

STANOVENÍ SORPČNÍ KAPACITY SORBENTU TENAX TA PRO URČENÍ KONCENTRACÍ VYBRANÝCH ORGANICKÝCH LÁTEK V OVZDUŠÍ

ANTONÍN KROUPA, IVAN VÍDEN
a STANISLAV VODRÁŽKA

Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší, Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6

antonin.kroupa@seznam.cz

Došlo 17.3.04, přepracováno 1.11.04, přijato 25.11.04.

Klíčová slova: průnikový objem, bezpečný vzorkovací objem, Tenax TA, VOC

Úvod

Pro analýzu VOC (volatile organic compounds – těkavé organické látky) v ovzduší se nejčastěji používá metoda využívající adsorpci látek na sorpčních materiálech¹. Tato metoda běžně využívá několik hlavních druhů sorbentů. Vedle přírodních materiálů, jako jsou např. zeolity (také syntetické), existuje široká paleta uhlíkatých materiálů (např. kokosové uhlí, Carbotrap, Carbopack aj.) a polymerních sorbentů, z nichž nejznámější jsou sorbenty značek Porapak, Tenax a sorbenty Century Series (Chromosorb 101–108). Tenax TA je široce používaný sorbent na bázi polymeru 2,6-difenyl-*p*-fenylen oxidu. Jedná se o polymer se specifickým povrchem 35 m² g⁻¹, objemem pórů 2,4 cm³ g⁻¹, průměrnou velikostí pórů 200 nm a hustotou 0,25 g cm⁻³, jehož teplotní stabilita je uváděna až do 350 °C. Díky uvedeným vlastnostem, nízkému obsahu nečistot a dobré stabilitě matrice lze Tenax TA použít při analýze poměrně široké škály VOC.

Pro praktické použití sorbentu v analýze ovzduší pomocí sorpčních trubiček jsou důležité údaje o bezpečných vzorkovacích objemech. Bezpečný vzorkovací objem vyjadřuje objem kontaminovaného ovzduší (vztážený na hmotnost sorbentu), který je možné odebrat bez rizika průniku některé z látek s nejmenší retencí v analyzované směsi. V literatuře¹ je SSV (save sampling volume – bezpečný vzorkovací objem) uváděn například jako 2/3 průnikového objemu BTV (breakthrough volume), tedy objemu plynu, při jehož průchodu sorbetem již právě dojde k eluci analytu, a to za dané teploty (opět vztážno na hmotnost sorbentu). Z toho je patrné, že stanovení BTV hraje důležitou

rolí pro praktické využití – stanovení SSV, a je vedle dalších charakteristik, jako sorpční kapacita, počet teoretických pater a teplotní stabilita, důležitým parametrem sorpčního materiálu. Informací o BTV na Tenaxu TA je však v literatuře značně omezené množství^{3–5}. Publikovaná data zpravidla uvádějí údaje v omezeném teplotním rozsahu zpravidla nad 150 °C. Stanovení BTV za normálních teplot je totiž náročnější na aparaturu a její obsluhu. Je nezbytné použití malých množství sorbentů a specializovaných přístrojů k přesné regulaci nízkých teplot a vhodných průtoků. Poměrně velké množství informací o BTV organických látek obsahují internetové stránky společnosti Scientific Instrument Services, Inc⁶, které však neuvádějí BTV sirných sloučenin. Prezentovaná data byla získána metodou popsanou J. J. Manurou⁷. Ten však neobjasňuje podmínky popsanych měření, zejména pak nespecifikuje, které BTV jsou přímo experimentálně naměřeny a které jsou pouze extrapolovány z dat naměřených při teplotách vyšších.

V této práci, která byla provedena na Ústavu organické chemie Fakulty zemědělských a aplikovaných biologických věd, Univerzita Ghent, Belgie, na pracovišti výzkumné skupiny ENVOG (Environmental Organic Chemistry), bylo vybráno 15 organických látek (viz Experimentální část), u nichž byly stanoveny jejich průnikové objemy a adsorpční entalpie na Tenaxu TA v celkovém teplotním rozmezí od –10 °C do +170 °C.

