

Kamil CZECH^{1,2}, Piotr M. SŁOMKIEWICZ^{1,2*}

¹ Zakład Fizyki Chemicznej, Instytut Chemii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach,
ul. Świętokrzyska 15 G, 25-406 Kielce

² Laboratorium Badań Strukturalnych, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach,
ul. Świętokrzyska 15 G, 25-406 Kielce
e-mail: piotres@ujk.edu.pl

Zastosowanie pakietów oprogramowania komputerowego do wyznaczenia izoterm adsorpcji metodą inwersyjnej chromatografii gazowej

The use of computer software modules to determination the adsorption isotherms by the inverse gas chromatography

Streszczenie: *W artykule opisano metodę opracowania danych pomiarowych za pomocą pakietu programów komputerowych do wyznaczenia izoterm adsorpcji metodą inwersyjnej chromatografii gazowej. Obliczenia zademonstrowano na przykładzie wyznaczenia izoterm adsorpcji o-ksylenu na sorbencie haloizytowym.*

Słowa kluczowe: *inwersyjna chromatografia gazowa, oprogramowanie, o-ksylen, haloizyt*

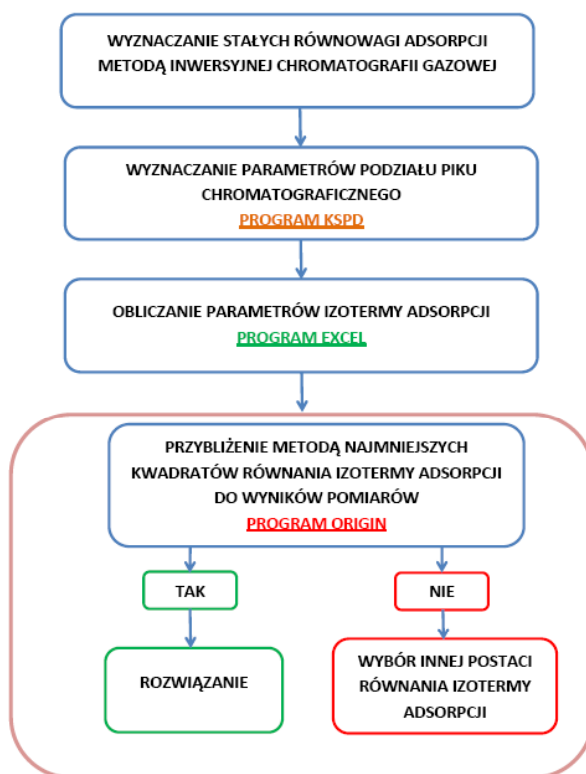
Abstract: *In this article the method of study of measuring data with use the computer software modules to determination the adsorption isotherms was described. An example of the calculations the experiment data of adsorption o-xylene on halloysite sorbent was demonstrated.*

Key Words: *inverse gas chromatography, software, o-xylene, halloysite*

1. Wstęp (Introduction)

Do pomiarów adsorpcji często wykorzystuje się metody inwersyjnej chromatografii gazowej. Pomiar adsorpcji, wykonywane za pomocą tej metody, polegają na wprowadzeniu próbki adsorbentu na adsorbent umieszczony w kolumnie chromatograficznej i analizie otrzymanego chromatogramu. Na podstawie wielkości charakterystycznych dla położenia i kształtu profilu piku chromatograficznego można obliczyć fizykochemiczne parametry procesu adsorpcji. Zwykle do pomiaru wykonywanego metodą inwersyjnej chromatografii gazowej używa się typowego chromatografu gazowego wyposażonego w dozownik, kolumnę zawierającą adsorbent oraz detektor. Natomiast jest mało użyteczne standardowe oprogramowanie dostarczane przez producentów chromatografów do rejestracji opracowania wyników

