

Jerzy Choma, Mietek Jaroniec, Eugene A. Ustinov

Adsorpcyjna charakterystyka węgla aktywnych o bardzo dobrze rozwiniętej porowatości

Węgle aktywne są bardzo popularnymi materiałami używanymi w badaniach naukowych i procesach technologicznych związanych z rozdzielaniem i katalizą. Węgle aktywne są stosowane jako adsorbenty, wypełnienia kolumn chromatograficznych, nośniki i katalizatory, a także są wykorzystywane do gromadzenia takich gazów jak wodór czy metan [1]. Granulowane i pyliste węgle aktywne często stosuje się do adsorpcji z fazy ciekłej. W zastosowaniach węgla aktywnych do oczyszczania fazy ciekłej wymaga się, aby zawierały one znaczny udział porów o dużych wymiarach w strukturze porowatej. Ułatwia to proces dyfuzji dużych cząsteczek adsorbentu z fazy ciekłej do wnętrza struktury porowatej granulki czy ziarna węgla aktywnego.

Do głównych zastosowań węgla aktywnych w układzie ciało stałe–ciecz należą usuwanie substancji zapachowych, odbarwianie i poprawa smaku roztworów poprzez usuwanie z nich substancji szkodliwych, a także zęzżanie i odzyskiwanie substancji rozpuszczonych w roztworach. Bardzo istotnym zastosowaniem węgla aktywnych jest oczyszczanie wody przeznaczonej do spożycia [2,3], a zwłaszcza usuwanie z niej niepożądanych związków organicznych, co ma fundamentalne znaczenie dla zdrowia konsumentów.

W ciągu ostatnich kilku lat pojawiły się doniesienia naukowe o nowych uporządkowanych nanoporowatych adsorbentach węglowych [4] i krzemionkowych [5]. Adsorbenty te, chociaż nie ustępują pod względem parametrów struktury porowatej węglom aktywnym i mają inne ciekawe właściwości strukturalne i powierzchniowe, to ciągle jeszcze nie mogą konkurować z węglami aktywnymi na skalę przemysłową. Dlatego też – jak się wydaje – doniesienia naukowe o metodach charakterystyki właściwości strukturalnych i powierzchniowych węgla aktywnych cieszą się nadal dużym zainteresowaniem specjalistów z wielu dziedzin nauki i techniki.

Celem niniejszej pracy była charakterystyka struktury porowatej węgla aktywnych o bardzo dobrze rozwiniętej porowatości. Szczególną uwagę zwrócono na nowoczesne metody oceny porowatości węgla aktywnych na podstawie niskotemperaturowych (77 K) izoterm adsorpcji azotu wyznaczonych metodą statyczną. Pomiaru statyczne, w ustalonych

warunkach równowagi pomiędzy fazą stałą (adsorbentem) i gazową (adsorbentem), są – jak się wydaje – najlepszą metodą oceny właściwości strukturalnych materiałów porowatych. Pomiaru takie pozwalają na wyznaczenie wartości adsorpcji w funkcji ciśnienia w bardzo szerokim przedziale ciśnień względnych, tj. od około 10^{-6} do ok. 1,0. Takich danych nie można uzyskać metodą adsorpcji dynamicznej, np. metodą chromatografii gazowej. Wyznaczone doświadczalnie izotermu adsorpcji azotu posłużyły do określenia parametrów struktury porowatej węgla, takich jak powierzchnia właściwa, objętość porów, funkcja rozkładu objętości porów czy funkcja rozkładu energii adsorpcji. Znajomość tych parametrów i ich właściwa interpretacja wpływa na odpowiedni wybór i zastosowanie węgla aktywnego do danego procesu adsorpcyjnego lub katalitycznego. Dość szczegółowo omówione metody charakterystyki struktury porowatej badanych węgla aktywnych mogą zachęcić badaczy zainteresowanych tą tematyką do stosowania tych metod w odniesieniu do węgla aktywnych o odmiennych właściwościach adsorpcyjnych, a także innych (węglowych, krzemionkowych, glinokrzemianowych, tlenkowych itp.) materiałów porowatych.