Výpočetní vztahy

Pro výpočet průnikového objemu byl použit vztah^{8,9}:

$$\text{BTV} = \frac{F_A t'_R}{M} j \frac{T_M}{T_A} = \frac{F_A t'_R}{M} \frac{3}{2} \frac{\left(\frac{p_i}{p_o}\right)^2 - 1}{\left(\frac{p_i}{p_o}\right)^3 - 1} \frac{T}{T_A} \quad (1)$$

kde BTV je průnikový objem [ml g⁻¹] při teplotě sorbentu T [K], F_A je objemový průtok nosného plynu [ml min⁻¹] měřený za teploty T_A [K], t'_R je retenční čas dané látky [min], M je hmotnost sorbentu [g], j je tlakový korekční faktor vypočtený z p_i a p_o , což jsou vstupní a výstupní tlaky na trubičce se sorbentem [kPa].

Teplotní závislost BTV je obecně vyjádřena van Hoffovou rovnicí¹⁰:

$$\frac{d(\ln \text{BTV})}{dT} = \frac{\Delta H_T}{RT^2} \quad (2)$$

kde ΔH_T je adsorpční entalpie [J mol⁻¹] při teplotě T [K] a R je univerzální plynová konstanta.

Za předpokladu, že je adsorpční entalpie konstantní, dostaneme po úpravě a zjednodušení rovnice (2) vztah:

$$\ln \text{BTV} = \frac{A_1}{T} + C_1 \quad (3)$$

kde $A_1 = -\Delta H_T/R$ a C_1 je integrační konstanta. Rovnice (3) vyjadřuje lineární závislost logaritmu BTV na reciproké hodnotě absolutní teploty¹¹. Tuto rovnici lze využít pro výpočet BTV při dané teplotě odběru ze znalosti A_1 a C_1 zjištěných experimentálně.

Pro stanovení SSV [ml g^{-1}] za daných podmínek je pak použita jednoduchá rovnice¹:

$$\text{SSV} = \frac{2}{3} \text{BTV} \quad (4)$$

Experimentální část

Příprava vzorků

Použité látky

V této práci byly použity VOC, které byly rozděleny do dvou skupin podle očekávaných retenčních časů. První skupina zahrnovala *n*-pentan (čistota 99 %, Fluka Chemika, Buchs, Německo), *n*-hexan (98%, VEL, Leuven, Belgie), 1-hexen (97%) methylacetát (99%), aceton (99,9%), dimethylsulfid (99%), dimethyldisulfid (99%) (vše od Acros Organics, New Jersey, USA) a chloroform (99%, Janssen Chimica, Geel, Belgie). Ve druhé skupině pak byl ethylacetát (99,99%, Acros Organics, New Jersey, USA), *m*-xylen (99%, Fluka Chemika, Buchs, Německo), benzen (99%), 2-pentanon (99%), tetrachlorethen (99%) (vše od Janssen Chimica, Geel, Belgie), toluen (99,8%) a trichlorethen (99,5%) (Aldrich Chemical, Milwaukee, USA). Jako rozpouštědlo byl použit methanol (99,8%, J. T. Baker, Phillipsburg, USA). Uvedené látky byly použity bez následného čištění. Dále bylo použito helium (Helium 2 od Alphagaz, Liege, Belgie) jako nosný plyn a sorbent Tenax TA (zrnění 60–80 Mesh od Supelco, Bellefonte, USA) utěsněný v trubičce křemennou vatou (od Interscience, Louvain-la-Neuve, Belgie).