pomiarów inwersyjnej chromatografii gazowej. Oprócz pomiaru czasu retencji pików chromatograficznego oraz obliczania jego powierzchni, jakie umożliwia standardowe oprogramowanie, jest konieczne wykonywanie innych operacji jak np. określanie kształtu pików, możliwość nakładania na siebie kilku pików. Do wyznaczania izoterm adsorpcji można stosować metodę podziału pików zaliczaną do metod inwersyjnej chromatografii gazowej. Wymaga ona podzielenia pików na segmenty. Do takiego podziału można zastosować program KSPD (Komputerowy Program Przetwarzania Danych) [1]. Program ten nie posiada funkcji, które umożliwiłyby zaawansowane opracowanie wyników. Do tego celu niezbędne jest zastosowanie tzw. *Pakietu programów komputerowych*. Pakietem nazywamy zestaw programów, które umożliwiają obróbkę danych liczbowych, kompatybilnych pomiędzy sobą, a równocześnie umożliwiają jednostkowe wykonywanie operacji z tymi danymi. Dane przenoszone pomiędzy programami z pakietu mogą być przetwarzane przez program za pomocą operacji, których nie posiada inny z programów pakietu.



Rys. 1. Schemat opracowania danych chromatograficznych za pomocą programu KSPD, Excel i Origin

Fig. 1. The scheme elaborate of chromatographic data by the KSPD, Excel and the Origin software

Schemat ideowy opracowania danych chromatograficznych do wyznaczenia izoterm adsorpcji metodą inwersyjnej chromatografii gazowej przedstawiono na rysunku 1. Program KSPD służy do rejestracji i wyznaczania parametrów podziału piku chromatograficznego. Następnie obliczenia fizykochemiczne są wykonywane przez program Excel. Program Origin służy do określania postaci równania izoterm adsorpcji i wyznaczania charakteryzujących ją wielkości. Ten program umożliwia także sprawdzanie zgodności różnych równań izoterm adsorpcji w wynikami pomiarów adsorpcyjnych. W niniejszym artykule przedstawiono metodę obliczenia izoterm adsorpcji o-ksylenu metodą inwersyjnej chromatografii gazowej z użyciem pakietu składającego się z KSPD, Excela i Origina.

2. Wyznaczanie izoterm adsorpcji metodą podziału piku (*The determination of adsorption isotherms by profile peak method*)

Metodę obliczania wielkości adsorpcji i ciśnienia parcjalego adsorbatów opisaną w pracy [2] przystosowano do komputerowej metody określania powierzchni piku chromatograficznego [3].

Na podstawie wielkości powierzchni piku chromatograficznego i powierzchni adsorpcyjnej określonej, jako pole utworzone na chromatografie przez moment od wprowadzenia próbki do kolumny adsorbentu do rozciągniętej linii schodzenia piku (rys. 2), wyznacza się dla każdego punktu izoterm ilość zaadsorbowanej substancji oraz odpowiadające jej równowagowe ciśnienie parcjale w ruchomej fazie gazowej. Powierzchnię adsorpcyjną dzieli się na i -części równoległych do linii podstawowej (segmenty). Powierzchnie poszczególnych segmentów spełniają zależność:

$$S_s = \sum_1^I S_{Is} \quad (1)$$

gdzie:

S_s – całkowita powierzchnia adsorpcyjna [mVs],

S_{Is} – powierzchnia segmentu I całkowitej powierzchni adsorpcyjnej.

Wielkość adsorpcji a_{il} substancji i może być obliczona na podstawie równania:

$$a_{il} = \frac{n \sum_1^I S_{Is}}{m S_p} \quad (2)$$

gdzie:

n – ilość moli dozowanego adsorbentu [mol],

S_p – całkowita powierzchnia piku adsorpcyjnego [mVs],

m – masa adsorbentu [g].

Odpowiadające wielkości adsorpcji a_{il} substancji i ciśnienie parcjale p_{il} jest obliczone przez podzielenie wysokości pików chromatograficznych na l części (rys. 2) zgodnie z równaniem:

$$h = \sum_1^l h_l \quad (3)$$

gdzie:

h – wysokość pików [mV],

h_l – wysokość l części pików [mV].

Równowagowe ciśnienia oblicza się z równania:

$$p_{il} = \frac{n \sum_1^l h_l}{FS_p} RT \quad (4)$$

F – wielkość przepływu gazu nośnego [cm³/s],

T – temperatura [K],

R – stała gazowa.