Część doświadczalna

Badania przeprowadzono dla trzech przemysłowych węgla aktywnych, zainteresowanie którymi wynika z ich niezwykle rozwiniętej struktury porowatej. Dwa węgle aktywne, oznaczone symbolami WV-A900 i BAX 1500, pochodziły z firmy MeadWestvaco Corporation (Covington, VA, USA). Są one otrzymywane ze specjalnych gatunków drewna, karbonizowane i aktywowane w obecności kwasu fosforowego(V). Trzeci węgiel aktywny, oznaczony symbolem NP5, pochodził z firmy GryfSkand (Hajnówka, Polska). Jest on otrzymywany z pestek śliwek. Po karbonizacji jest następnie aktywowany parą wodną i dwutlenkiem węgla.

W celu określenia właściwości adsorpcyjnych przemysłowych węgla aktywnych wyznaczono dla nich niskotemperaturowe (77 K) izotermu adsorpcji azotu w warunkach statycznych. Dane adsorpcyjne zmierzono za pomocą objętościowego analizatora adsorpcyjnego ASAP 2010 firmy Micromeritics (Norcross, GA, USA). Analizator ten jest wyposażony w trzy reduktory ciśnieniowe (1000 mmHg, 10 mmHg i 1 mmHg), pozwalające zarówno na dużą dokładność, jak i wysoką rozdzielczość pomiarów adsorpcyjnych, możliwych do wykonania nawet dla bardzo małych ciśnień względnych (ok. 10^{-6}). Przed pomiarami adsorpcyjnymi próbki węgla aktywnych odgazowano w temperaturze 473 K w ciągu 2 godz.

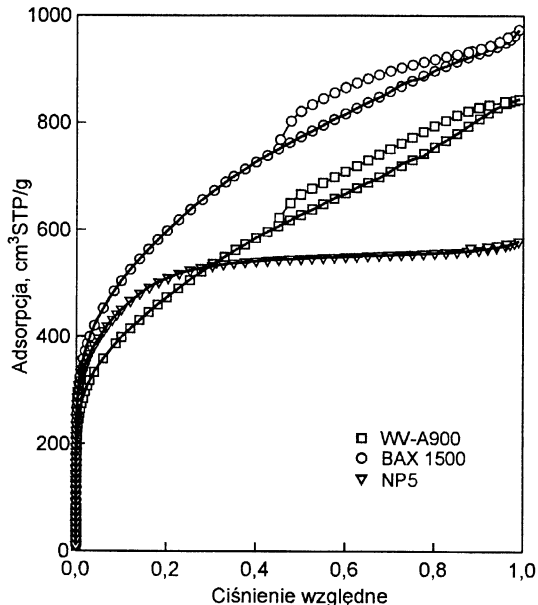
Prof. dr hab. inż. J. Choma: Akademia Świętokrzyska, Instytut Chemii, ul. Chęcińska 5, 25–020 Kielce
choma@pu.kielce.pl

Prof. dr hab. M. Jaroniec: Kent State University, Department of Chemistry, Kent, 44–242 Ohio, USA
jaroniec@kent.edu

Prof. dr E. A. Ustinov: University of Queensland, Department of Chemical Engineering, St. Lucia, Qld 4072 Australia
eugeneu@cheque.uq.edu.au

Dyskusja wyników

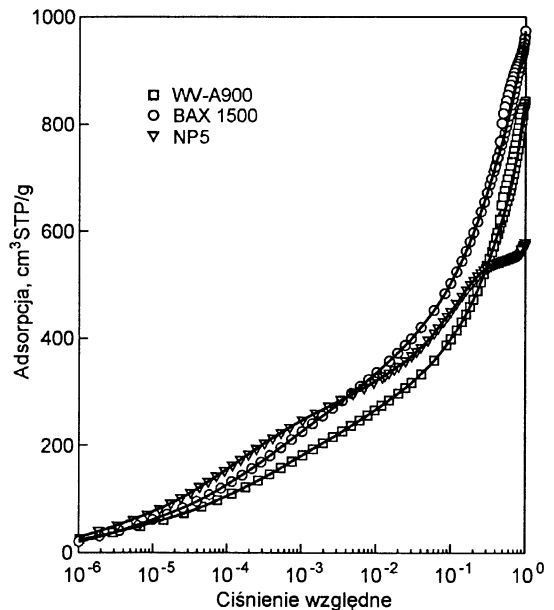
Niskotemperaturowe (77 K) izotermy adsorpcji azotu dla badanych węgli aktywnych w liniowej skali ciśnień względnych pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Doświadczalne izotermy adsorpcji i desorpcji azotu w temp. 77 K w liniowej skali ciśnień względnych dla badanych węgli aktywnych (punkty); linią ciągłą przedstawiono przebieg teoretycznych krzywych adsorpcji uzyskanych metodą NLDFT

