

Jerzy Choma, Mieczysław Jaroniec

Nowe metody opisu struktury porowatej węgla aktywnych na podstawie danych adsorpcyjnych

Węgle aktywne są ciągle bardzo ważnymi adsorbentami stosowanymi do rozdzielania mieszanin, a przede wszystkim do oczyszczania cieczy i gazów [1]. Ta niezwykła użyteczność węgla aktywnych wynika z ich dużej powierzchni właściwej i rozwiniętej struktury porowatej, mającej przeważnie mikroporowaty charakter, zapewniającej bardzo dobre właściwości adsorpcyjne w stosunku do wielu różnych substancji.

Znaczna liczba prac jest poświęcona wykorzystaniu adsorpcji gazów do wyznaczania powierzchni właściwej, wymiaru mikroporów i funkcji rozkładu objętości mikroporów węgla aktywnych, a także innych adsorbentów węglowych [2]. Obliczenia funkcji rozkładu objętości mikroporów i średniego wymiaru mikroporów na podstawie danych adsorpcyjnych pojedynczego gazu były dotychczas związane z teorią objętościowego zapełniania mikroporów Dubinina i współpracowników [3], w której zakłada się jednoetapowy proces zapełniania mikroporów. Jednakże najnowsze wyniki doświadczalne [4], a także rozważania teoretyczne związane z teorią funkcjonalu gęstości (*density functional theory* – DFT) i symulacjami komputerowymi wskazują, że w wielu wypadkach (np. adsorpcji azotu w temperaturze $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) adsorpcja w mikroporach może przebiegać w procesie jedno- lub dwustopniowym, w zależności od wymiarów mikroporów. Mianowicie mikropory, w których mogą zmieścić się nie więcej niż dwie warstwy zaadsorbowanych cząsteczek, zapełniają się jednostopniowo, podczas gdy adsorpcja w szerszych mikroporach przebiega dwustopniowo: w pierwszym etapie tworzy się warstewka adsorpcyjna na ściankach mikroporów w obszarze bardzo małych ciśnień, natomiast kolejno w drugim etapie – wewnątrz mikroporów zapełnia się przy wyższych ciśnieniach. Taki dwustopniowy proces adsorpcji w mikroporach nie jest właściwie opisywany w teorii objętościowego zapełniania Dubinina.

W ostatnich dwóch dekadach ważną rolę w opisie struktury porowatej adsorbentów odgrywają porównawcze metody adsorpcyjne (np. α_s i t) [5], które pozwalają na określenie całkowitej powierzchni właściwej adsorbentu, objętości mikroporów oraz powierzchni właściwej mikro- i mezoporów. Ważną rolę w metodach porównawczych odgrywa dobór standardowego adsorbentu odniesienia, którego niejednorodność powierzchniowa powinna być jak najbardziej zbliżona do niejednorodności powierzchniowej badanego, porowatego adsorbentu.

Całkowitą powierzchnię właściwą mikroporowatych adsorbentów zazwyczaj wyznacza się za pomocą metody Brunauer-Emmett-Tellera (BET). Warto jednak wiedzieć, że adsorpcja w mikroporach, ze względu na nakładanie się pól sił adsorpcyjnych sąsiednich ścianek, jest znacznie większa od adsorpcji na płaskiej powierzchni adsorbentu i dlatego nie należy oczekiwać, że w ten sposób uzyskana wartość powierzchni właściwej BET będzie dokładna dla adsorbentów mikroporowatych. Szczegółowe wyniki badań tego zagadnienia zostały zaprezentowane w pracy [6].

Przedstawione rozważania wskazują na potrzebę opracowania nowej – prostej – metody wyznaczania całkowitej powierzchni właściwej i średniego wymiaru mikroporów. Wcześniejsze eksperymentalne i modelowe badania adsorpcji azotu w temperaturze $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ na porowatych węglach aktywnych [7] zwróciły uwagę autorów na możliwość uzyskania informacji o strukturze adsorbentu na podstawie funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego. Jak wskazywano w pracach [8,9], minimum na krzywej rozkładu potencjału adsorpcyjnego, położone pomiędzy pikem tworzenia monowarstwy oraz obszarem tworzenia wielowarstwy, odpowiada kompletnej monowarstwie dla sadz.