Dla ilustracji sposobu obliczania zastosowano równanie izotermy Langmuira, które użyto w pracy [4] do wyrażenia izotermy adsorpcji benzenu na sorbencie haloizytowym.

Funkcję izotermy adsorpcji wyrażono za pomocą równania Langmuira:

$$\frac{a_A}{a_S} = r = b \times \frac{(K_A p_A)^n}{1 + (K_A p_A)^n} \quad (5)$$

gdzie:

a_A – masa adsorbentu [g],

a_S – masa adsorbentu [g],

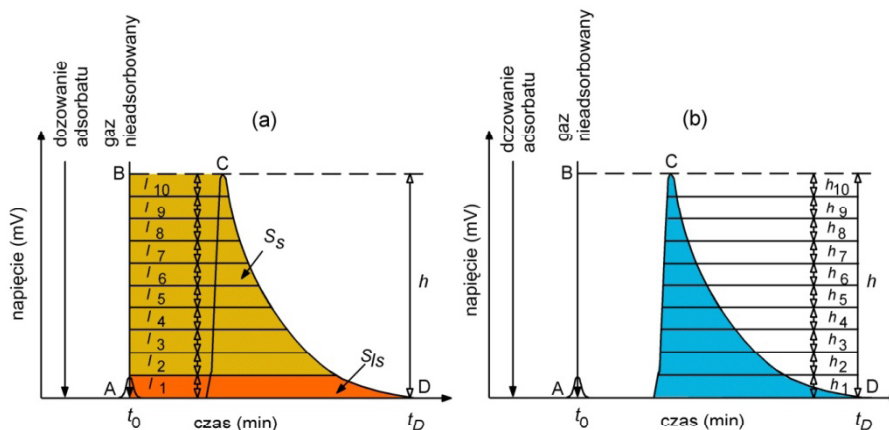
r – stopień pokrycia,

K_A – stała równowagi adsorpcji adsorbentu [kPa⁻¹],

p_A – ciśnienie parcjale adsorbentu A [Pa],

n – współczynnik potęgowy (bezwymiarowy),

b – współczynnik proporcjonalności (bezwymiarowy).



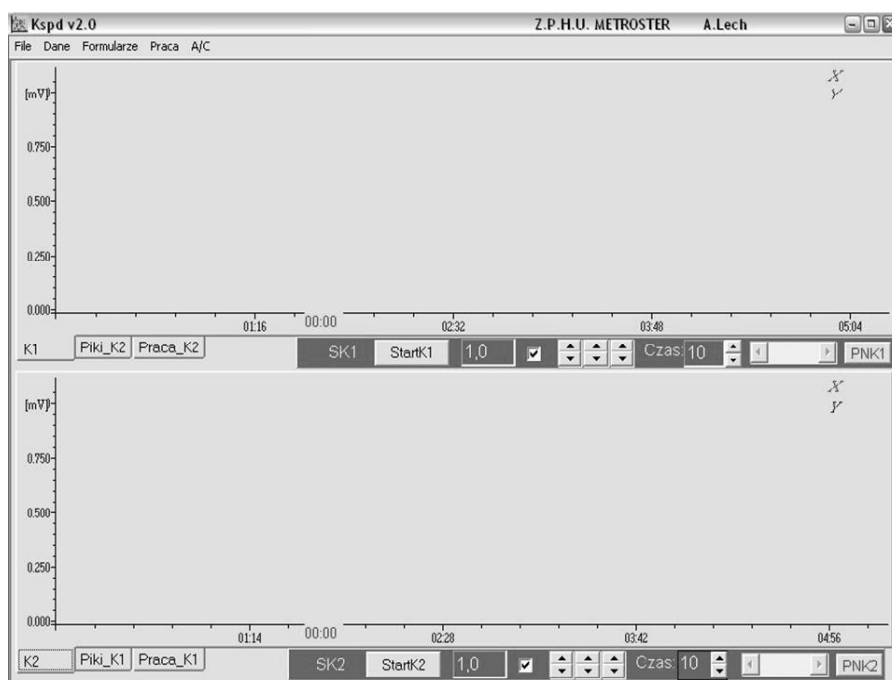
Rys. 2. Ilustracja sposobu podziału chromatogramu do wyznaczania izoterm adsorpcji metodą podziału piku
 (a) dzielenie całkowitej powierzchni adsorpcyjnej S_s na segmenty, gdzie S_{is} oznacza powierzchnię segmentu l ,
 (b) dzielenie całkowitej wysokości h piku adsorpcyjnego na segmenty, gdzie h_i oznacza wysokość segmentu