Příprava plyných vzorků

Pro dávkování byly připraveny dva směsné základní roztoky látek obou skupin v methanolu. Pro přípravu plyných vzorků o požadované koncentraci 4 až 6 g m^{-3} byl využit dvoufázový uzavřený systém založený na rovnovážném rozdělení látky mezi vodnou a plynou fází v uzavřené nádobě. Nejdříve byl do speciální odměrné baňky nadávkován známý objem destilované vody. Pod její hladinu bylo následně nastříknuto potřebné množství základního roztoku a baňka byla okamžitě uzavřena zátkou opatřenou septem. Koncentrace dané látky v plyné fázi byly vypočítána z Henryho zákona podle vztahu¹²:

$$C_g = \frac{m}{V_g + V_w / H^*} \quad (5)$$

kde C_g je koncentrace látky v plyné fázi [g m^{-3}], m je množství látky v systému [g], V_g je objem volné plyné fáze baňky [m^3], V_w je objem vodné fáze [m^3] a H^* je bezrozměrná Henryho konstanta za teploty teploty 25,0 ± 0,1 °C. Bezrozměrné Henryho konstanty byly převzaty z literatury¹³. Temperování vzorků probíhala přes noc.

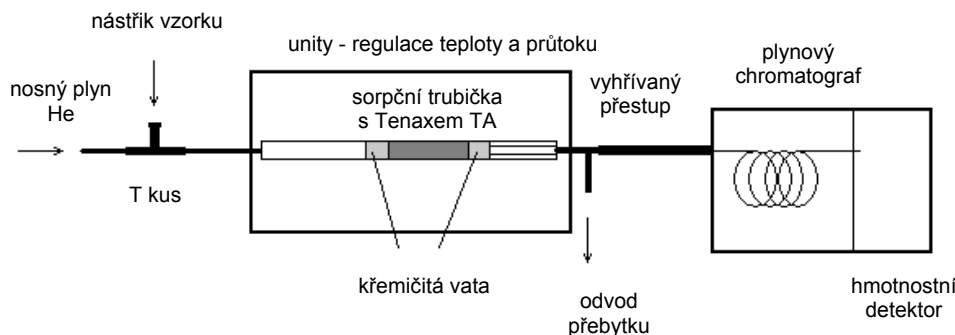
Zjištění tlakového korekčního faktoru

Korekční faktor j byl stanoven na aparatuře skládající se z tlakové lahve nosného plynu, průtokového regulátoru s tlakoměrem Chrompack BFU103 a termostatu plynového chromatografu HP 5890, kde byla umístěna sorpční trubička s Tenaxem TA.

Stanovení průnikových objemů

Aparatura

Aparatura pro stanovení průnikových objemů je schematicky znázorněna na obrázku 1. Do proudu nosného plynu (He) byl přes 1/8" T kus (Swagelok, Solon, USA) zakončený septem (Alltech Associates, Lokeren, Belgie) nastříknut 500 μl plynotěsnou stříkačkou Hamilton 1750 (Hamilton, Bonaduz, Švýcarsko) plyný vzorek směsi látek v rozmezí od 100 do 250 μl . Ten pak procházel



Obr. 1. Schéma experimentální aparatury pro měření BTV

sorpční trubičkou (Markes International, Pontyclum, Anglie, UK) o délce 120 mm, vnitřním průměru 2 mm a vnějším průměru 2,9 mm, umístěnou v Unity – jednotce regulace teplot a průtoků (Markes International, Pontyclum, Anglie, UK). Trubička obsahovala 29,4 resp. 3,0 mg Tenaxu TA. Za trubičkou následovalo dělení toku plynu a vstup vyhřívaným přestupem do plynového chromatografu GC Trace 2000 (ThermoFinnigan, Milan, Itálie),

kteřý obsahoval kapilární kolonu Chrompack CP-SIL 5 (60 m; 0,32 mm; 0,25 μm). Systém byl ukončen hmotnostním detektorem MS Trace DSQ WE – 250 (ThermoFinnigan, Austin, USA) a byl ovládán osobním počítačem Compaq PC-EVO-310 vybaveným softwarem Unity 1.2.0 (Markes International, Pontyclum, Anglie, UK) a Xcalibur 1.3 (ThermoFinnigan, Austin, USA).