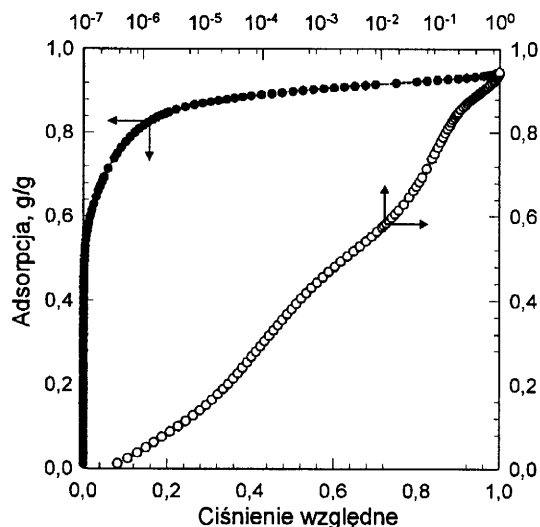
Głównym celem niniejszej pracy było omówienie najbardziej użytecznych metod wyznaczania całkowitej powierzchni właściwej adsorbentów mikroporowatych, objętości mikroporów oraz średniego wymiaru tych mikroporów na podstawie funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego, którą z kolei wyznacza się z doświadczalnej izotermy adsorpcji.

Część doświadczalna

Powyższe metody analizowano na podstawie doświadczalnej izotermy adsorpcji azotu, wyznaczonej w temperaturze $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ za pomocą objętościowego analizatora adsorpcyjnego ASAP 2010 firmy Micromeritics (Norcross, GA, USA) na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD, wyprodukowanym w firmie *The Kansai Coke & Chemicals Co. Japan*, według patentu *Amoco Corporation* [10]. Jest to węgiel aktywny o bardzo dużej całkowitej powierzchni właściwej (ponad $2000\text{ m}^2/\text{g}$), o zawartości popiołu około 2% i o $\text{pH}\approx 5,0$. Otrzymywany jest on z mieszaniny różnych materiałów węglowych z dodatkiem wodorotlenku potasu, w dwustopniowym procesie aktywacji w atmosferze obojętnej.

Pierwszy etap wygrzewania prowadzi się w temperaturze około $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Etap ten ma na celu głównie odwodnienie stosowanych surowców. Drugi etap wygrzewania w temperaturze $500+900\text{ }^{\circ}\text{C}$ pozwala otrzymać węgiel aktywny o całkowitej powierzchni właściwej $1000+3000\text{ m}^2/\text{g}$.

Otrzymany produkt jest wielokrotnie przemywany, na przemian wodą i roztworem kwasu, w celu usunięcia nadmiaru KOH i powstałych soli. Ostatecznie, po procesie prasowania, otrzymuje się węgiel aktywny w postaci tabletek [11]. Przed pomiarami adsorpcyjnymi węgiel ten był odgazowywany pod zmniejszonym ciśnieniem w ciągu 2 godzin w temperaturze 200 °C. Doświadczalną izotermę adsorpcji azotu w temperaturze -196 °C dla węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD, w obszarze niskich i wysokich ciśnień, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Doświadczalna izoterma adsorpcji azotu na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD w temperaturze -196 °C dla niskich i wysokich ciśnień względnych

