

## TESTOVÁNÍ ADSORBENTŮ PRO SEPARACI OXIDU UHLIČITÉHO Z PLYNŮ

KAREL CIAHOTNÝ<sup>a</sup>, EVA ČERNÁ<sup>b</sup>  
a MICHALA MACHÁČKOVÁ<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6, <sup>b</sup> Contipro C, a.s., 561 02 Dolní Dobrouč 401, <sup>c</sup> Vodovody a kanalizace Chrudim, a.s., Novoměstská 626, 537 01 Chrudim II  
Karel.Ciahotny@vscht.cz

Došlo 29.6.12, přijato 7.12.12.

Klíčová slova: oxid uhličitý, separace, plyn, adsorpce, desorpce

### Úvod

Oxid uhličitý patří k nejvýznamnějším skleníkovým plynům. Dlouholetým měřením jeho koncentrací ve vzduchu a výzkumem vzduchu z hlubokých vrstev arktických ledovců<sup>1,2</sup> bylo potvrzeno neustálé zvyšování koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší. Největší nárůst byl zjištěn v době průmyslové revoluce v souvislosti s růstem používání fosilních paliv jako zdroje energie.

Přestože má CO<sub>2</sub> ze skleníkových plynů nejnižší radiční účinnost, tvoří v současné době více než 70 % antropogenních emisí všech skleníkových plynů; z toho přes 50 % připadá na sektor fosilní energetiky<sup>3</sup>.

V roce 2007 světové emise CO<sub>2</sub> z energetiky tvořily 29,7 Gt rok<sup>-1</sup>; podle odhadů<sup>4</sup> budou v roce 2020 představovat 33,8 Gt rok<sup>-1</sup> a v roce 2035 42,4 Gt rok<sup>-1</sup>. Proto je nezbytným krokem k výraznému snížení emisí CO<sub>2</sub> pocházejícího z energetiky využití nově vyvíjených technologií pro zachyt, transport a ukládání CO<sub>2</sub> do vhodného úložiště, resp. jeho využití pro zvýšení výtěžnosti ložisek ropy a zemního plynu.

Spaliny ze spalování fosilních paliv obsahují přibližně 10–15 obj. % CO<sub>2</sub>. Pro snižování emisí CO<sub>2</sub> z technologických zařízení se v současnosti v nejpokročilejším stupni vývoje nacházejí absorpční metody, pracující většinou s absorpčními roztoky na bázi organických aminů nebo uhličitánů<sup>5</sup>. Tyto metody mají však také řadu nevýhod, z nichž hlavní jsou nevhodnost pro vyšší teploty čištění plynu, finanční i energetická náročnost jejich provozu a problémy s korozí zařízení. Proto jsou paralelně vyvíjeny také metody pracující na principu adsorpce CO<sub>2</sub> na vhodných adsorbentech. Tato práce je zaměřena na testování vhodných adsorbentů pro zachyt CO<sub>2</sub> ze spalin fosilních paliv.

### Experimentální část

V laboratorním měřítku byly prováděny experimenty zaměřené na testování různých druhů komerčně dostupných adsorpčních materiálů pro zachyt CO<sub>2</sub> z modelových směsí. Byla sestavena experimentální aparatura, na které byly proměřeny adsorpční kapacity vybraných komerčně vyráběných adsorbentů pro CO<sub>2</sub> za různých experimentálních podmínek. Adsorbenty saturované CO<sub>2</sub> byly dále podrobeny regeneraci snížením tlaku v adsorbéru či zvýšením teploty adsorbentu při současném snížení tlaku v adsorbéru. Ohřev adsorbentu na vyšší teploty byl prováděn pomocí vzduchového termostatu nebo použitím mikrovlnného záření.

