

IMOBILIZACE OLOVNATÝCH IONTŮ NA UHLÍ – TERMODYNAMICKÝ POHLED

BOLESLAV TARABA a PETRA VESELÁ

Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita v Ostravě,
30. dubna 22, 701 03 Ostrava
boleslav.taraba@osu.cz

Došlo 2.2.12, přijato 1.3.12.

Klíčová slova: termodynamika adsorpce, kalorimetrie, Pb^{2+} ionty, přírodní uhlí

Úvod

Termodynamická analýza adsorpčního procesu umožňuje posoudit míru (termodynamické) spontánnosti a poznat hybné síly tohoto děje pro studovaný systém. Za základní veličiny se v této souvislosti pokládají změny Gibbsovy energie ΔG , entalpie ΔH a entropie ΔS (cit.^{1,2}). Pro adsorpci z kapalně fáze jsou přednostně publikovány hodnoty termodynamických parametrů, jak byly zjištěny výpočtem z teplotní závislosti rovnovážné konstanty adsorpce K_a (cit.³⁻¹⁴). Za předpokladu, že změny entalpie i entropie jsou ve studovaném teplotním rozmezí konstantní, je možno (v souladu s van't Hoffovou rovnicí) psát:

$$\ln(K_a) = -\Delta H/(RT) + \Delta S/R$$

kde R je univerzální plynová konstanta ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) a T je termodynamická teplota (K).

Hodnota rovnovážné konstanty adsorpce K_a přitom souvisí se změnou Gibbsovy energie (za standardních podmínek) podle základního vztahu:

$$\Delta G = -RT \ln(K_a)$$

Z průběhů $\ln(K_a)$ versus $1/T$ je tak možno vyčíslit jak změnu entalpie ΔH (ze směrnice přímky), tak změnu entropie adsorpčního procesu ΔS (z úseku přímky). Uvedený postup je výlučně využíván i pro termodynamický popis adsorpce olovnatých iontů z vodného prostředí^{3,4-13}. Imobilizace Pb^{2+} na uhlíkatých látkách je tak obvykle charakterizována jako termodynamicky spontánní a endotermický proces, který je primárně řízen nárůstem entropie^{3,5,9-13}. Zjištěná endotermicita je přitom v rozporu s klasickými představami o adsorpci z fáze plynné, která je evidentně exotermní^{1,2}; vysvětluje se to spotřebou energie na rozrušení hydratační „slupky“ okolo kationtu při jeho imobilizaci na povrch sorbentu^{11,14}. Bezprostřední porovnání vyčíslených hodnot entalpie adsorpce Pb^{2+} s experimentálními údaji adsorpčního tepla však dosud chybí.

Předkládaný příspěvek přináší konfrontaci vypočtených a naměřených entalpií adsorpce olovnatých iontů na vzorcích přírodního a aktivního uhlí. Bude ukázáno, že

hodnoty entalpie získané termodynamickou analýzou adsorpčních dat se mohou diametrálně odlišovat od hodnot adsorpčních tepel z přímých, kalorimetrických měření.

Experimentální část

Vzorková základna

Byly sledovány dva vzorky přírodního uhlí (označení A, H) a vzorek uhlí aktivního (označení HS). Vzorek A představuje tzv. oxidačně alterované černé uhlí¹⁵ z OKR, vzorek H je hnědé uhlí ze Severočeské hnědouhelné pánve a vzorek aktivního uhlí (HS) byl vyroben ze dřeva v dřívějších Hrušovských chemických závodech. Jakostní analýza a texturní parametry sledovaných uhlí byly uvedeny v dřívějším sdělení¹⁶.

Adsorpční měření

Před adsorpčními experimenty byly vzorky opakovaně vyluhovány deionizovanou vodou, poté 2 hodiny sušeny při $105 \text{ }^\circ\text{C}$ a následně prosety na zrnitostní frakci 0,06 až 0,25 mm. Adsorpční izotermy olovnatých iontů z vodného prostředí byly proměřeny při teplotách $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ s využitím vsádkového uspořádání (bližší viz¹⁶). Stanovení izoterem bylo, s výjimkou teploty $80 \text{ }^\circ\text{C}$ u vzorků A a H, minimálně 2× opakováno.