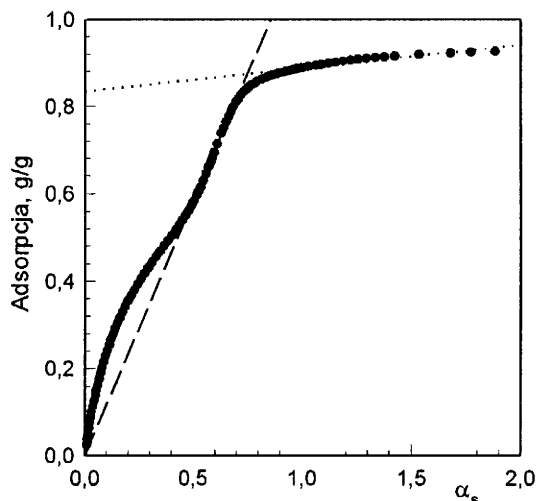
Dyskusja wyników

Dla węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD powierzchnię właściwą (S_{BET}) wyznaczono metodą Brunauera-Emmetta-Tellera (BET), wykorzystując doświadczalne dane adsorpcji azotu w temperaturze -196 °C w przedziale ciśnień względnych od 0,01 do 0,2. Uzyskano następujące parametry równania BET: $a_m=0,704$ g/g i $C=367$. Wartość pojemności monomolekularnej (a_m) pozwoliła wyznaczyć powierzchnię właściwą (S_{BET}) tego węgla aktywnego, która wynosiła 2450 m²/g.

Do charakterystyki struktury porowatej węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD wykorzystano zaproponowaną przez Singa [5] porównawczą metodę α_s . W metodzie tej doświadczalną izotermę adsorpcji, zmierzona dla badanego adsorbentu porowatego, porównuje się z izotermą adsorpcji zmierzona dla standardowego, nieporowatego adsorbentu odniesienia. W metodzie α_s wartości adsorpcji na standardowym, nieporowatym adsorbencie są wyrażone w postaci zredukowanej standardowej adsorpcji α_s , która jest stosunkiem wartości adsorpcji a_s dla danego ciśnienia względnego p/p_0 do wartości adsorpcji $a_{0,4}$, odpowiadającej ciśnieniu względnemu $p/p_0=0,4$:

$$\alpha_s = \frac{a_s}{a_{0,4}} \quad (1)$$

Powszechnie przyjmuje się, że dla ciśnienia względnego $p/p_0=0,4$ następuje całkowite wypełnienie mikroporów cząsteczkami azotu. Na rysunku 2 przedstawiono wykres α_s dla węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD. Danymi standardowymi, wykorzystanymi do sporządzenia tego wykresu była doświadczalna izoterma adsorpcji azotu w temperaturze -196 °C na niegrafityzowanej sadzy Cabot BP280 [12].



Rys. 2. Wykres α_s dla adsorpcji azotu na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD

Na podstawie współczynnika kierunkowego prostej (rys.2), dla małych wartości α_s od 0,45 do 0,72, które odpowiadają ciśnieniu względnemu p/p_0 od $5,5 \cdot 10^{-3}$ do 0,15 dla izotermi adsorpcji, wyznaczono całkowitą powierzchnię właściwą węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD wynoszącą $S_{t,\alpha_s}=2550$ m²/g. Natomiast na podstawie drugiej prostej (rys.2), dla wartości α_s od 0,81 do 2,03, które odpowiadają ciśnieniu względnemu p/p_0 zmieniającemu się od 0,24 do 0,88 dla izotermi adsorpcji przedstawionej na rysunku 1, wyznaczono objętość mikroporów wynoszącą $V_{mi,\alpha_s}=1,03$ cm³/g oraz powierzchnię właściwą mezoporów wynoszącą $S_{me,\alpha_s}=118$ m²/g. Szczegółowe informacje dotyczące obliczeń parametrów struktury porowatej węgla aktywnych za pomocą metody α_s można znaleźć w pracach [13,14].