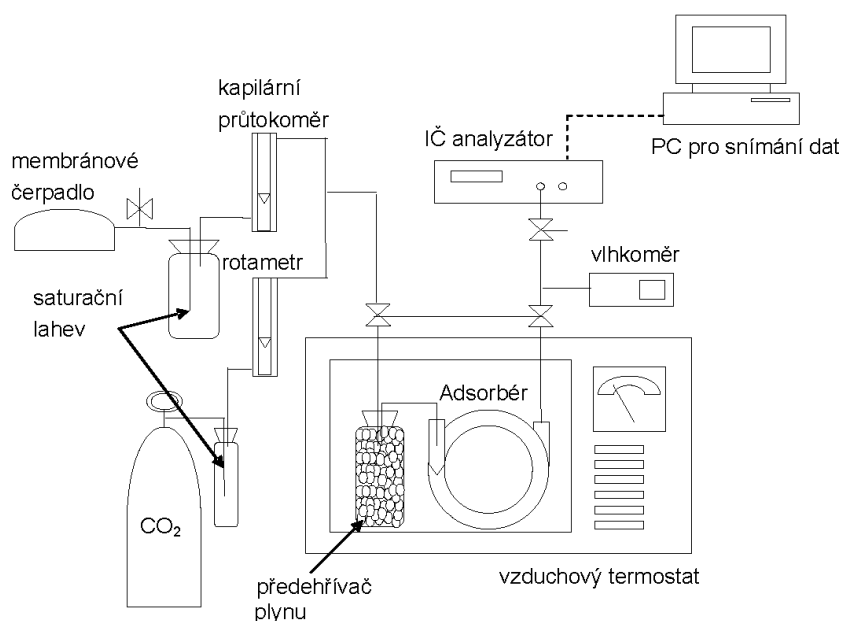
#### Popis laboratorní adsorpční aparatury

Pro měření adsorpčních kapacit vybraných adsorbentů pro CO<sub>2</sub> byla používána aparatura schematicky znázorněná na obr. 1. Modelové směsi oxidu uhličitého a laboratorního vzduchu byly připravovány mísením dvou proudů plynů. Prvním proudem byl oxid uhličitý z tlakové nádoby (CO<sub>2</sub> potravinářský, SIAD s.r.o.) a druhým laboratorní vzduch čerpaný membránovým čerpadlem. Oba proudy byly syceny vodní parou probubláváním v saturačních lahvích naplněných destilovanou vodou na rosný bod v rozmezí od 18 do 20 °C (tomu odpovídá obsah vodní páry v plynné směsi 15,5–17,5 g m<sup>-3</sup>) a následně byly míseny ve směšovací lahvi; jejich vzájemným poměrem bylo možné nastavit potřebnou koncentraci CO<sub>2</sub> ve výsledné směsi, která dále procházela adsorbérem, umístěným v termostatovaném prostoru vzduchového termostatu. Před adsorbér byla v termostatu zařazena promývací lahev naplněná skleněnými kuličkami, která sloužila jako předehříváč směsi plynů a zajišťovala ohřev modelové směsi na teplotu měření.

Adsorbér byl tvořen skleněnou trubicí o vnitřním průměru 15 mm a délce 200 cm stočenou do spirály o průměru cca 30 cm. Trubice byla na obou koncích ukončena normalizovanými zábrusy, do kterých se zasouvaly přechodky pro napojení přívodní a odvodní hadice pro plynou směs. Aktivní objem adsorbéru činí asi 0,35 dm<sup>3</sup>, což umožňuje naplnit adsorbér adsorbentem v množství cca 250–280 g podle sytné hmotnosti daného adsorbentu.

K měření koncentrace CO<sub>2</sub> byl používán IČ-analyzátor A.I.R. LF firmy Aseko s automatickým sběrem dat připojený k počítači. Měření probíhalo vždy tak dlouho, dokud se koncentrace CO<sub>2</sub> na výstupu z adsorbéru nevyrovнала koncentraci vstupní a nesetřvala na této hodnotě aspoň 5 min. Kalibrace analyzátoru byla prováděna minimálně jedenkrát denně pomocí proudu dusíku (N<sub>2</sub>, SIAD s.r.o.) pro nastavení nulové hodnoty a směsí 12 % CO<sub>2</sub> v dusíku (zvláštní plyn, Linde Technoplyn a.s.). K nastavení průtoků byly používány kapilární průtokoměry kalibrované pomocí bublinových průtokoměrů.