Izoterma adsorpcji na węglu NP5 jest izotermą I typu, a izotermy adsorpcji na węglach WV-A900 i BAX 1500 są IV typu, spośród sześciu kategorii izoterm według klasyfikacji IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) [6]. Izotermy I typu wskazują na dużą adsorpcję w przedziale niskich ciśnień względnych, czyli dotyczą adsorbentów ze znacznie rozwiniętą mikroporowością (porowością, którą tworzą pory o liniowych wymiarach mniejszych od 2 nm). W obszarze średnich i wysokich ciśnień względnych izoterma ma przebieg niemal równoległy do osi odciętych, co wskazuje na to, że mezoporowość (pory o wymiarach od 2 nm do 50 nm) jest słabo rozwinięta lub w ogóle nie występuje. W wypadku węgla aktywnego NP5 spodziewać się można dobrze rozwiniętej mikroporowości i słabo rozwiniętej mezoporowości, natomiast izotermami IV typu, według klasyfikacji IUPAC, charakteryzują się materiały porowate, które – oprócz stosunkowo dobrze rozwiniętej mikroporowości – mają także dobrze rozwiniętą mezoporowość.

W przedziale niskich ciśnień względnych następuje objętościowe zapełnienie mikroporów, a następnie w przedziale średnich i wysokich ciśnień względnych sukcesywne zapełnianie mezoporów na skutek kondensacji kapilarnej [7]. W wypadku węgla aktywnych WV-A900 i BAX 1500 należy się spodziewać zarówno dobrze rozwiniętej mikroporowości, jak i bardzo dobrze rozwiniętej mezoporowości. Izotermy IV typu charakteryzują się pętlą histerezy, gdyż proces zapełniania i opróżniania porów nie przebiega po tej samej krzywej. Na izotermach adsorpcyjno-desorpcyjnych węgla aktywnych WV-A900 i BAX 1500 obserwuje się występowanie szerokich pętli histerezy, potwierdzających istnienie dobrze rozwiniętych struktur mezoporowatych tych węgli. Na rysunku 2 przedstawiono doświadczalne izotermy adsorpcji azotu dla badanych węgli aktywnych w logarytmicznej skali ciśnień względnych.



Rys. 2. Doświadczalne izotermy adsorpcji i desorpcji azotu w temp. 77 K w logarytmicznej skali ciśnień względnych dla badanych węgli aktywnych (punkty); linią ciągłą przedstawiono przebieg teoretycznych krzywych adsorpcji uzyskanych metodą NLDFT

W przedziale ciśnień względnych od 10^{-6} do 10^{-2} najlepszą adsorpcją względem azotu charakteryzował się węgiel aktywny NP5. Potwierdza to fakt najlepszego rozwinięcia mikroporowości tego węgla aktywnego, w porównaniu z węglami WV-A900 i BAX 1500.

Obecnie do wyznaczania powierzchni właściwej adsorbentów stosowane są dwie główne metody, tj. metoda Brunauer-Emmetta-Tellera (BET) i porównawcza metoda α_s [1,6,8]. Wyznaczanie powierzchni właściwej węgla aktywnego za pomocą metody BET oparte jest na wyznaczeniu pojemności monowarstwy (tj. określeniu liczby zaadsorbowanych cząstek tworzących monowarstwę na powierzchni węgla aktywnego), przy użyciu aproksymacji doświadczalnych danych adsorpcyjnych za pomocą równania BET. Mnożąc uzyskaną pojemność monowarstwy przez powierzchnię zajmowaną przez pojedynczą cząsteczkę adsorbentu w monowarstwie (tzw. powierzchnię siadania cząsteczki adsorbentu), uzyskuje się powierzchnię właściwą (S_{BET}) węgla aktywnego. Wykorzystanie równania BET pociąga za sobą następujące główne założenia:

- powierzchnia adsorbentu jest płaska,
- wszystkie miejsca adsorpcyjne wykazują tę samą energię adsorpcji,
- brak jest bocznych oddziaływań pomiędzy zaadsorbowanymi cząsteczkami,
- energia adsorpcji dla wszystkich cząstek, z wyjątkiem znajdujących się w pierwszej warstwie, jest równa energii skraplania,
- liczba tworzących się warstw adsorpcyjnych jest nieskończona.