Doświadczalna izoterma adsorpcji azotu na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD (rys.1) była również podstawą do wyznaczenia funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego $X(A)$ dla tego układu. Funkcję tę uzyskuje się w wyniku zróżniczkowania charakterystycznej krzywej adsorpcji $v(A)$ danego adsorbentu na danym adsorbencie. Krzywa charakterystyczna jest ilością ciekłego adsorbentu w cm³ na gram adsorbentu w funkcji potencjału adsorpcyjnego A . Ten ostatni jest definiowany jako zmiana swobodnej energii Gibbsa wzięta ze znakiem minus:

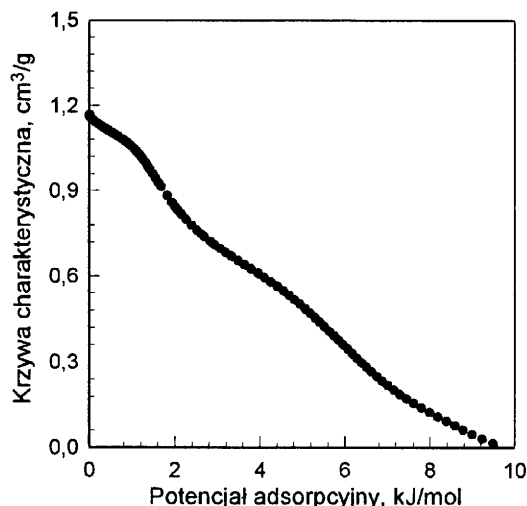
$$A = -\Delta G = R T \ln(p/p_0) \quad (2)$$

gdzie R jest uniwersalną stałą gazową, T jest temperaturą bezwzględną, p_0 jest ciśnieniem pary nasyconej adsorbentu, zaś p jest równowagowym ciśnieniem adsorbentu w tej temperaturze.

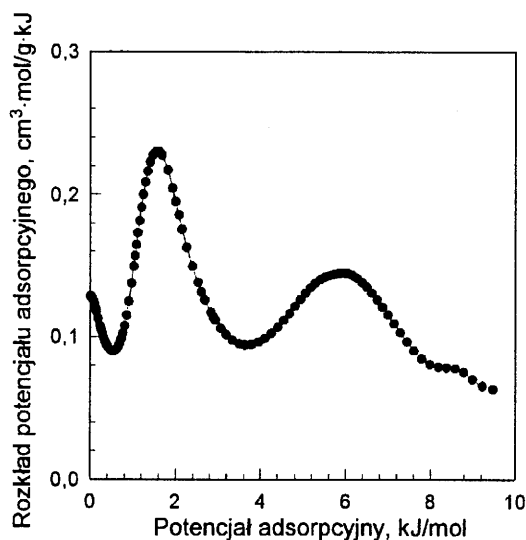
Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyczną krzywą adsorpcji azotu w temperaturze -196 °C na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD. Różniczkując numerycznie tę krzywą względem A otrzymano następującą funkcję rozkładu potencjału adsorpcyjnego $X(A)$:

$$X(A) = -\frac{dv(A)}{dA} \quad (3)$$

Funkcję rozkładu potencjału adsorpcyjnego azotu na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD przedstawiono na rysunku 4. Wskazuje ona na dwustopniowy przebieg procesu adsorpcji. Pik występujący dla dużych wartości potencjału adsorpcyjnego, pomiędzy 4 i 8 kJ/mol (czyli małych wartości ciśnień względnych p/p_0), wskazuje na tworzenie się monowarstwy na ściankach mikroporów węgla aktywnego.



Rys. 3. Krzywa charakterystyczna adsorpcji azotu w temperaturze $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD



Rys. 4. Funkcja rozkładu potencjału adsorpcyjnego azotu w temperaturze $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD

Natomiast drugi pik, występujący dla stosunkowo małych wartości potencjału adsorpcyjnego pomiędzy 1 i 3 kJ/mol (czyli dużych wartości ciśnień względnych p/p_0) jest dowodem na objętościowe zapełnianie mikroporów węgla aktywnego. Maksimum pików dla adsorpcji monomolekularnej ma wartość $A_{\text{max}}^{\text{M}}=5,9$ kJ/mol, natomiast dla objętościowego zapełniania mikroporów $A_{\text{max}}^{\text{OZM}}=1,5$ kJ/mol. Funkcja rozkładu potencjału adsorpcyjnego dla badanego węgla aktywnego ma wyraźnie zaznaczone minimum pomiędzy dwoma pikami: jednym – opisującym adsorpcję monomolekularną i drugim – dotyczącym objętościowego zapełniania mikroporów. To minimum można traktować jako punkt odpowiadający utworzeniu kompletnej monowarstwy i w związku z tym można określić wartość adsorpcji, która odpowiada temu minimum potencjału adsorpcyjnego. Tak więc wartość potencjału dla minimum pozwala, poprzez zależność (2), określić ciśnienie względne odpowiadające temu minimum i dalej z izotermi adsorpcji wyznaczyć pojemność monowarstwy badanego węgla aktywnego. Dla adsorpcji azotu na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD minimum na krzywej potencjału wynosi $A_{\text{min}}=3,7$ kJ/mol, co odpowiada wartości ciśnienia względnego $p/p_0=3,10\cdot 10^{-3}$. Tej wartości ciśnienia względnego odpowiada z izotermi wartość adsorpcji $a_{\text{min}}=0,512$ g/g, będąca pojemnością monomolekularną.

Na podstawie tej pojemności obliczono całkowitą powierzchnię właściwą adsorbentu $S_{\text{t},X(A)}$, wynikającą z funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego, korzystając z zależności:

$$S_{\text{t},X(A)} = a_{\text{min}} \omega N_A \quad (4)$$

i otrzymano $S_{\text{t},X(A)}=1780$ m²/g. W równaniu (4) ω jest powierzchnią zajmowaną przez cząsteczkę azotu w warstwie monomolekularnej, tzw. powierzchnią siadania, równą 0,162 nm², natomiast N_A jest liczbą Avogadra.

Porównując wartość całkowitej powierzchni właściwej adsorbentu, uzyskaną na podstawie funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego, z wartościami powierzchni właściwych otrzymanymi na podstawie porównawczej metody α_s oraz metody BET należy stwierdzić, że wartość ta jest o około 50% mniejsza od dwóch pozostałych wartości. Zdaniem autorów jest to wartość bliższa rzeczywistej wartości powierzchni właściwej adsorbentu z tego powodu, że w metodzie tej pomija się ilość adsorbentu zawartego w całej objętości mikroporów i w obliczeniach uwzględnia się tylko adsorbat zaadsorbowany monowarstwowo na ich ściankach. Natomiast w metodach bazujących na wykresie porównawczym α_s oraz równaniu BET uwzględnia się także ilość zaadsorbowaną w drugim etapie, czyli w procesie objętościowego zapełniania mikroporów, i ten fakt powoduje znaczne zawyżenie powierzchni właściwej węgla aktywnego. Należy wspomnieć, że metoda wyznaczania całkowitej powierzchni właściwej z początkowego nachylenia wykresu α_s jest prawie równoważna metodzie BET, gdyż polega na przemnożeniu powierzchni BET dla adsorbentu odniesienia przez odpowiedni współczynnik. Można tego uniknąć poprzez użycie wartości powierzchni wyznaczonej z minimum funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego dla adsorbentu odniesienia, zamiast powierzchni BET. Powierzchnia właściwa wyznaczona na podstawie funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego dla sadzy Cabot BP280 (adsorbent odniesienia) jest równa 30,9 m²/g, co daje całkowitą powierzchnię właściwą węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD równą 1960 m²/g. Jak widać, tak wyznaczona powierzchnia właściwa jest znacznie bliższa wartości 1780 m²/g, którą wyznaczono bezpośrednio na podstawie minimum funkcji potencjału.

Całkowita powierzchnia właściwa adsorbentu, wyznaczona na podstawie funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego, może być podstawą do oszacowania średniego wymiaru mikroporów oznaczonego jako $w_{X(A)}$. Do tego celu może służyć dobrze znana geometryczna zależność dla szczelinyowego modelu mikroporów:

$$S_{X(A)} = \frac{2V_{\text{mi},\alpha_s}}{S_{\text{mi}}} = \frac{2V_{\text{mi},\alpha_s}}{S_{\text{t},X(A)} - S_{\text{me},\alpha_s}} \quad (5)$$

gdzie S_{mi} jest powierzchnią właściwą mikroporów, wyznaczoną jako różnica pomiędzy całkowitą powierzchnią właściwą węgla aktywnego $S_{\text{t},X(A)}$, określoną za pomocą funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego, a powierzchnią właściwą mezoporów tego węgla określoną za pomocą metody α_s , natomiast V_{mi,α_s} jest objętością mikroporów węgla aktywnego wyznaczoną za pomocą metody α_s .