Aparatura byla vybavena kalibrovanou elektronickou vlhkostní sondou s příslušenstvím firmy Testo (typ Testo



Obr.1. Schéma laboratorní aparatury pro měření adsorpce ze směsi obsahujících vodní páru

400) pro měření vlhkosti plynu.

Postup měření průnikových křivek pro CO<sub>2</sub> za různých podmínek

Uzavřený adsorbér naplněný testovaným adsorbentem byl nejdříve umístěn do termostatu a po dobu 15 min vyhříván na požadovanou teplotu experimentu. Během této doby byla pomocí kapilárních průtokoměrů a regulačních ventilů nastavena žádaná koncentrace CO<sub>2</sub> v modelové směsi. Během nastavování proudil plyn by-passem mimo adsorbér. Poté byla stanovena počáteční hmotnost adsorbéru s adsorbentem při teplotě měření. Adsorbér byl znovu vložen do termostatu a zapojen do aparatury tak, aby mohlo být započato vlastní měření. Potom byl proud plynu z by-passu přepnut do adsorbéru a byl sledován průběh koncentrace CO<sub>2</sub> na výstupu z adsorbéru v závislosti na čase. Když se koncentrace CO<sub>2</sub> v proudu plynu vystupujícím z adsorbéru ustálila na hodnotě vstupní koncentrace a po dobu 5 min se neměnila, byl pokus ukončen, adsorbér vyjmut z aparatury, opětovně zvážen a stanoven přírůstek hmotnosti adsorbentu.

Měření probíhalo při koncentracích oxidu uhličitého 10, 15 a 20 obj.%, teploty v adsorbéru byly nastavovány v rozmezí od 25 °C do 160 °C. Průtok plynné směsi adsorbérem byl nastavován na 200 dm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Vlastnosti použitých adsorbentů

K testování byly použity následující komerčně dostupné adsorbenty:

- Molekulové síto Tamis moléculaires 5A je syntetické molekulové síto dodávané firmou Axens (Salindres plant, Francie) ve formě bílých extrudovaných válečků o průměru 1,6 mm a délce do 5 mm. Složení vzorku (v dehydratovaném stavu) bylo stanoveno metodou rentgenové fluorescence: Na<sub>2</sub>O . 2 CaO . 7 SiO<sub>2</sub> . 7 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Velikost pórů udávaná výrobcem je 0,5 nm.
  - Zeolitické molekulové síto 13X dodávané firmou Sigma-Aldrich je zástupcem zeolitů 13X s velikostí pórů 0,9–1 nm, je dodáváno ve formě kuliček průměru 4–8 mm. Složení bylo v bezvodém stavu stanoveno metodou rentgenové fluorescence: Na<sub>2</sub>O . 0,1 MgO . 3 SiO<sub>2</sub> . 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
  - Klinoptilolith je přírodní zeolitický materiál těžený na jižním Slovensku v lokalitě Nižný Hrabovec, dodávaný firmou Zeocem rozdrcený do různých frakcí. K měření byla použita frakce o velikosti částic 0,5–1,5 mm. Složení Klinoptilolithu je (Ca,K<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>Mg)<sub>4</sub> Al<sub>8</sub>Si<sub>40</sub>O<sub>96</sub> . 24 H<sub>2</sub>O a velikost pórů 0,4 nm (údaje převzaty od dodavatele).
  - Silikagel KC-Trockenperlen H (dále jen Trockenperlen) je dodávaný firmou Ehgelhard Process GmbH. ve formě kuliček o průměru 2–5 mm. Je tvořen 97 hm.% SiO<sub>2</sub> a 3 hm.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  
Některé základní vlastnosti adsorbentů použitých k testování jsou uvedeny v tab. I. Parametry BET-povrchu a objemu adsorpčních pórů u všech testovaných adsorbentů byly stanoveny pomocí adsorpce dusíku při 77 K s použitím přístroje Coulter SA 3100+.
- Před testováním byly všechny adsorbenty upraveny drcením a síťováním na frakci o rozměrech 0,5–1,5 mm