Kalorimetrická měření adsorpčních tepel

Adsorpční tepla olovnatých iontů na studovaných vzorcích byla proměřena s využitím kalorimetru Setaram C80 (Francie) při teplotní úrovni $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Aplikovány byly techniky průtokové kalorimetrie (perkolační kalorimetrická cela) a smáčecí kalorimetrie (směšovací kalorimetrická cela).

Průtoková kalorimetrie

Byla použita frontální varianta, kdy průtok deionizované vody ($0,4 \text{ ml min}^{-1}$) byl zaměřen za průtok vodného roztoku o známé koncentraci olovnatých iontů. Monitorován byl tepelný efekt spjatý s interakcí adsorbátu se vzorkem až do dosažení (zjevné) adsorpční rovnováhy (za cca 1,5 h). K měření byly použity roztoky o koncentraci $Pb(NO_3)_2$ 20 mmol dm^{-3} (vzorky A, H), resp. 5 mmol dm^{-3} (vz. HS). Navážky uhlí se pohybovaly okolo 1,5 g.

Smáčecí kalorimetrie

Ke sledování byla použita varianta modifikované smáčecí kalorimetrie¹⁷, kdy se do spodní části kalorimetrické cely připraví suspenze uhlí s vodou ($0,2 \text{ g uhlí} + 0,8 \text{ ml H}_2\text{O}$) a do horní části cely (nad dělicí membránu) se odměří vodný roztok o známé koncentraci olovnatých iontů ($10\text{--}50 \text{ mmol dm}^{-3}$, 3 ml). Propojením obou částí

celý tak je iniciován proces „čisté“ sorpce na povrchu uhlí bez doprovodného efektu jeho smáčení. Zjištěné hodnoty adsorpčních tepel byly korigovány na „slepé“ tepelné efekty spjaté s perforací membrány a s promícháváním suspenze, které byly stanoveny ze samostatných měření.

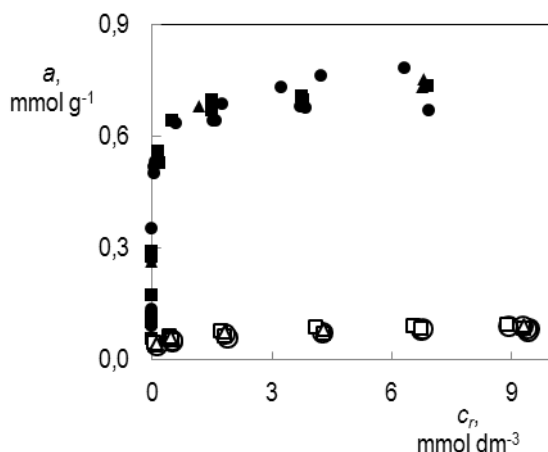
Naměřená data z obou kalorimetrických technik byla přepočtena na molární adsorpční tepla Q^{ads} ($J mol^{-1}$), přičemž odpovídající naadsorbovaná množství olovnatých iontů při dané zkoušce byla zjištěna nepřímo z adsorpční izotermy Pb^{2+} na daném vzorku (průtoková kalorimetrie), resp. z přímého stanovení obsahu olovnatých iontů v roztoku před a po kalorimetrické zkoušce (smáčecí kalorimetrie).

Výsledky a diskuse

Rovnovážné adsorpční izotermy

Naměřené adsorpční izotermy olovnatých iontů lze tvarově přiřadit k izotermám prvního typu dle Brunauer^{1,2}, přičemž v závislosti na teplotě (ve sledovaném rozmezí 30–80 °C) nebyly v jejich průbězích pozorovány výraznější rozdíly, viz obr. 1.

Pro kvantifikaci adsorpčních dat byl použit Langmuirův a Freundlichův model, které se pro adsorpci z kapalně fáze používají zřejmě nejčastěji^{5–8,10,11,18–20}. Oba také poskytují informaci o adsorpčních kapacitách sledovaných vzorků, což skýtá možnost (objektivnější) konfrontace adsorbovaných množství olovnatých iontů při různých teplotních úrovních.