W wypadku adsorpcji na rzeczywistym porowatym adsorbencie (np. węgla aktywnym) wszystkie te warunki nie są spełnione. W szczególności, powierzchnia jest geometrycznie i energetycznie niejednorodna, co powoduje występowanie bocznych oddziaływań pomiędzy zaadsorbowanymi cząsteczkami i oddziaływania te zmieniają się wraz ze wzrostem odległości zaadsorbowanej cząsteczki od powierzchni adsorbentu. Dlatego nie należy się spodziewać, że pojemność

monowarstwy wyznaczona metodą BET będzie wyjątkowo dokładna. Dodatkowo, wartość efektywnej powierzchni siadania cząsteczki adsorbentu (oznaczanej jako ω) w monowarstwie, także dość często różni się i zależy od rodzaju powierzchni, na której ma miejsce adsorpcja. Dlatego istotnym problemem jest właśnie dobór adsorbentu, z punktu widzenia rozmiaru jego cząsteczek lub atomów, do oceny powierzchni właściwej danego adsorbentu. Mimo tych wszystkich problemów i ograniczeń, metoda BET jest bardzo często używana jako standardowa metoda do wyznaczania powierzchni właściwej adsorbentów, przy czym do wyznaczania powierzchni właściwej węgla aktywnych i innych adsorbentów rekomendowane jest wykorzystywanie danych adsorpcyjnych azotu. Zazwyczaj dane te wykorzystywane są dla ciśnień względnych mniejszych od 0,3.

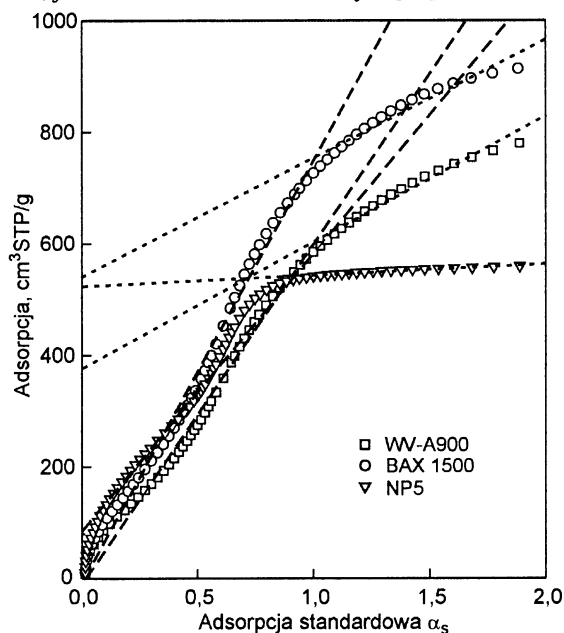
Na podstawie doświadczalnych izoterm adsorpcji azotu przedstawionych na rysunkach 1 i 2, w przedziale ciśnień względnych $p/p_0=0,05\pm 0,3$ dla węgla aktywnych WV-A900 i BAX 1500, oraz $p/p_0=0,01\pm 0,2$ dla węgla aktywnego NP5, wyznaczono za pomocą metody BET powierzchnię właściwą (S_{BET}) badanych węgla aktywnych (tab. 1).

Przedział ciśnień względnych, w którym wyznaczono powierzchnię właściwą dla węgla NP5, przesunięto w kierunku niższych ciśnień względnych dlatego, że w wypadku bardziej mikroporowatego węgla aktywnego utworzenie monowarstwy następuje dla niższych ciśnień względnych. Analizując wartości S_{BET} należy stwierdzić, że wybrane do badań węgle aktywne charakteryzowały się wyjątkowo dużymi wartościami powierzchni właściwej. Ta uwaga dotyczy zarówno mikroporowatego węgla aktywnego NP5, jak i mikro-mezoporowatych węgla aktywnych WV-A900 i BAX 1500.