Tabulka I

Stanovené hodnoty průnikových objemů BTV [ml g^{-1}] zkoumaných VOC na Tenaxu TA a jejich relativní standardní odchylky RSD (%) z pěti opakování.

Látka	BTV při t [$^{\circ}\text{C}$]												
	0	10	20	30	35	40	50	60	80	100	120	140	160
n-Pentan					1260	1000	812	600	226	92,8			
RSD, %					5,2	7,9	3,2	2,5	5,7	8,1			
n-Hexan				7160		4970	3380	2270	779	305			
RSD, %				8,1		5,9	2,2	3,9	1,9	4,15			
1-Hexen				10900	8060	6330	3860	2300	817	298	118		
RSD, %				2,4	4,3	4,4	5,1	2,4	1,8	5,1	7,7		
Benzen						12800	6790	3810	1390	662	285	124	
RSD, %						2,7	1,5	1,6	2,1	2,0	5,9	9,3	
Toluen				84200			30900	15800	4840	1950	758	314	
RSD, %				6,7			3,9	1,5	1,1	0,7	2,0	5,1	
<i>m</i> -Xylen ^a										6150	2000	773	321
RSD, %										0,8	0,9	2,0	3,1
Aceton ^b				2880	2140	1560	970	695	283				
RSD, %				2,6	1,4	1,6	2,8	1,8	2,7				
2-Pentanon				125000		35600	17300	8750	2670	1090	431		
RSD, %				3,8		2,6	2,8	0,9	0,6	1,0	3,7		
Dimethylsulfid	25700	13800	8130	2750	2030	1520	931	627	245	93,7			
RSD, %	5,6	3,8	2,3	1,4	2,0	1,1	2,5	1,4	4,0	6,8			
Dimethyldisulfid			2,67.10 ⁵				21400	11800	3380	1140	447	171	72,5
RSD, %			2,3				0,9	1,0	0,4	1,1	1,5	7,4	4,0
Chloroform	63100	39500	26800	10800	7890	5770	3440	2160	786	331	132		
RSD, %	5,9	3,9	3,7	1,9	1,4	2,0	1,7	0,6	1,0	1,4	5,3		
Trichlor-ethen				29800		16500	8460	4500	1540	701	285		
RSD, %				2,5		1,8	1,7	1,6	1,6	2,0	3,7		
Tetra-chlorethen				85800			30600	15400	4830	2010	765	321	
RSD, %				5,5			4,2	1,8	1,5	0,8	2,4	2,6	
Methyl-acetát	76100	39200	24100	5450	3930	2920	1790	1130	421	166			
RSD, %	4,9	3,7	4,3	1,6	1,3	1,5	1,9	1,2	2,0	4,4			
Ethyl-acetát			69200	37100		12600	5890	3100	1010	476	174		
RSD, %			8,2	4,4		1,8	4,0	2,4	2,2	2,1	8,8		

^a *m*-Xylen - při $t = 170^{\circ}\text{C}$ BTV = 180 ml g^{-1} , RSD = 7,3 %, ^b aceton - při $t = -10^{\circ}\text{C}$ BTV = 1,75.10⁵ ml g^{-1} , RSD = 4,0 %

Podmínky měření

Retenční čas organické látky se skládal ze tří složek, vyjádřených vztahem:

$$t_{\text{VOC}} = t'_{\text{R}} + t'_{\text{GC}} + t_{\text{N}_2} \quad (6)$$

kde t_{VOC} je celkový retenční čas látky [min], t'_{R} je čistý retenční čas látky na sorbentu, t'_{GC} je čistý retenční čas na koloně plynového chromatografu a t_{N_2} je mrtvý retenční čas odpovídající retenčnímu času dusíku, který se do systému dostal spolu s plynným vzorkem z CTS. Během všech měření byla teplota kolony 200 °C.