Podstawiając odpowiednie wartości, wcześniej przytoczone w niniejszej pracy, otrzymano średni wymiar mikroporów wynoszący $w_{X(A)}=1,24$ nm.

Inną użyteczną informacją, która można uzyskać na podstawie funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego, jest objętość mikroporów $V_{\text{mi},X(A)}$. Objętość ta odpowiada minimum na krzywej funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego za

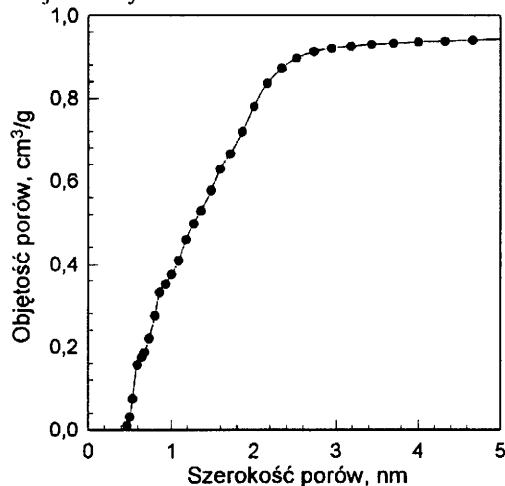
drugim pikiem wynikającym z objętościowego zapełniania mikroporów. W wypadku węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD minimum to oszacowano dla wartości $A_{\min}=0,53$ kJ/mol. Tej wartości potencjału odpowiada ciśnienie względne $p/p_0=0,437$ i dalej z kolei tej wartości ciśnienia odpowiada z izotermy wartość adsorpcji $a_{mi,X(A)}=0,893$ g/g. Wartość ta ostatecznie pozwala obliczyć objętość mikroporów $V_{mi,X(A)}=1,10$ cm³/g. Porównując objętość mikroporów węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD, wyznaczoną za pomocą metody α_s (1,03 cm³/g) oraz za pomocą funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego (1,10 cm³/g), można stwierdzić, że obie wielkości różnią się nieznacznie i mogą być rzeczywistymi wartościami objętości mikroporów tego węgla aktywnego.

Nowe obiecujące podejście w charakterystyce mikroporowatych węgla aktywnych stwarza teoria funkcjonu gęstości (DFT). Idea metody DFT jest stosunkowo prosta i polega na rozwiązaniu równania całkowego względem funkcji rozkładu porów [15]. Równanie to ma następującą postać:

$$V(p) = \int v(p,w) F(w) dw \quad (6)$$

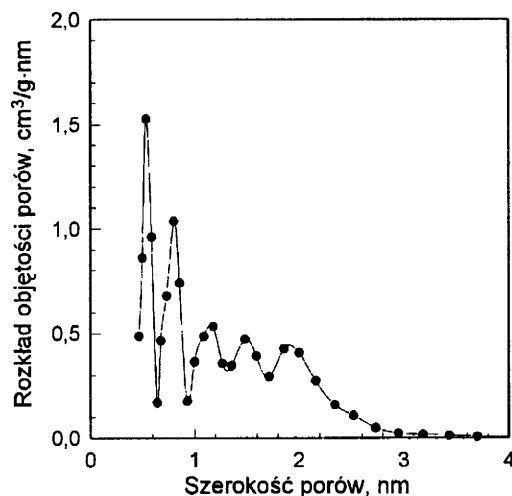
gdzie $V(p)$ jest całkowitą objętością adsorbentu w porach dla danego ciśnienia p , $v(p,w)$ jest lokalną izotermą adsorpcji (wyrażoną w jednostkach objętości adsorbentu na jednostkę masy adsorbentu) opisującą ten proces w jednorodnych porach o szerokości w , zaś $F(w)=dV/dw$ jest różniczkowym rozkładem objętości porów.