Tabulka I  
Fyzikální vlastnosti použitých adsorbentů

Adsorpční materiál	Dodavatel	BET povrch [m <sup>2</sup> g]	Objem ads. pórů [ml g <sup>-1</sup> ]
Tamis moléculaires 5A	Axens	449	0,26
Molekulové síto 13X	Sigma-Aldrich	485	0,34
Klinoptilolith	Zeocem	24	0,07
KC-Trockenperlen H	Engelhard	772	0,52

a následným sušením ve vzduchové sušárně při teplotě 200 °C po dobu 10 h.

#### Desorpce CO<sub>2</sub> ze saturovaných adsorbentů

Adsorbenty nasycené CO<sub>2</sub> při experimentech měření průnikových křivek byly dále podrobeny testům desorpce CO<sub>2</sub> za použití různých desorpčních postupů s cílem zjištění účinnosti desorpce CO<sub>2</sub> u jednotlivých postupů. Byly použity následující postupy desorpce CO<sub>2</sub>:

- snížení tlaku v adsorbéru za laboratorní teploty,
- snížení tlaku a mikrovlnný ohřev adsorbentu,
- snížení tlaku a současný ohřev adsorbentu ve vzduchovém termostatu.

Experimenty desorpce CO<sub>2</sub> snížením tlaku v systému byly prováděny v aparatuře znázorněné na obr. 2. Měření probíhalo při laboratorní teplotě a podtlaku 0,09 MPa (absolutní tlak 0,01 MPa) následovně: skleněný adsorbér byl po zjištění adsorbovaného množství CO<sub>2</sub> a vytemperování na laboratorní teplotu umístěn na digitální váhy. Jeden konec adsorbéru byl uzavřen skleněnou zátkou se zábrusem, druhý konec byl připojen k vakuoměru a vakuové pumpě.

Poté byla spuštěna membránová vakuová pumpa a současně byl měřen čas experimentu. Ve zvoleném časovém intervalu 5 min byl odečítán úbytek hmotnosti adsorbéru s adsorbentem na digitálních vahách. Měření bylo ukončeno po 100 min nebo v některých případech i dříve, pokud už nebyl zaznamenán žádný další úbytek

hmotnosti po dobu 15 min.

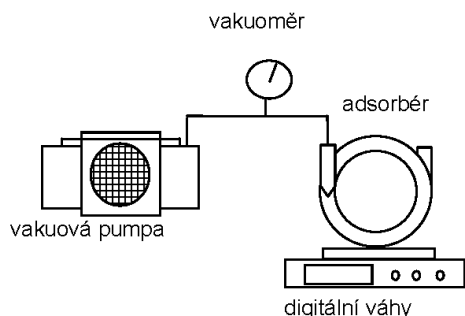
Experimenty desorpce CO<sub>2</sub> s použitím kombinace sníženého tlaku a mikrovlnného záření byly prováděny na laboratorní aparatuře znázorněné na obr. 3, při podtlaku 0,09 MPa (absolutní tlak 0,01 MPa).

Skleněný adsorbér byl po stanovení adsorbovaného množství CO<sub>2</sub> umístěn do mikrovlnného zařízení, jeden konec adsorbéru byl uzavřen skleněnou zátkou se zábrusem, druhý konec byl připojen k vakuoměru a vakuové pumpě.

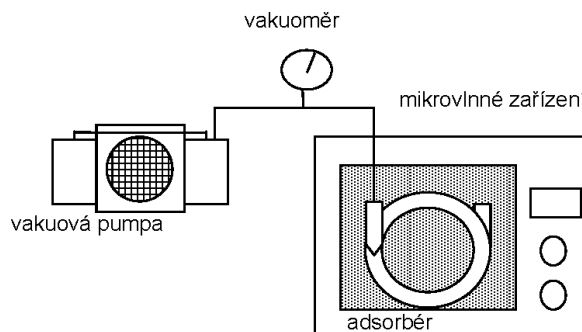
Výkon mikrovlnného zařízení byl nastaven na 440 W a zařízení bylo zapnuto na 30 sekund. Po uplynutí této doby byla zapnuta vakuová pumpa po dobu 1 min. Po jedné minutě činnosti vakuové pumpy byl adsorbér natlakován vzduchem na normální tlak, vyjmut z mikrovlnného zařízení a zvážen. Tento postup byl opakován třicetkrát. V některých případech bylo provedeno méně kroků měření, protože již nebyl ve třech po sobě jdoucích měřeních zaznamenán žádný další úbytek hmotnosti.