Nejprve byl stanoven t'_{GC} všech složek tak, že teplota sorpční trubičky byla 280 °C, kdy byla předpokládána nulová zadrž VOC na sorbentu. Během dalších experimentů byly měřeny rozdíly retenčních časů Δt ($\Delta t = t_{\text{VOC}} - t_{\text{N}_2}$) v celkovém teplotním intervalu sorbentu od -10 °C do 170 °C. V případě příliš dlouhé doby zdržení látek za dané teploty na větším množství (29,4 mg) sorbentu bylo použito množství menší (3,0 g). Byly tak stanoveny t'_{R} uvedených patnácti organických látek podle vzorce:

$$t'_{\text{R}} = \Delta t - t'_{\text{GC}} \quad (7)$$

Průtok nosného plynu sorbentem byl v rozmezí od 15 do 55 ml min⁻¹ s dělicím poměrem 1:27 až 1:96, který umožnil udržovat konstantní průtok do hmotnostního spektrometru na 0,58 ml min⁻¹. Všechna měření byla pětikrát opakována.

Zpracování výsledků

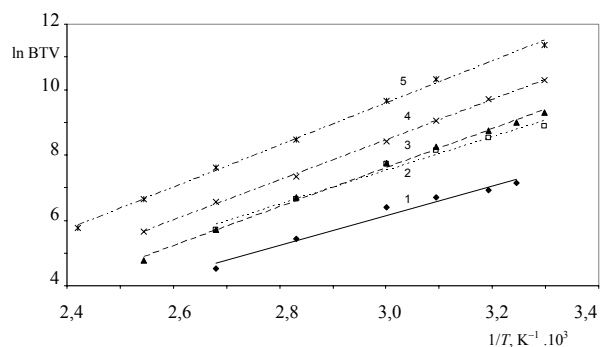
Pro statistické zpracování naměřených dat byl využit program SPSS (SPSS Inc., Chicago, USA), a to části vyhodnocující lineární regresi použitého modelu a dále programy řady MS Office XP, předně Microsoft Excel.

Výsledky a diskuse

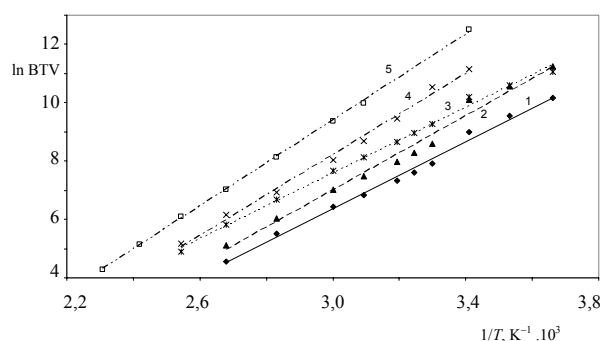
Hodnoty BTV vypočtené podle rovnice (1) z naměřených čistých retenčních časů a tlakových korekčních faktorů jsou uvedeny v tabulce I.

Výsledky ukazují na silnou teplotní závislost průnikových objemů zkoumaných VOC na Tenaxu TA. Např. BTV chloroformu klesá v rozmezí teplot od 0 °C do 100 °C 190×, u methylacetátu potom činí tento pokles během stejného teplotního intervalu násobek 482. I v malém teplotním rozmezí běžných odběrových teplot (0 až 30 °C) může být změna BTV řádová, a to např. u dimethylsulfidu (9,3×) a methylacetátu (14×).

