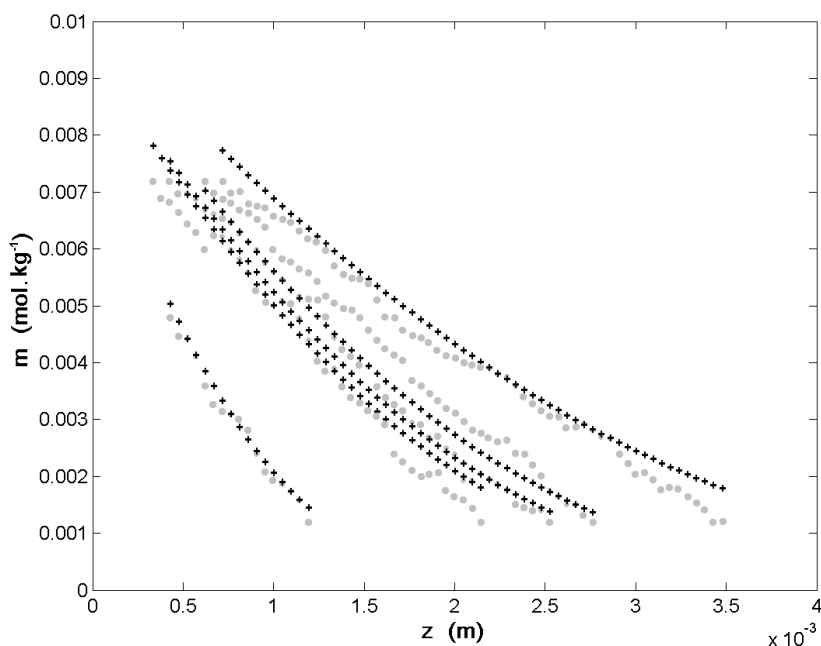
$$m(z, t) \approx m_{\text{Ca}^{2+}}(z, t) = m_{\text{SO}_4^{2-}}(z, t) \quad (6)$$

Na vyhodnotenie  $m$  pozdĺž vertikálnej súradnice ako funkcie času, bol použitý 2. Fickov zákon. Ak je difúzny koeficient považovaný za konštantu v našom rozsahu molality, zákon hovorí:

$$\left( \frac{\partial m}{\partial t} \right)_z = D \left( \frac{\partial^2 m}{\partial z^2} \right)_t \quad (7)$$

kde  $D$  je interdifúzny koeficient roztoku v priestore a čase.

Riešením rovnice (7) je<sup>12</sup> rovnica (8), kde  $\rho$  je hustota roztoku,  $\beta = s_r/s$  je geometrická konštantá,  $s$  je plocha úseku kolmého na transport hmoty,  $s_r$  je plocha rozpúšťacieho rozhrania,  $\operatorname{erfc}$  je komplementárna chyba funkcie.



Obr. 4. Molalita počas experimentu z obr. 3

## Dosiahnuté výsledky

Na získanie koncentračného poľa z holografických interferogramov treba poznať hodnotu  $\partial n/\partial m$ . Pri analýze bola použitá hodnota  $\partial n/\partial m = 0,0222 \text{ kg mol}^{-1}$  podľa autorov Colombani a Bert<sup>11</sup>, ktorí merali index lomu Abbeho refraktometrom vo vode, kde bol rozpustený sadrovec až do nasýtenia pri teplote okolia. Naše merania boli uskutočnené pri teplote 25 °C.

Hodnoty  $m^{\text{sat}}$ ,  $D$  a  $k$  boli získané preložením experimentálnej krivky  $m(z, t)$  výrazom (8).

Na obr. 4 vidieť postupne zrekonštruovanú molalitu v celej makrokyvete. Krúžky v grafoch predstavujú experimentálne získané body, + zodpovedajú teoreticky preloženým krivkám.

Preložením krivky podľa vzťahu (8) bola stanovená hodnota  $m_{\text{sat}} = 11 \text{ mmol kg}^{-1}$ , difúzny koeficient  $D = 2,581 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , konštanta rozpúšťania  $k = 3,242 \cdot 10^{-5} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  pri teplote 25 °C.