Pro experimenty desorpce zvýšením teploty adsorbentu za sníženého tlaku byla používána laboratorní aparatura, jejíž schéma je uvedeno na obr. 4.

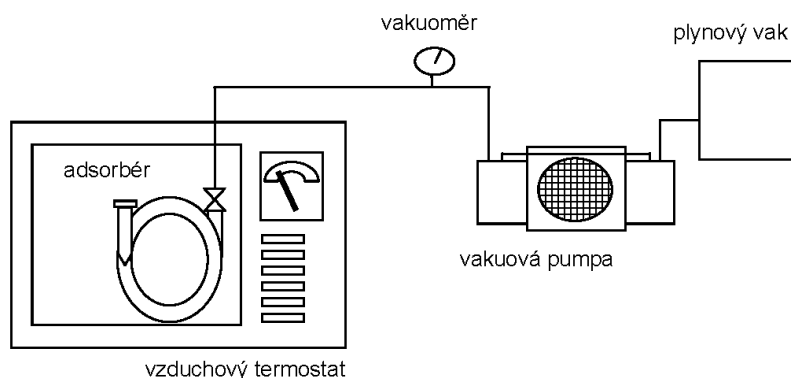
Adsorbér byl vložen do vzduchového termostatu vyhřátého na potřebnou teplotu a temperován po dobu 15 min. Na jeden konec adsorbéru byla připojena vakuová hadice pro evakuaci adsorbentu. Během temperování na teplotu 150 °C musel být otevřen ventil na adsorbéru, protože během zahřívání stoupal tlak adsorbentiv uvnitř



Obr. 2. Schéma aparatury pro měření desorpce CO<sub>2</sub> za sníženého tlaku



Obr. 3. Schéma aparatury pro měření desorpce kombinací mikrovlnného záření a sníženého tlaku



Obr. 4. Schéma aparatury pro měření desorpce za sníženého tlaku a zvýšené teploty

adsorbéru. Poté byla spuštěna vakuová pumpa a adsorbér byl evakuován po dobu 1 min; pak byl uzavřen kohout na konci adsorbéru, adsorbér byl vyjmut z aparatury a zvážen. Poté byl znovu zapojen do aparatury a znovu temperován na požadovanou teplotu a současně evakuován další minutu. Podtlak vakuové pumpy dosahoval 0,09 MPa (absolutní tlak během experimentu 0,01 MPa).

s intervalem snímání hodnot 5 s. Adsorpční kapacity adsorbentů pro  $\text{CO}_2$  byly počítány z průběhů průnikových křivek lichoběžníkovou integrační metodou podle rovnice (1):

$$m_{\text{CO}_2} = \sum_{j=0}^{j=\max} \left[ c_{\max} - \frac{c_1 + c_2}{2} \right] \cdot \frac{V_v \cdot M_{\text{CO}_2}}{m_{\text{adsorbent}} \cdot V_g \cdot 100} \cdot \Delta t \quad (1)$$

## Výsledky a diskuse

Automatické snímání koncentrací oxidu uhličitého v plynu vystupujícím z adsorbéru do počítačového programu umožnilo záznam průnikových křivek oxidu uhličitého při testování jednotlivých adsorbentů

kde  $m_{\text{CO}_2}$  je adsorpční kapacita adsorbentu pro  $\text{CO}_2$  za podmínek měření,  $c_{\max}$  maximální dosažená výstupní koncentrace  $\text{CO}_2$ ,  $c_1$  koncentrace  $\text{CO}_2$  na počátku výpočetního intervalu  $j$ ,  $c_2$  koncentrace  $\text{CO}_2$  na konci výpočetního intervalu  $j$ ,  $j$  sčítací index,  $V_v$  průtok plynné