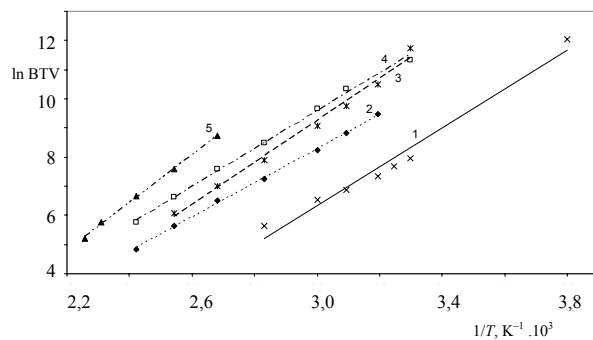
V dostupné literatuře nebyly nalezeny informace o experimentálně zjištěných BTV za běžných odběrových teplot. Srovnání našich výsledků s BTV uveřejněnými společností SIS, Inc.⁶ ukazuje například pro chloroform při teplotách 0, 20, 40 a 60 °C rozdíly pohybující se v intervalu 0,57 až 1,6 násobku našich experimentálních výsledků. To může být způsobeno rozdílným postupem při výpočtu (nebyl použit tlakový korekční faktor) a tím, že



Obr. 2. Graf závislosti přirozeného logaritmu BTV na recipročné hodnotě absolutní teploty pro n-pentan (1), n-hexan (2), 1-hexen (3), trichlorethen (4) a tetrachlorethen (5).



Obr. 3. Graf závislosti přirozeného logaritmu BTV na recipročné hodnotě absolutní teploty pro dimethylsulfid (1), methylacetát (2), chloroform (3), ethylacetát (4) a dimethyldisulfid (5).



Obr. 4. Graf závislosti přirozeného logaritmu BTV na recipročné hodnotě absolutní teploty pro aceton (1), benzen (2), 2-pentanon (3), toluen (4) a m-xylen (5).

data SIS, Inc. jsou pro tyto odběrové teploty extrapolována z vyšších teplot.

Dalším krokem při zpracování dat byla aplikace rovnice (3) na výsledky BTV z našeho měření. Ze statistických výsledků, prezentovaných v tabulce II, je patrné, že rovnice (3) uspokojivě vysvětluje teplotní závislost BTV s hodnotami spolehlivosti R^2 od 0,9737 (aceton, počet

Tabulka II

Výsledky aplikace rovnice (3) na experimentální data BTV. A_1 a C_1 jsou konstanty rovnice (3), ΔH_T je adsorpční entalpie [kJ mol^{-1}] látek na Tenaxu TA, R^2 je hodnota spolehlivosti pro n naměřených bodů, BTV 20 °C je předpokládaný průnikový objem látky při 20 °C [ml g^{-1}] a SSV 20 °C je bezpečný vzorkovací objem vzduchu pro danou látku při 20 °C [ml g^{-1}] vypočítaný z rovnice (4)

Látka	A_1	C_1	$-\Delta H_T$	R^2	n	BTV 20 °C	SSV 20 °C
Pentan	4567 ± 368	-7,55 ± 1,11	38,0 ± 3,1	0,9746	6	3,07E+03	2,05E+03
Hexan	5168 ± 321	-7,99 ± 0,97	43,0 ± 2,7	0,9848	6	1,54E+04	1,02E+04
Hex-1-en	5955 ± 136	-10,25 ± 0,41	49,5 ± 1,1	0,9969	8	2,35E+04	1,57E+04
Benzen	5869 ± 92	-9,32 ± 0,26	48,8 ± 0,8	0,9988	7	4,44E+04	2,96E+04
Toluen	6455 ± 150	-9,78 ± 0,43	53,7 ± 1,2	0,9973	7	2,07E+05	1,38E+05
<i>m</i> -Xylen	8180 ± 201	-13,19 ± 0,49	68,0 ± 1,7	0,9982	5	2,46E+06	1,64E+06
Aceton	6650 ± 489	-13,62 ± 1,58	55,3 ± 4,1	0,9737	7	8,64E+03	5,76E+03
Pentan-2-on	7212 ± 319	-12,41 ± 0,94	60,0 ± 2,7	0,9903	7	1,97E+05	1,31E+05
Dimethylsulfid	5769 ± 165	-10,95 ± 0,53	48,0 ± 1,4	0,9935	10	6,18E+03	4,12E+03
Dimethyldisulfid	7349 ± 69	-12,66 ± 0,20	61,1 ± 0,6	0,9995	8	2,45E+05	1,63E+05
Chloroform	5631 ± 127	-9,30 ± 0,40	46,8 ± 1,1	0,9954	11	2,01E+04	1,34E+04
Trichlorethen	6166 ± 90	-10,04 ± 0,27	51,3 ± 0,7	0,9989	7	5,95E+04	3,97E+04
Tetrachlorethen	6430 ± 138	-9,71 ± 0,39	53,5 ± 1,1	0,9977	7	2,04E+05	1,36E+05
Methylacetát	6399 ± 285	-12,20 ± 0,91	53,2 ± 2,4	0,9844	10	1,52E+04	1,01E+04
Ethylacetát	6908 ± 230	-12,51 ± 0,70	57,4 ± 1,9	0,9934	8	6,32E+04	4,22E+04