Obr. 1. Rovnovážné adsorpční izotermy Pb^{2+} iontů na vzorcích přírodního uhlí; a je naadsorbované množství, c_r je rovnovážná koncentrace Pb^{2+} iontů v roztoku, vz. A – plně symboly, vz. H – prázdné symboly; ●, ○ – 30 °C, ■, □ – 60 °C, ▲, △ – 80 °C

Langmuirův model byl verifikován rovnicí v linearizovaném tvaru:

$$c_r/a = c_r/a_m + 1/(a_m \cdot K_L)$$

kde a je množství Pb^{2+} iontů ($mmol g^{-1}$) naadsorbovaných na uhlí v roztoku o rovnovážné koncentraci olovnatých iontů c_r ($mmol dm^{-3}$). Parametr a_m představuje adsorpční kapacitu při monovrstevném pokrytí povrchu ($mmol g^{-1}$). Langmuirova konstanta K_L ($dm^3 mmol^{-1}$) je v původním modelu pro soustavu „plynný adsorbát – pevný adsorbent“ rovna podílu rychlostních konstant adsorpčního a desorpčního procesu^{1,2}; k obdobnému vyjádření této konstanty dospěli Klučáková s Pekařem i pro adsorpci z kapalně fáze²¹. Parametr K_L tak lze pokládat za (kinetickou) rovnovážnou konstantu adsorpce, čehož se při termodynamické analýze adsorpce z kapalně fáze nezřídká využívá^{5,22–25}.

Freundlichův, empirický model je (také) dvouparametrický a v linearizovaném tvaru jej lze vyjádřit rovnicí:

$$\ln(a) = (1/n) \ln(c_r) + \ln(K_F)$$

kde n , K_F jsou Freundlichovy konstanty. Parametr K_F je označován jako adsorpční kapacita¹¹ a číselně odpovídá množství Pb^{2+} iontů ($mmol g^{-1}$) naadsorbovaných na uhlí v roztoku o rovnovážné koncentraci olovnatých iontů $c_r = 1 mmol dm^{-3}$.

Základní parametry zjištěné regresí experimentálních dat linearizovanou Langmuirovou a Freundlichovou izotermou shrnuje tabulka I.

Je zajímavé, že nalezené koeficienty korelace R^2 jsou (s výjimkou vzorku A) srovnatelně vysoké a svými hodnotami přes 0,98 signalizují těsnou shodu experimentálních dat s oběma modely.

Výsledky uvedené v tabulce I pak prokazují, že adsorpční kapacity (a_m a K_F) přírodních uhlí A, H jsou při různých teplotních úrovních (v rámci experimentální chyby) de facto konstantní. Takovéto chování neodpovídá klasickým představám o fyzikální adsorpci^{1,2}, ale pro adsorpci z kapalně fáze je teplotní invariance adsorpčních kapacit vůči olovnatým, ale i jiným iontům poměrně častým zjištěním^{7,13,25}.

Termodynamická analýza

Průběhy naměřených adsorpčních izoterm byly následně využity k získání termodynamických parametrů charakterizujících imobilizaci olovnatých iontů na sledovaných vzorcích. Výchozím krokem termodynamické analýzy (v intencích výše uvedeného) bylo zjištění hodnoty rovnovážné konstanty adsorpčního děje K_a pro danou teplotu. Pro tento účel se ukázala jako neschůdná (i když často publikovaná^{5,22–25}) aplikace vyčíslených hodnot Langmuirových konstant K_L a to jak z důvodu neúměrně velké experimentální nepřesnosti jejich stanovení, tak z důvodu neprůkazných (nemonotónních) trendů tohoto parametru s teplotou, viz tabulka I.

Alternativní způsob stanovení rovnovážných konstant adsorpce z kapalně fáze vychází z vyčíslených podílů mezi naadsorbovaným množstvím olovnatých iontů a a odpovídající koncentrací Pb^{2+} iontů v roztoku c_r (cit.^{3,6–10,18,26,27}).