Doświadczalna izoterma adsorpcji azotu w temperaturze -196 °C na węglu aktywnym MAXSORB 20-SPD posłużyła do wyznaczenia, za pomocą komercyjnie dostępnego programu DFT, całkowitej krzywej rozkładu objętości porów w funkcji ich szerokości. Program ten został opracowany przez Oliviera i współpracowników [16]. Krzywa całkowita przedstawiona jest na rysunku 5.



Rys. 5. Całkowa krzywa rozkładu objętości porów węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD, wyznaczona metodą DFT na podstawie doświadczalnej izotermy adsorpcji azotu w temperaturze -196 °C

Całkowa krzywa rozkładu objętości porów węgla aktywnego była podstawą do wyznaczenia krzywej różniczkowej. Krzywą całkowitą aproksymowano funkcją przedziałowo-sześcienną (splinem), mającą właściwość dobrego przybliżenia krzywej aproksymującej, przy jednocześnie niewielkich oscylacjach. Następnie na podstawie funkcji aproksymującej obliczono pierwszą pochodną, która w tym wypadku jest właśnie rozkładem różniczkowym objętości porów w zależności od ich szerokości. Różniczkową krzywą rozkładu objętości porów dla węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Różniczkowa krzywa rozkładu objętości porów węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD, wyznaczona metodą DFT na podstawie doświadczalnej izotermy adsorpcji azotu w temperaturze -196 °C

Funkcja ta charakteryzuje się kilkoma pikami w obszarze mikroporowatości, tj. dla porów o szerokości mniejszej od 2 nm. Piki te świadczą o bardzo dobrze rozwiniętej tej części mikroporowatości analizowanego węgla aktywnego. Metoda DFT pozwala również na wyznaczenie całkowitej objętości i powierzchni właściwej porów. Dla węgla aktywnego MAXSORB 20-SPD wartości te wynoszą odpowiednio 0,97 cm³/g i 1800 m²/g. Są to wartości bardzo bliskie tym, jakie uzyskano stosując metodę wynikającą z funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań adsorpcji azotu na mikroporowatym węglu aktywnym upoważniają do kilku ważnych uogólnień. Jak wykazano, funkcja rozkładu potencjału adsorpcyjnego może być wykorzystana do analizy struktury porowatej węgla aktywnego, tj. do wyznaczania jego całkowitej powierzchni właściwej, objętości mikroporów i średniego wymiaru mikroporów, a uzyskane parametry są zgodne z parametrami struktury porowatej węgla aktywnego otrzymanymi za pomocą nowoczesnych metod numerycznych, tj. metody DFT i symulacji komputerowych. Te obliczenia nie wymagają danych adsorpcyjnych dla bardzo niskich ciśnień. Wystarczy, jeśli izoterma adsorpcji jest zmierzona od ciśnień rzędu 10^{-4} – 10^{-3} mmHg. Otrzymane wyniki wskazują, że adsorpcja azotu w mikroporach adsorbentów węglowych w temperaturze -196 °C przebiega według mechanizmu jedno- lub dwustopniowego i zależy od wymiarów mikroporów. Bliskie wartości parametrów struktury porowatej węgla aktywnego, uzyskane za pomocą zaawansowanych metod adsorpcyjnych i danych eksperymentalnych otrzymanych przez autorów wskazują na możliwość stosowania metody wynikającej z funkcji rozkładu potencjału adsorpcyjnego do opisu struktury porowatej adsorbentów.

Niniejszą pracę wykonano częściowo w ramach grantu KBN nr 3 T09B 036 16.

LITERATURA

1. H. JANKOWSKA, A. ŚWIĄTKOWSKI, J. CHOMA: Active Carbon. Ellis Horwood Ltd., Chichester 1991.
2. M. JARONIEC, R. MADEY: Physical Adsorption on Heterogeneous Solids. Elsevier, Amsterdam 1988.