naměřených bodů $n = 7$) do 0,9995 (dimethylsulfid, $n = 5$). Grafické znázornění naměřených hodnot a lineárního modelu rovnice (3) je zobrazeno na obr. 2 až 4.

Ze směrnice regresní přímky byly vypočítány adsorpční entalpie uvedených látek na Tenaxu TA. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce II a pohybují se v rozmezí od $-38,0 \pm 3,1 \text{ kJ mol}^{-1}$ (*n*-pentan) do $-68,0 \pm 1,7 \text{ kJ mol}^{-1}$ (*m*-xylen). S rostoucí absolutní hodnotou adsorpční entalpie roste interakce mezi adsorbentem a adsorbátem, a to v řadě *n*-pentan, *n*-hexan, chloroform, dimethylsulfid, benzen, 1-hexen, trichlorethen, methylacetát, tetrachlorethen, toluen, aceton, ethylacetát, 2-pentanon, dimethyldisulfid a *m*-xylen. Z hodnot adsorpčních entalpií lze odhadnout, že tato interakce byla pouze fyzikálního charakteru a nedocházelo k tvorbě kovalentních vazeb¹⁴. Zjištěné hodnoty adsorpční entalpie je možné porovnat s literaturou^{10,15-17}, kde jsou však použity jiné sorbenty než Tenax TA. Např. Bilgiç a Aşkin ve své práci¹⁵ zjistili adsorpční entalpie pro *n*-hexan na alumině ($-41,0 \text{ kJ mol}^{-1}$) a molekulových sítích 5A ($-27,5 \text{ kJ mol}^{-1}$) a 3A ($-34,7 \text{ kJ mol}^{-1}$) při experimentech provedených za teplot nad 200 °C. Grajek a spol.¹⁶ uvedli adsorpční entalpie několika látek na třech typech aktivního uhlí (WS-4, NP-5 a R) a výsledky pro *n*-hexan činily $-75,9$; $-100,2$ a $-88,3 \text{ kJ mol}^{-1}$, v teplotním rozmezí od 250 do 320 °C.

Výsledky měření průnikových charakteristik patnácti

organických látek na Tenaxu TA v celkovém teplotním rozsahu od -10 °C do 170 °C ukazují na vysokou teplotní závislost průnikových objemů a tedy i bezpečných vzorkovacích objemů. Důsledkem toho pak musí být uváženo vzorkování kontaminovaného ovzduší tak, aby během tohoto, z hlediska analýzy organických látek nejdůležitějšího procesu, nedocházelo k úniku analytů a k znehodnocení výsledků celého měření. Praktickým příkladem jsou pak v tabulce II průnikové objemy a bezpečné vzorkovací objemy látek při běžné odběrové teplotě 20 °C, vypočtené z rovnic (3) a (4). Z výsledků vyplývá, že zkoumaný analyt s nejnižší retencí vůči Tenaxu – *n*-pentan – lze vzorkovat na trubičce s obsahem 1 gram Tenaxu TA pročerpáním maximálního doporučeného objemu vzorku zkoumané atmosféry (SSV) v množství 2,05 litrů.