Drugą metodą, którą wykorzystano do wyznaczenia parametrów struktury porowatej węgla aktywnych była porównawcza metoda α_s [4–6], która jest bardzo często wykorzystywana do wyznaczania takich parametrów struktury porowatej węgla aktywnych, jak całkowita powierzchnia właściwa, objętość mikroporów oraz powierzchnia właściwa mezoporów. Główna idea porównawczej metody α_s sprowadza się do wykorzystania różnic, które występują w procesach adsorpcyjnych przebiegających na adsorbentach nieporowatych i porowatych. Różnice te służą właśnie do wyznaczania wymienionych parametrów struktury porowatej adsorbentów. Fizyczna adsorpcja gazów i par na nieporowatych i makroporowatych powierzchniach przebiega w wyniku tworzenia wielowarstwy (warstwa po warstwie), natomiast adsorpcja w mikroporach przebiega według mechanizmu zapełniania objętościowego. W wypadku porowatych ciał stałych, zawierających zarówno mikropory, jak i mezopory, np. większość węgla aktywnych, objętościowe zapełnianie mikroporów następuje w przedziale niskich ciśnień względnych. Wówczas również następuje tworzenie filmu adsorpcyjnego na powierzchni ścianek mezoporów i dalej ostatecznie wolna przestrzeń w tych mezoporach zostaje wypełniona ciekłym adsorbentem

według mechanizmu kondensacji kapilarnej dla średnich i wysokich ciśnień względnych. Tak więc przedstawienie wartości adsorpcji na adsorbencie porowatym w funkcji wartości adsorpcji na adsorbencie nieporowatym pozwala na skutek zróżnicowanego mechanizmu adsorpcji na obu typach adsorbentów wyznaczyć parametry charakteryzujące strukturę porowatego adsorbentu. W wypadku metody α_s , jednej z kilku metod porównawczych, wartość adsorpcji na nieporowatym adsorbencie przedstawia się w funkcji zredukowanej standardowej adsorpcji α_s , która jest określona dla nieporowatego adsorbentu odniesienia, jako stosunek ilości adsorbentu zaadsorbowanego dla danego ciśnienia względnego do ilości zaadsorbowanego dla ciśnienia względnego $p/p_0=0,4$ [9].

Wykresy α_s dla trzech badanych węgla aktywnych, przedstawione na rysunku 3, zostały sporządzone przez porównanie doświadczalnych izoterm adsorpcji na węglach aktywnych z izotermą adsorpcji na niegrafityzowanej sadzy Cabot BP280, jako adsorbencie standardowym [10].



Rys. 3. Wykresy α_s wyznaczone dla badanych węgla aktywnych przy użyciu standardowych danych adsorpcji azotu na niegrafityzowanej sadzy Cabot BP280

Na podstawie tych wykresów, dla małych wartości α_s od 0,1 do 0,6 dla węgla aktywnego NP5 i dla małych wartości α_s od 0,1 do 1,0 dla węgla aktywnych WV-A900 i BAX 1500, wyznaczono całkowitą powierzchnię właściwą (S_t) tych węgla (tab. 1). Porównanie tych wartości z wartościami powierzchni właściwej wyznaczonymi metodą BET wskazuje, że w wypadku węgla aktywnych WV-A900 i BAX 1500 powierzchnie te były zgodne, co było naturalne, jako że sposób wyznaczania powierzchni właściwej obiema metodami oparty był na tych samych założeniach teoretycznych. Dziwić może natomiast tak znaczna rozbieżność powierzchni właściwej (S_{BET} i S_t) dla

Tabela 1. Parametry struktury porowatej węgla aktywnych, wyznaczone na podstawie niskotemperaturowej adsorpcji azotu

Symbol węgla aktywnego	Powierzchnia właściwa (S_{BET}) m^2/g	Całkowita powierzchnia właściwa (S_t) m^2/g	Objętość mikroporów (V_m) cm^3/g	Powierzchnia właściwa mezoporów (S_{me}) m^2/g	Całkowita objętość porów (V_p) cm^3/g
WV-A900	1690	1670	0,61	570	1,30
BAX 1500	2120	2070	0,82	600	1,51
NP5	1840	1360	0,81	54	0,90

węgla aktywnego NP5. Jedynym uzasadnieniem tak znacznej różnicy może być duża mikroporowatość tego węgla aktywnego, a jak wiadomo, metoda BET daje niezbyt dokładne wyniki w wypadku mikroporowatych węgli aktywnych zawierających mikropory o małych liniowych wymiarach.