Tabulka I

Výsledky adsorpčních měření^a při teplotních úrovních 30, 60 a 80 °C

Vzorek	Langmuirova izoterma			Freundlichova izoterma				
	v [°C]	30	60	80	v [°C]	30	60	80
A	a_m [mmol g ⁻¹]	0,72 ± 0,06	0,72 ± 0,03	0,74	K_F [dm ³ g ⁻¹]	0,63 ± 0,05	0,63 ± 0,07	0,60
	K_L [dm ³ mmol ⁻¹]	29 ± 27	25 ± 46	19	n	5,85 ± 2,20	5,16 ± 0,36	5,75
	R^2	0,992	0,999	0,999	R^2	0,851	0,882	0,859
H	a_m [mmol g ⁻¹]	0,087 ± 0,003	0,090 ± 0,007	0,093	K_F [dm ³ g ⁻¹]	0,057 ± 0,003	0,063 ± 0,001	0,064
	K_L [dm ³ mmol ⁻¹]	2,2 ± 0,92	3,0 ± 0,02	2,9	n	5,7 ± 1,0	6,5 ± 2,1	6,2
	R^2	0,987	0,987	0,995	R^2	0,953	0,897	0,984
HS	a_m [mmol g ⁻¹]	0,22 ± 0,014	0,18 ± 0,004	0,16 ± 0,013	K_F [dm ³ g ⁻¹]	0,15 ± 0,005	0,13 ± 0,006	0,10 ± 0,009
	K_L [dm ³ mmol ⁻¹]	1,9 ± 1,1	2,1 ± 0,3	1,4 ± 0,004	n	6,3 ± 0,1	6,8 ± 4,2	5,7 ± 0,2
	R^2	0,989	0,995	0,979	R^2	0,987	0,967	0,909

^a v je teplota, a_m je monovrstevná adsorpční kapacita, K_L je Langmuirova konstanta, K_F , n jsou Freundlichovy konstanty, R^2 je koeficient korelace; experimentální chyba odpovídá hodnotě směrodatné odchylky

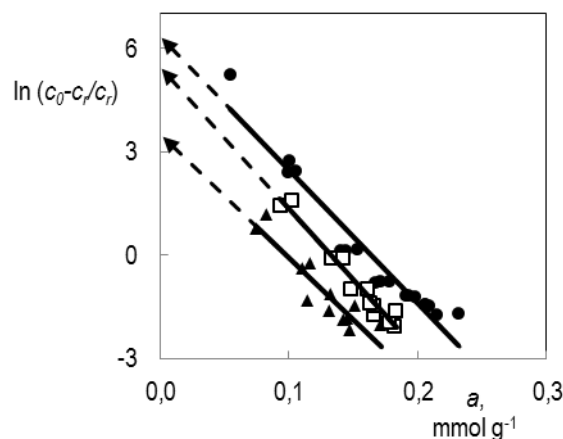
Za hodnotu K_a se někdy pokládá přímo aktuální poměr a/c_r (cit.^{6–8,26}). Přesvědčivější (a zřejmě i korektnější) je však vynesení poměrů a/c_r do závislosti na naadsorbovaném množství a , a konstantu K_a poté odečíst jako hodnotu a/c_r při a extrapolovaném k nule^{3,9,10,27}. Takto vyčíslená rovnovážná konstanta K_a není bezrozměrná (rozměr je obvykle dm³ g⁻¹) a sotva ji tak lze považovat za konstantu termodynamickou. Získání bezrozměrné rovnovážné konstanty někteří autoři řeší (poněkud problematickým) vyjádřením naadsorbovaného množství a i rovnovážné koncentrace c_r pomocí stejných jednotek^{6,18,26}. Elegantnější způsob je ale vyhodnocování koncentračních podílů $(c_0 - c_r)/c_r$, kde c_0 označuje výchozí koncentraci olovnatých iontů v roztoku a čítec $c_0 - c_r$ tak představuje úbytek koncentrace Pb²⁺ iontů z roztoku po jejich adsorpci^{11,28}. V rámci zdejších šetření byly pro vyčíslení rovnovážných konstant adsorpčního děje K_a využity oba uvedené způsoby (a/c_r resp. $(c_0 - c_r)/c_r$), přičemž hodnoty K_a byly odečteny při adsorbovaném množství a extrapolovaném k nule. Příklad takové extrapolace provedené u vzorku HS je uveden na obr. 2.