Autoři děkují profesoru Jo Dewulfovi, profesoru Hermanu Van Langenhovi a Patricku De Wispelaere (Ústav organické chemie, Univerzita Gent, Belgie) za jejich významnou pomoc při provádění laboratorních experimentů a dále profesoru Miklósi Görgényimu (Ústav fyzikální chemie, Univerzita Szeged, Maďarsko) za odborné rady.

Seznam používaných zkratk

BTV	Breakthrough volume – průnikový objem
CTS	Close two phase system – uzavřený dvoufázový systém
SSV	Save sampling volume – bezpečný vzorkovací objem
VOC	Volatile organic compounds – těkavé organické látky

LITERATURA

1. U.S. Environmental Protection Agency: Compendium Method TO-17, Determination of Volatile Organic Compounds in Ambient Air Using Active Sampling Onto Sorbent Tubes, Cincinnati USA, 1999.
2. Alltech, Catalog 550, <http://www.alltechweb.com/US/Catalog.asp>, 141, (2003), staženo 25. března 2003.
3. Maier I., Fieber M.: *J. High Resolut. Chromatogr. Chromatogr. Commun.* **11**, 566 (1988).
4. Simon V., Riba M. L., Waldahrt A., Torres L.: *J. Chromatogr., A* **704**, 465 (1995).
5. Baya M. P., Siskos P. A.: *Analyst* **121**, 303 (1996).
6. Scientific Instrument Services, Inc.: Tenax™ TA Adsorbent Resin Physical Properties, SIS, Inc., <http://www.sisweb.com/index/referenc/tenaxta.htm>, staženo 25. března 2003.
7. Manura J. J.: Calculation and Use of Breakthrough Volume Data, SIS, Inc., <http://www.sisweb.com/index/referenc/resin10.htm>, staženo 25. března 2003.
8. Rotzsche H.: *Stationary Phases in Gas Chromatography*. Elsevier Science, Amsterdam, 1991.
9. Halász I., Heine E.: *Anal. Chem.* **39**, 1313 (1967).
10. Stanetzek I., Giese U., Schuster R. H., Wunsch G.: *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **57**, 128 (1996).
11. Brown R. H., Purnell C. J.: *J. Chromatogr.* **179**, 79 (1979).
12. Dewulf J., Ponnet D., Van Langenhove H.: *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* **62**, 289 (1996).
13. Sander R.: Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry (Version 3), <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html>, (1999), staženo 25. března 2003.
14. Popl M., Fährnich J.: *Analytická chemie životního prostředí*. Vydavatelství VŠCHT, Praha 1999.
15. Bilgiç C., Aşkin A.: *J. Chromatogr., A* **1006**, 281 (2003).
16. Grajek H., Witkiewicz Z., Jankowska H.: *J. Chromatogr., A* **787**, 87 (1997).
17. Chiang H. L., Huang C. P., Chiang P. C.: *Chemosphere* **46**, 143 (2002).

A. Kroupa, I. Viden, and S. Vodrážka (*Department of Gas, Coke and Air Protection, Institute of Chemical Technology, Prague*): **Breakthrough Characteristics of Selected Organic Compounds on Tenax TA**

Tenax TA is a widely used sorbent in analysis of trace levels of organic compounds in ambient air due to its excellent properties – strongly hydrophobic, heat-stable and having low analytical background. The use of Tenax TA for field sampling requires the knowledge of safe sampling volumes (SSV). The breakthrough volumes (BTV) and adsorption enthalpies of 15 organic compounds (*n*-pentane, *n*-hexane, hex-1-ene, benzene, toluene, *m*-xylene, acetone, pentan-2-one, dimethyl sulfide, dimethyl disulfide, chloroform, trichloroethene, tetrachloroethene, methyl acetate and ethyl acetate) on Tenax TA were determined and their SSV were calculated.