Tabulka II

Adsorpční kapacity pro oxid uhličitý v g  $\text{CO}_2$  na 100 g adsorbentu z modelových směsí obsahujících vodní páru pro Tamis moleculaires a molekulové síto 13X

Obsah $\text{CO}_2$ [obj. %]	Tamis moleculaires 5A				Molekulové síto 13X			
	25 °C	80 °C	120 °C	160 °C	25 °C	80 °C	120 °C	160 °C
10	9,4	3,8	1,7	1,1	6,2	2,2	1,6	1,0
15	10,0	5,9	2,2	1,2	6,5	2,5	2,3	1,2
20	10,5	6,2	3,0	1,6	8,3	3,3	2,5	1,3

Tabulka III

Adsorpční kapacity pro oxid uhličitý v g  $\text{CO}_2$  na 100 g adsorbentu z modelových směsí obsahujících vodní páru pro přírodní zeolit Klinoptilolith a silikagel Trockenperlen

Obsah $\text{CO}_2$ [obj. %]	Přírodní zeolit Klinoptilolith				Silikagel Trockenperlen		
	25 °C	80 °C	120 °C	160 °C	25 °C	80 °C	120 °C
10	3,7	2,0	1,1	0,8	0,7	0,3	0,1
15	3,7	2,2	1,2	0,8	0,8	0,3	0,3
20	4,1	3,0	1,5	1,1	1,0	0,4	0,3

směsi adsorbérem,  $M_{CO_2}$  molární hmotnost  $CO_2$ ,  $m_{adsorbent}$  hmotnost adsorbentu na začátku pokusu,  $V_g$  molární objem ideálního plynu,  $\Delta t$  časový interval záznamu dat a  $t_{max}$  je doba trvání pokusu.

Adsorpční kapacity  $CO_2$  vypočtené integrací naměřených průnikových křivek na jednotlivých adsorbentech při různých teplotách měření jsou uvedeny v tab. II a III.

Z výsledků uvedených v tab. II a III je zřejmé, že pro adsorpci  $CO_2$  z plynných směsí se nejlépe hodí adsorbenty s menšími velikostmi pórů, optimálně 0,5 nm. Je však potřeba mít na zřeteli, že v případě adsorbentu Klinoptilolit se jedná o přírodní materiál, který má méně rozvinutou porézní strukturu, než synteticky připravené adsorbenty (viz tab. I). Při použití adsorbentů s většími rozměry pórů (molekulové síto 13 X) adsorpční kapacita pro  $CO_2$  klesá. Tyto získané výsledky jsou ve shodě s výsledky získanými jinými autory<sup>6</sup>. Adsorbenty na bázi silikagelu jsou pro adsorpci  $CO_2$  nevhodné.

$CO_2$  je na všech testovaných adsorbentech vázán fyzikální adsorpcí, což se projevuje poklesem adsorpčních kapacit při zvyšování teploty adsorpce. Tento pokles je tím větší, čím větší velikost pórů má testovaný adsorbent. Nejmenší změny adsorpčních kapacit pro  $CO_2$  s růstem teploty se projeví u adsorbentu s velikostí pórů 0,4 nm (Klinoptilolit) a největší u adsorbentu s velikostí pórů 0,9 až 1 nm.

Při proměňování účinnosti desorpce  $CO_2$  ze saturovaných adsorbentů za různých podmínek byla sledována změna hmotnosti adsorbentu s adsorbentem v jednotlivých dílčích krocích desorpce způsobená desorbovaným  $CO_2$ . Z adsorbovaného a desorbovaného množství oxidu uhličitého byla následně stanovena účinnost desorpce podle vztahu (2):

$$\eta_{des} = \frac{m_{des}}{m_{ads}} \cdot 100 \quad (2)$$

kde  $\eta_{des}$  je účinnost desorpce,  $m_{des}$  desorbované množství  $CO_2$  a  $m_{ads}$  je adsorbované množství  $CO_2$ .