Zjištěné hodnoty K_a a odpovídající parametry ΔG , ΔH a ΔS procesu adsorpce olovnatých iontů na studovaných vzorcích jsou pro oba vyhodnocovací způsoby uvedeny v tab. II.

Z tab. II lze vyčíst, že adsorpce Pb²⁺ iontů byla potvrzena jako termodynamicky spontánní proces, vykazující pro všechny studované vzorky záporné hodnoty změn Gibbsovy energie. Je ale zajímavé, že u vzorků A a HS je hybnou silou adsorpce změna entalpie vykazující v obou případech výrazně exotermický charakter -28 kJ mol⁻¹ resp. -48 kJ mol⁻¹. Naproti tomu adsorpce olova na hnědém uhlí H vyšla z provedené analýzy jako proces evidentně endo-

termický, spjatý s poměrně výrazným nárůstem entropie ($\Delta S \sim 100$ J mol⁻¹ K⁻¹). To je výsledek podobný většině publikovaných dat z termodynamiky sorpce olova na uhlíkatých látkách^{3,5,9–13}.

Rozhodnout, který z použitých způsobů vyhodnocení rovnovážné konstanty K_a vede ke „správnějším“ hodnotám termodynamických parametrů je na základě dosažených poznatků značně problematické. Stojí ale za pozornost, že obě vyhodnocovací procedury poskytují *de facto* totožné



Obr. 2. Stanovení rovnovážných konstant K_a extrapolací na nulové naadsorbované množství (vz. HS); c_0 je výchozí koncentrace, c_r je rovnovážná koncentrace, a je naadsorbované množství Pb²⁺, ● 30 °C, □ 60 °C, ▲ 80 °C

Tabulka II
Termodynamické parametry^a adsorpce Pb²⁺ iontů na sledovaných vzorcích

Vzorek	a/c_r extrapolováno na $a = 0$					$(c_0 - c_r)/c_r$ extrapolováno na $a = 0$			
	v [°C]	K_a [dm ³ g ⁻¹]	ΔG [kJ mol ⁻¹]	ΔH [kJ mol ⁻¹]	ΔS [J mol ⁻¹ K ⁻¹]	K_a –	ΔG [kJ mol ⁻¹]	ΔH [kJ mol ⁻¹]	ΔS [J mol ⁻¹ K ⁻¹]
A	30	1110	-17,7	-28	-34	10390	-23,3	-28	-15
	60	820	-18,6			7630	-24,8		
	80	195	-15,5			1840	-22,1		
H	30	3	-3,0	24	90	35	-8,8	24	107
	60	7	-5,4			70	-11,7		
	80	14	-7,7			125	-14,2		
HS	30	64	-10,5	-48	-121	590	-16,1	-48	-103
	60	27	-9,1			240	-15,2		
	80	4	-3,8			35	-10,4		

^a v je teplota, a je naadsorbované množství Pb²⁺ iontů, c_r je rovnovážná koncentrace, c_0 je výchozí koncentrace, K_a je rovnovážná konstanta, ΔG je změna Gibbsovy energie, ΔH je změna entalpie, ΔS je změna entropie

adsorpční entalpie ΔH (viz tab. II) a bude proto zajímavé tento parametr porovnat s údaji adsorpčního tepla z přímých, kalorimetrických měření.

Kalorimetrická sledování adsorpčních tepel

Výsledky z experimentálních šetření jak metodou smáčecí, tak průtokové kalorimetrie jsou shrnuty do tab. III.