3. M. M. DUBININ: Adsorpcja i porowatość. WAT, Warszawa 1975.
4. M. KRUK, M. JARONIEC, K. G. GADKAREE: Determination of the specific surface area and the pore size of microporous carbons from adsorption potential distribution. *Langmuir*, 1999, Vol. 15, pp. 1442–1448.
5. S. J. GREGG, K. S. W. SING: Adsorption, Surface Area and Porosity. Academic Press, London 1982.
6. J. CHOMA: Application of the polymolecular adsorption theory for the description of microporous structures of activated carbons. *Polish J. Chem.*, 1989, Vol. 63, pp. 173–180.
7. M. KRUK, M. JARONIEC, J. CHOMA: Critical discussion of simple adsorption methods used to evaluate micropore size distribution. *Adsorption*, 1997, Vol. 3, pp. 209–219.
8. J. CHOMA, J. OLIVIER, M. JARONIEC: Niskotemperaturowa adsorpcja azotu, argonu i kryptonu na nieporowatym adsorbencie węglowym. *Biuletyn WAT*, 1996, t. 45, nr 3, ss. 5–14.
9. J. CHOMA, M. JARONIEC: Low temperature adsorption of nitrogen on homogeneous and heterogeneous nonporous and mesoporous carbonaceous adsorbents. *Polish J. Chem.*, 1997, Vol. 71, pp. 380–389.
10. A. N. WENNERBERG, T. M. OGRADY: US Patent No. 4082694, 1978.
11. T. OTOWA, Y. NOJIMA, T. MIYAZAKI: Development of KOH activated high surface area carbon and its application to drinking water purification. *Carbon*, 1997, Vol. 35, No. 9, pp. 1315–1319.
12. M. KRUK, Z. LI, M. JARONIEC, W. R. BETZ: Nitrogen adsorption study of surface properties of graphitized carbon blacks. *Langmuir*, 1999, Vol. 15, pp. 1435–1441.
13. J. CHOMA, M. JARONIEC: Porównawcza analiza symulowanych izoterm adsorpcji azotu w porach szczelinowych i jej zastosowanie do charakterystyki węgla aktywnych. *Biuletyn WAT*, 1997, t. 46, nr 10, ss. 123–131.
14. J. CHOMA, M. JARONIEC, W. BURAKIEWICZ-MORTKA: Zastosowanie metody α_s do charakterystyki struktury porowatej węgla aktywnych na podstawie adsorpcji benzenu z roztworów wodnych. *Ochrona Środowiska*, 1997, nr 3(66), ss. 39–41.
15. J. CHOMA, M. JARONIEC, J. P. OLIVIER: Porównanie adsorpcyjnych metod wyznaczania funkcji rozkładu porów węgla aktywnych. *Przem. Chem.*, 1997, t. 76, nr 3, ss. 101–103.
16. J. P. OLIVIER, W. B. CONKLIN, M. VON SZOMBATHELY: Users guide "A program for the calculation of the total surface area and the distribution of pore area and volume from a density functional theory of adsorption and condensation within porous solids", 1993, Norcross, GA, USA.

New Methods Enabling Description of the Porous Structure of Active Carbons on the Basis of Adsorption Data

The porous structure of the MAXSORB 20-SPD active carbon was characterized using nitrogen adsorption isotherm at 77 K in a wide range of relative pressures (10^{-7} to 0.995). It was shown that analysis of the distribution function of the adsorption potential permits evaluation of the total specific surface area, micropore volume and average micropore size. For many active carbons the adsorption potential distribution function has two peaks; one of them corresponds to the monolayer formation on the surface of the micropore walls, and the other one reflects

the volume filling of the micropores. The minimum between these two peaks can be identified as the point of the monolayer completion. It allows calculating the total specific surface area of the active carbon, which agrees with that evaluated on the basis of the DTF method. Assuming the model of slit-like pores it is possible to determine also the average pore size. It appears that the adsorption potential distribution can be of utility in characterizing the porous structure of active carbons.