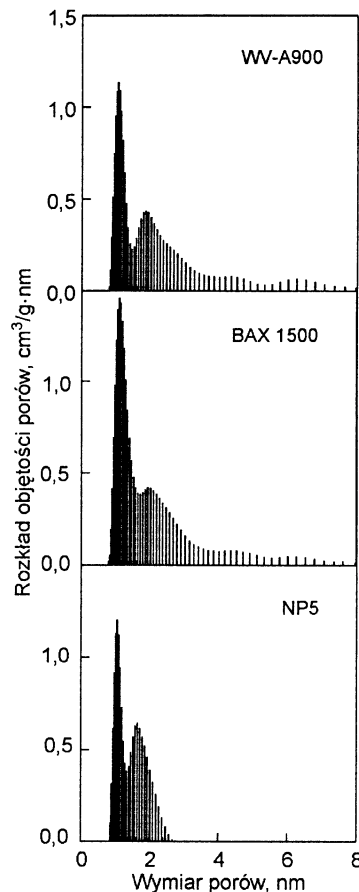
Na podstawie wykresów α_s (dla dużych wartości α_s od 1,0 do 2,0) dla wszystkich węgli aktywnych wyznaczono objętość mikroporów (V_{mi}) i powierzchnię właściwą mezoporów (S_{me}). Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 1. Analizując wartości parametrów struktury porowatej (V_{mi} i S_{me}) badanych węgli aktywnych należy stwierdzić, że ich struktura porowata była bardzo zróżnicowana. Węgiel NP5 był rzeczywiście węglem mikroporowatym, o bardzo małym udziale mezoporów, natomiast węgle aktywne WV-A900 i BAX 1500 nie dość, że miały bardzo dobrze rozwiniętą mikroporowatość, to dodatkowo charakteryzowały się niezwykle rozwiniętą mezoporowatością. O tak dobrze rozwiniętej mezoporowatości węgle aktywne spotyka się rzadko.

W tabeli 1 przedstawiono jeszcze jeden parametr struktury porowatej badanych węgli aktywnych, a mianowicie całkowitą objętość porów (V_t). Parametr ten uzyskuje się także na podstawie doświadczalnej izotermy adsorpcji, dla której określa się całkowitą adsorpcję (a_t) dla $p/p_0=0,99$. Aby uzyskać całkowitą objętość porów (V_t) należy całkowitą adsorpcję (a_t) pomnożyć przez współczynnik 0,0015468, pozwalający przeliczyć adsorpcję wyrażoną w $\text{cm}^3\text{STP/g}$ na objętość adsorbentu, równą objętości porów, w cm^3/g . Wartości całkowitej objętości porów (V_p) przedstawiono w tabeli 1. Trzeba przyznać, że były to wartości wyjątkowo duże, jak dla węgli aktywnych i dlatego rzadko spotykane.

Istotną rolę w charakterystyce właściwości adsorpcyjnych węgli aktywnych, oprócz parametrów ich struktury porowatej, odgrywają funkcje rozkładu objętości porów i funkcje rozkładu energii adsorpcji. Dlatego w niniejszej pracy poświęcono nieco uwagi wyznaczaniu tych funkcji za pomocą nowoczesnej metody wykorzystującej niezlokalizowaną teorię funkcjonału gęstości (NLDFT – Nonlocal Density Functional Theory). Metoda NLDFT pozwala również na teoretyczny opis doświadczalnych izoterm adsorpcji danego adsorbentu na określonym adsorbencie.

Na rysunkach 1 i 2 punkty ilustrujące wyznaczone doświadczalnie izotermie adsorpcji azotu na badanych węglach aktywnych zestawiono z symulowanymi metodą NLDFT izotermami teoretycznymi, przedstawionymi jako linie ciągłe. Należy podkreślić, że opis doświadczalnych izoterm adsorpcji za pomocą metody NLDFT jest bardzo dobry w całym przedziale ciśnień względnych, tj. od 10^{-6} do 1,0. Szczególnie dobrze można to ocenić na podstawie rysunku 2, gdzie izotermy przedstawiono w skali logarytmicznej ciśnienia względnego. Do obliczeń przebiegu symulowanych izoterm adsorpcji i funkcji rozkładu objętości porów oraz funkcji rozkładu energii adsorpcji wykorzystano program numeryczny, którego ideę szczegółowo opisano w pracy [11].