Přes zřejmý rozptyl experimentálních hodnot realizovaná šetření spolehlivě prokázala, že adsorpce olovnatých iontů je na všech sledovaných vzorcích doprovázena exotermickými efekty. Nejvýraznější molární teplo (okolo -40 kJ mol⁻¹) bylo stanoveno pro aktivní uhlí HS, přičemž naměřená hodnota je poměrně dobře srovnatelná s adsorpční entalpií ΔH , jak byla vypočtena z termodynamické analýzy (viz tab. II). O poznání menší tepelné výviny byly naměřeny při adsorpci olova na vzorcích uhlí přírodního. V tomto případě jsou také naměřená tepla prakticky nesouměřitelná s hodnotami vypočtenými. Nejkřiklavěji je tento rozpor zřejmý pro vzorek hnědého uhlí H, kdy výpočtem byla zjištěna výrazná endotermicita ($\Delta H = 24$ kJ mol⁻¹), ale přímá měření prokázala efekt exotermický ($Q^{ads} = -7$ kJ mol⁻¹, viz tab. II a III).

Proč jsou naměřené a vypočtené hodnoty adsorpční entalpie srovnatelné pouze u vzorku aktivního uhlí, není zcela zřejmé. Může to souviset s odlišným mechanismem adsorpce olova na jeho povrchu, kde evidentně převládá interakce iontů Pb²⁺ s π -systémy grafénových struktur²⁹, naproti tomu u přírodních uhlí se při imobilizaci Pb²⁺ uplatňují především kyslíkaté funkční skupiny (iontovýměna, komplexační reakce)^{30,31} a některé anorganické složky v popelovinách^{16,32}. Rozdílnost imobilizačních mechanismů je také zřejmě příčinou, že teplo adsorp-

Tabulka III
Hodnoty molárních adsorpčních tepel^a olovnatých iontů z kalorimetrických měření

Vzorek	Q^{ads} [kJ mol ⁻¹]	
	průtoková kalorimetrie	smáčecí kalorimetrie
A	-2,5 ± 0,5	-1,5 ± 1
H	-6,5 ± 1,5	-7 ± 2
HS	-38 ± 2,0	-41 ± 5

^a Q^{ads} je adsorpční teplo, experimentální chyba odpovídá hodnotě směrodatné odchylky (z minimálně tří měření), teplota 30 °C

ce olova na aktivním uhlí více než 5× převyšuje tepelné efekty doprovázející sorpci Pb²⁺ na uhlí přírodních (tab. III). Stojí přitom za poukázání, že námi naměřené hodnoty Q^{ads} pro přírodní uhlí plně korespondují s úrovní tepelných efektů interakcí mezi kovovými kationty a kyslíkatými funkčními skupinami, jak byly zjištěny numerickými simulacemi s využitím semiempiricko-kvantového modelu „INDO“³³.

Závěr

Studium adsorpce olovnatých iontů prokázalo, že hodnoty změny entalpie ΔH stanovené z termodynamické analýzy korelují s údajem adsorpčního tepla z přímých kalorimetrických měření pouze u vzorku aktivního uhlí. V případě uhlí přírodních jsou tyto hodnoty prakticky ne-

souměřitelné. Možné vysvětlení zjištěné diskrepance lze spatřovat v odlišném mechanismu imobilizace Pb^{2+} iontů na aktivním uhlí oproti uhlím přírodním.

Tato práce vznikla s podporou projektu IAA 301870801 a projektu Institut environmentálních technologií, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0100.