Tabulka IV  
Porovnání účinnosti desorpce (%) pro adsorbent Tamis moleculaires za použití různých desorpčních technik

Metoda desorpce	Obsah $CO_2$ v plynu během adsorpce [obj. %]		
	10 %	15 %	20 %
Snížením tlaku	83	70	71
Snížením tlaku za teploty 80 °C	—	82	—
Snížením tlaku za teploty 150 °C	—	91	—
Snížení tlaku + mikrovlnné záření	90	87	78

Příklad získaných výsledků pro adsorbent Tamis moleculaires je uveden v tab. IV.

Ze získaných výsledků je patrné, že pouhé snížení tlaku v adsorbéru nezajistí účinnou desorpci (kolem 90 %) adsorbovaného  $CO_2$  z adsorbentu Tamis moleculaires. Pro dosažení uspokojivé účinnosti desorpce je zapotřebí adsorbent současně evakuovat a zahřát na teplotu 150 °C, případně použít ohřev adsorbentu pomocí mikrovlnného záření a následnou evakuaci. Tyto poslední dvě uvedené metody mají tu výhodu, že při ohřevu adsorbentu dochází také k současné desorpci zachycené vodní páry a adsorbent se tak při opakovaném použití bude pomaleji deaktivovat sorbovanou vodou.

## Závěr

Z testovaných adsorbentů vykazovalo nejvyšší sorpční kapacity pro  $CO_2$  molekulové síto 5 A Tamis moleculaires. Naproti tomu široceporézní silikagel KC-Trockenperlen se ukázal pro adsorpci  $CO_2$  jako nevhodný. Adsorpční kapacity pro  $CO_2$  u přírodního zeolitu jsou ve srovnání se synteticky vyráběnými molekulovými síty nižší, protože se jedná o přírodní materiál, který má ve srovnání se synteticky vyráběnými adsorbenty méně rozvinutou porézní strukturu (viz tab. I).

Adsorpční kapacity použitých adsorbentů pro oxid uhličitý jsou velmi závislé na teplotě. Při zvýšení teploty adsorpce z laboratorní teploty na teplotu 80 °C dochází u adsorbentu Tamis moleculaires k poklesu adsorpčních kapacit pro  $CO_2$  asi na polovinu, při zvýšení teploty na 120 °C k poklesu na jednu třetinu až jednu čtvrtinu. U přírodního zeolitu je pokles adsorpčních kapacit pro  $CO_2$  s nárůstem teploty nižší ve srovnání se synteticky vyráběnými molekulovými síty.

Výsledky desorpčních experimentů dokazují, že zvýšení teploty a použití mikrovlnného záření zvyšují účinnost desorpce adsorbentů oproti hodnotám získaným při desorpci pouhým snížením tlaku v adsorbéru. Při použití mikrovlnného záření k ohřevu adsorbentu je navíc doba desorpce zkrácena přibližně na polovinu.

Adsorpční kapacita pro oxid uhličitý se s počtem adsorpčně-desorpčních cyklů snižuje. Jev je možné vysvětlit adsorpcí vodní páry v pórech malých rozměrů a následnou neúplnou desorpcí vodní páry za podmínek prováděných experimentů. Skutečnou pracovní kapacitu adsorbentů pro  $CO_2$  představuje rozdíl adsorbovaného množství  $CO_2$  a desorbovaného množství.

Dosažené adsorpční kapacity na nejlepším z testovaných adsorbentů (Tamis moleculaires) se při teplotě 25 °C pohybují v rozmezí od 9,4 do 10,5 hm.%, při teplotě 80 °C pak v rozmezí od 3,8 do 6,2 hm.%. Pro průmyslové použití adsorbentů k odstraňování  $CO_2$  ze spalín fosilních paliv je jako cílová hodnota různými autory uváděná sorpční kapacita v rozmezí od 18 do 22 hm.% (cit.<sup>7</sup>). Takové adsorpční kapacity je možné dosáhnout pouze s použitím speciálních nanostrukturálních adsorbentů<sup>8</sup>, případně použitím chemicky preparovaných adsorbentů, kde se uplatňuje chemisorpce  $CO_2$  (cit.<sup>9,10</sup>).