Na rysunku 4 przedstawiono funkcje rozkładu objętości porów badanych węgli aktywnych, w zależności od liniowego wymiaru porów. Funkcje te podkreślają strukturalne zróżnicowanie badanych węgli aktywnych. Węgiel NP5 był węglem mikroporowatym. Funkcja rozkładu objętości porów dla tego węgla była zawarta w przedziale mikroporowatości (szerokość porów <2 nm). Powyżej 2 nm objętość porów była znikoma. Inaczej wyglądają funkcje rozkładu dla węgli aktywnych WV-A900 i BAX 1500. Węgłe te miały dobrze

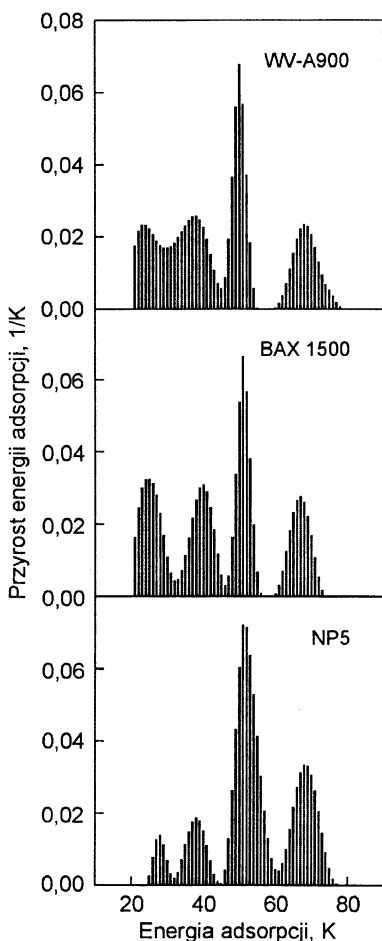


Rys. 4. Funkcje rozkładu objętości porów badanych węgli aktywnych wyznaczone za pomocą metody NLDFT

rozwiniętą mikroporowatość, ale także bardzo dobrze rozwiniętą mezoporowatość. Mezopory dla obu węgli aktywnych miały wymiary sięgające 6 nm, a w wypadku węgla aktywnego WV-A900 – nawet 8 nm. Porównując dyspersję funkcji rozkładu objętości porów badanych węgli aktywnych w przedziale mikroporowatości trzeba stwierdzić, że była ona najmniejsza dla węgla aktywnego NP5, natomiast dyspersja funkcji rozkładu mezoporów dla węgla aktywnego WV-A900 była większa od dyspersji dla mezoporów węgla BAX 1500.

Na podstawie NLDFT wyznaczono także funkcje rozkładu energii adsorpcji azotu na powierzchni węglowej badanych adsorbentów. Funkcje te w postaci przyrostu energii adsorpcji (w/K), w zależności od energii miejsc adsorpcyjnych (w/K), przedstawiono na rysunku 5.

Porównanie tych funkcji rozkładu wskazuje, że w obszarze mikroporowatości (największych wartości energii adsorpcji od 50 K do 80 K) przebieg funkcji rozkładu był zbliżony, choć nieznacznie funkcja rozkładu dla węgla NP5 miała wyższe maksima dwóch pików, co oznacza, że azot w wypadku tego węgla aktywnego był adsorbowany najmocniej. Jeśli chodzi natomiast o adsorpcję azotu w strukturach mezoporowatych (energia adsorpcji zmieniająca się od 20 K do 40 K), to tu zdecydowanie dominowała adsorpcja na węglach aktywnych WV-A900 i BAX 1500. W wypadku tych węgli aktywnych funkcje rozkładu energii adsorpcji były bardziej rozwinięte niż w wypadku węgla NP5. Świadczyło to niewątpliwie o istotnym rozwinięciu struktur mezoporowatych węgli aktywnych WV-A900 i BAX 1500.