## Záver

Difúzny koeficient hmoty v kvapaline môže byť určený teoreticky alebo môže byť nájdený z dostupných experimentálnych korelácií. Takto získané hodnoty sú len aproximatívne. Ak je potrebná väčšia presnosť, mali by byť aplikované experimentálne metódy. Holografická interferometria patrí k takýmto metódam. Pomocou metódy holografickej interferometrie sme sledovali proces rozpúšťania

a difúzie sadrovca v destilovanej vode, vypočítali sme hodnoty rýchlostnej konštanty rozpúšťania  $k$  a difúzneho koeficientu  $D$ .

Získané hodnoty neboli vypočítané ako priemerné hodnoty z množstva meraní ďaleko od povrchu látky, ako je to vo väčšine štandardných makroskopických experimentov, ale pomocou metódy holografickej interferometrie boli sledované procesy priamo na povrchu kryštálu a boli vypočítané hodnoty, ktoré charakterizujú mikroskopickú prenosovú rýchlosť na rozhraní sadrovec – voda.

*Príspevok bol pripravený v rámci riešenia grantovej úlohy KEGA 027TUZVO-4/2011 Vizualizačné a meracie metódy pre hodnotenie efektívnych spôsobov prenosu tepla.*

## LITERATÚRA

1. Jeschke A. A., Vosbeck, K., Dreybrodt W.: *Geochim. Cosmochim. Acta* 65, 27 (2001).
2. Kuechler R., Noack K., Zorn T.: *Ecol. Model.* 176 (2004).
3. Raines M., Dewers T.: *Chem. Geol.* 140, 29 (1997).
4. Raju K., Atkinson G.: *Chem. Eng. Data* 35, 361 (1990).
5. Melichová Z., Reguli J., Nagyová I., Samešová D.: *Základy elektrochémie*. <http://www.fpv.umb.sk/kat/kch/elektrochem/Elektrochemia/Teoria/1.3.html> stiahnuté 27.3.2012.
6. Langmuir D.: *Aqueous Environmental Geochemistry*.

Pretice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 1997.

7. Lasaga A. C.: *Kinetics Theory in the Earth Sciences*. Princeton Ser. in Geochem, Princeton univ. press, Princeton 1998.
8. Barton A. F. M., Wilde N. M.: *Trans. Faraday Soc.* 67, 3590 (1971).
9. Koniar J.: *Kandidátska dizertačná práca*. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen 2008.
10. Černecký J., Pivarčiová E.: *Possibilities and Prospects of Holography*. Izhevsk State Technical University (Russia), Izhevsk 2007.
11. Colombani J., Bert J.: *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 1913 (2007).
12. Crank J.: *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, Oxford 1975.

**J. Černecký and E. Pivarčiová** (*Faculty of Environmental and Manufacturing Technology, Technical University, Zvolen*): **Visualisation and Analysis of Diffusion Processes at the Mineral-Water Phase Boundary**

The article describes visualisation and analysis of diffusion processes using holographic interferometry. We investigated the process of dissolution and diffusion of gypsum in distilled water using holography and calculated the dissolution and diffusion rate constants. The values were not obtained as mean values of a number of measurements far away from the substance surface, as it is in majority of standard macroscopic measurements, but they were obtained directly by the experiment. The used method of holographic interferometry displayed particularly the area where diffusion occurred. It visualised the whole field of macro-cuvette integrally which is a great advantage of the method. This method made it possible to observe diffusion process around the gypsum crystal in real time. We calculated the values which characterise microscopic transmission velocity in the interface of a mineral and water.

Dissolution of gypsum took place at the bottom of the macrocuvette. To evaluate the concentration along the vertical coordinate as the function of time Fick's 2nd law was used. By comparing the measured values with the theoretical curve, the values  $m_{\text{sat}} = 11 \text{ mmol kg}^{-1}$ , diffusion coefficient  $D = 2.581 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , dissolution rate constant  $k = 3.242 \cdot 10^{-5} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  at 25 °C were determined.