Práce vznikla s podporou MŠMT při řešení výzkumného záměru č. MSM 6046137304 „Moderní způsoby úpravy, zpracování a využití paliv“. Autoři článku děkují MŠMT za poskytnutou finanční podporu.

## Seznam symbolů

$c_{\max}$	maximální dosažená výstupní koncentrace CO <sub>2</sub> [obj.%]
$c_1$	koncentrace CO <sub>2</sub> na počátku výpočetního intervalu $j$ [obj.%]
$c_2$	koncentrace CO <sub>2</sub> na konci výpočetního intervalu $j$ [obj.%]
$j$	sčítací index [–]
$V_v$	průtok plynné směsi adsorbérem [dm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$M_{\text{CO}_2}$	molární hmotnost CO <sub>2</sub> [g mol <sup>-1</sup> ]
$m_{\text{adsorbent}}$	hmotnost adsorbentu na začátku pokusu [g]
$m_{\text{ads}}$	adsorbované množství CO <sub>2</sub> [g]
$m_{\text{CO}_2}$	adsorpční kapacita adsorbentu pro CO <sub>2</sub> za podmínek měření [g g <sup>-1</sup> <sub>adsorbent</sub> ]
$m_{\text{des}}$	desorbované množství CO <sub>2</sub> [g]
$V_g$	molární objem ideálního plynu [dm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ]
$\Delta t$	časový interval záznamu dat [s]
$\eta_{\text{des}}$	účinnost desorpce [–]

## LITERATURA

1. Barnola J. M., Raynaud D., Neftel A., Oeschger H.: *Nature* 303, 410 (1983).
2. Friedli H., Löttscher H., Oeschger H., Siegenthaler U., Stauffer B.: *Nature* 324, 237 (1986).
3. Climate Change 2007: Synthesis Report. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 (2009). <http://www.pe-international.com>, staženo 30. 8. 2012.

4. International Energy Outlook 2010. U.S. Energy Information Administration, Washington, USA, 328 (2011). <http://www.eia.gov/forecasts/ieo>, staženo 30. 8. 2012.
5. Vávrová J., Ciahotný K., Pilař L.: *Ochrana ovzduší* 3, 17 (2012).
6. Mérel J., Clausse M., Meunier F.: *Ind. Eng. Chem. Res.* 47, 209 (2008).
7. Vávrová J., Ciahotný K.: *Sborník konference Approchem 2012*, 21, 2, 708 (2012).
8. Choi S., Drese J. H., Jones Ch. W.: *ChemSusChem* 2, 796 (2009).
9. Somy A., Mehrnia M. R., Amrei H. D., Ghanizadeh A., Safari M.: *Int. J. Greenhouse Gas Control* 3, 249 (2009).
10. Houshmand A., Daud W. M. A. W., Lee M. G., Shafeeyan M. S.: *Water, Air, Soil Pollut.* 223, 827 (2012).

**K. Ciahotný<sup>a</sup>, E. Černá<sup>b</sup>, and M. Macháčková<sup>c</sup>**  
<sup>a</sup>Department of Gas, Coke and Air Protection, Institute of Chemical Technology, Prague, <sup>b</sup>Contipro Co., Dolní Dobrouč, Czech Republic <sup>c</sup>Water and Wastewater Treatment Plant, Chrudim, Czech Republic): **Testing Adsorbents for Carbon Dioxide Separation from Gas Mixtures**

The CO<sub>2</sub> adsorption and desorption of three commercial synthetic zeolites, silica gel and a natural zeolite were measured using a laboratory apparatus and model gas mixtures. The saturated adsorbents were subsequently used for testing desorption efficiency by evacuation and conventional or microwave heating. The highest adsorption capacity is shown by the Tamis moléculaires adsorbent, followed by molecular sieve 13 X.