Rys. 5. Funkcje rozkładu energii adsorpcji dla badanych węgla aktywnych wyznaczone za pomocą metody NLDFT

Podsumowanie

Analizowane węgle aktywne charakteryzowały się zróżnicowaną strukturalną i energetyczną niejednorodnością. Wszystkie badane węgle aktywne miały bardzo dobrze rozwiniętą strukturę porowatą (węgiel aktywny NP5 – mikroporowatą, a węgle WV-A900 i BAX 1500 – mikroporowatą i mezoporowatą). Wykazano, że metody BET, α_s i NLDFT mogą być z powodzeniem łącznie stosowane do charakterystyki porowatości węgla aktywnych, tj. do wyznaczania powierzchni właściwej BET, całkowitej powierzchni właściwej, całkowitej

objętości porów, objętości mikroporów, powierzchni właściwej mezoporów, funkcji rozkładu objętości porów oraz funkcji rozkładu energii adsorpcji.

Należy podkreślić, że doświadczalna izoterma adsorpcji azotu na węglu aktywnym może być, przy zastosowaniu zaawansowanych metod analizy, źródłem wartościowych parametrów i funkcji rozkładu struktury porowatej tego adsorbentu.

Pracę sfinansowano ze środków Komitetu Badań Naukowych, przyznanych na badania w latach 2003–2006.

LITERATURA

1. H. JANKOWSKA, A. ŚWIĄTKOWSKI, J. CHOMA: Active Carbon. Ellis Horwood Ltd., Chichester 1991.
2. A. L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŻ: Oczyszczanie wody. PWN, Warszawa–Wrocław 2000.
3. H. MARSH, E. A. HEINTZ, F. RODRIGUEZ-REINOSO [Eds.]: Introduction to Carbon Technologies. University of Alicante, Alicante 1997.
4. J. CHOMA, M. JARONIEC, A. JEDYNAK: Otrzymywanie i charakterystyka uporządkowanych nanoporowatych materiałów węglowych. *Ochrona Środowiska*, 2003, nr 4, ss. 13–18.
5. J. CHOMA, M. JARONIEC: Otrzymywanie i właściwości modyfikowanych nanoporowatych adsorbentów krzemionkowych. *Ochrona Środowiska*, 2003, nr 1, ss. 3–8.
6. K. S. W. SING, D. H. EVERETT, R. A. W. HAUL, L. MOSCOU, R. A. PIEROTTI, J. ROUQUEROL, T. SIEMIENIEWSKA: Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure Appl. Chem.*, 1985, Vol. 57, pp. 603–619.
7. M. KRUK, M. JARONIEC: Gas adsorption characterization of ordered organic-inorganic nanocomposite materials. *Chem. Mater.*, 2001, Vol. 13, pp. 3169–3183.
8. J. OŚCIK: Adsorpcja. PWN, Warszawa 1979.
9. J. CHOMA, M. JARONIEC: Nowe metody opisu struktury porowatej węgla aktywnych na podstawie danych adsorpcyjnych. *Ochrona Środowiska*, 1999, nr 3, ss. 13–17.
10. M. KRUK, M. JARONIEC, K. P. GADKAREE: Nitrogen adsorption studies of novel synthetic active carbons. *J. Colloid Interface Sci.*, 1997, Vol. 192, pp. 250–256.
11. E. A. USTINOV, D. D. DO: Application of density functional theory to analysis of energetic heterogeneity and pore size distribution of activated carbons. *Langmuir*, 2004, Vol. 20, pp. 3791–3797.

Choma, J., Jaroniec, M., Ustinov, E. A. Adsorption Characterization of Active Carbons of Well Developed Porosity. *Ochrona Środowiska* 2004, Vol. 26, No. 4, pp. 3–7.

Abstract: Low temperature nitrogen adsorption-desorption isotherms at 77 K were measured by a volumetric method for three commercial active carbons in the entire range of relative pressures (from about 10^{-6} to about 1.0). These isotherms were used to characterize the structural and energetic properties of active carbons of well developed porosity. For this purpose use was made of the BET and α_s -plot methods in combination with advanced numerical methods based on the density functional

theory calculations. The combination of well-known methods with new ones allows for the quantitative estimation of micro- and mesoporosity of the active carbons studied. The parameters of the porous structure such as the BET surface area, total surface area, micropore volume, mesopore surface area, and total pore volume as well as pore size and adsorption energy distributions, indicate a significant differentiation of the active carbons studied. While the active carbon NP5 is microporous, WV-A900 and BAX 1500 are micro-mesoporous carbons of highly developed porosity.

Keywords: Adsorption, active carbon, structural characteristics, porosity.