LITERATURA

- Gregg S. J., Sing K. S. W.: *Adsorption, Surface Area and Porosity*. Academic Press, London 1982.
- Ponec V., Knorr Z., Černý S.: *Adsorpce na tuhých látkách*. SNTL, Praha 1968.
- Li Y. H., Di Z. C., Ding J., Wu D., Luan Z., Zhu Y.: *Water Res.* 39, 605 (2005).
- Ghasemi J., Asadpour S.: *J. Chem. Thermodyn.* 39, 967 (2007).
- Shibi I. G., Anirudhan T. S.: *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 81, 433 (2006).
- Bereket G., Aroguz A. Z., Ozel M. Z.: *J. Colloid Interface Sci.* 187, 338 (1997).
- Li, Q. Z., Chai, L. Y., Yang, Z. H., Wang, Q.: *Appl. Surf. Sci.* 255, 4298 (2009).
- Sari A., Tuzen M., Citak D., Soylak M.: *J. Hazard. Mater.* 148, 387 (2007).
- Al-Haidary A. M. A., Zanganah F. H. H., Al-Azawi S. R. F., Khalili F. I., Al-Dujaili A. H.: *Water, Air, Soil Pollut.* 214, 73 (2011).
- Sekar M., Sakthi V., Rengaraj S.: *J. Colloid Interface Sci.* 279, 307 (2004).
- Erentürk S., Malkoç E.: *Appl. Surf. Sci.* 253, 4727 (2007).
- Rao G. P., Lu C., Su F.: *Sep. Purif. Technol.* 58, 224 (2007).
- Singh R., Chadetrik R., Kumar R., Bishnoi K., Bhatia D., Kumar A., Bishnoi N. R., Singh N.: *J. Hazard. Mater.* 174, 623 (2010).
- Srivastava V. C., Swamy M. M., Mall I. D., Prasad B., Mishra I. M.: *Colloids Surf., A* 272, 89 (2006).
- Klika Z., Kraussová J.: *Int. J. Coal Geol.* 22, 217 (1993).
- Taraba B., Veselá P., Maršálek R.: *Chem. Listy* 105, 966 (2011).
- Taraba B.: *J. Therm. Anal. Calorim.* 107, 923 (2012).
- Anirudhan T. S., Radhakrishnan P. G.: *J. Chem. Thermodyn.* 40, 702 (2008).
- Radovic L. R., Moreno-Castilla C., Rivera-Utrilla J.: *Chem. Phys. Carbon* 27, 227 (2000).
- Strnadová N., Matějková D.: *Chem. Listy* 100, 803 (2006).
- Klučáková M., Pekař M.: *Colloids Surf., A* 286, 126 (2006).
- Mohan D., Gupta V. K., Srivastava S. K., Chander S.: *Colloids Surf., A* 177, 169 (2001).
- Kuo C. Y.: *Desalination* 249, 781 (2009).
- Dursun G., Cicek H., Dursun A. Y.: *J. Hazard. Mater.* B125, 175 (2005).
- Qadeer R., Hanif J., Saleem M., Afzal M.: *Colloid Polym. Sci.* 271, 83 (1993).
- Zhang Y., Chen J., Yan X., Feng Q. M.: *J. Chem. Thermodyn.* 39, 862 (2007).
- Niwas R., Gupta U., Khan A. A., Varshney K. G.: *Colloids Surf., A* 164, 115 (2000).
- Qader R., Hanif J.: *Carbon* 32, 1433 (1994).
- Machida M., Mochimaru T., Tatsumoto H.: *Carbon* 44, 2681 (2006).
- Song X. L., Liu H. Y., Cheng L., Qu Y.: *Desalination* 255, 78 (2010).
- Qiu Y., Cheng H., Xu C., Sheng G. D.: *Water Res.* 42, 567 (2008).
- Machida M., Yamazaki R., Aikawa M., Tatsumoto H.: *Sep. Purif. Technol.* 46, 88 (2005).
- Klučáková M., Pelikán P., Lapčík L., Lapčíková B., Kučerík J., Kaláb M.: *J. Polym. Mater.* 17, 337 (2000).

B. Taraba and P. Veselá (Faculty of Science, University of Ostrava, Ostrava): Immobilization of Lead(II) Ions on Coal – A Thermodynamic View

Immobilization of Pb(II) ions from aqueous solutions on two types of coals and activated carbon was investigated at 30, 60 and 80 °C. Based on the thermodynamic analysis of the experimental data, changes in Gibbs energy, enthalpy and entropy of the adsorption were evaluated. The calculated values of the adsorption enthalpy were compared with Pb(II) adsorption heats determined experimentally using calorimetric measurements. Thus, noteworthy differences between the calculated and measured values were found for coal while for the activated carbon, the values were comparable. The discrepancy may be due to different mechanisms of the Pb(II) immobilization.