Fig. 2. (The method of dividing profile of chromatographic used for peak determination of adsorption isotherms by profile peak method;
 (a) the division of total adsorption area S_s for segments, where S_{is} is the part l of adsorption area,
 (b) the division of total height of adsorption peak h for segments, where h_i is the part of height of adsorption peak)

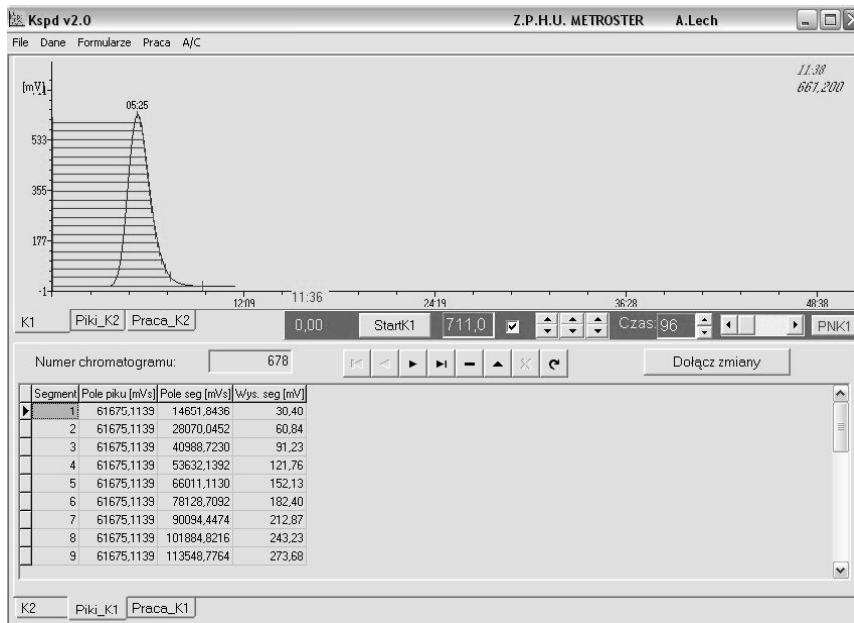
3. Program komputerowy system przetwarzania danych (The computer programme system of processing of data)

Program Komputerowy System Przetwarzania Danych KSPD [1] jest programem przeznaczonym do obróbki danych chromatograficznych. W jego skład wchodzi dwukanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy, program rejestracji sygnałów z przetwornika, którego zadaniem jest również podstawowa obróbka danych zarejestrowanych procesów oraz baza danych. Przetwornik analogowo-cyfrowy jest urządzeniem znajdującym się na zewnątrz komputera, wykorzystującym szeregowe łącze RS 232 do przesyłania danych. Program KSPD pracuje w środowisku Windows. Źródło programu zostało napisane w języku bazy danych Delphi firmy Borland. Program korzysta z mechanizmów zarządzania bazą danych i generatora raportów tej firmy stanowiący pakiet narzędziowy Delphi. Wszystkie dane, łącznie z przetworzoną postacią sygnału z chromatografu są pamiętane w tablicach danych w formacie Pradox. KSPD jest w dużej mierze bazą danych i to bazą, w której tablice mogą być swobodnie wykorzystywane do budowy własnych baz danych lub jako standardowe dane przetwarzane w innych programach np. Excel, Origin itp. Głównym oknem programu KSPD jest typowe okno formularza ukazującego się po uruchomieniu programu (rys. 3). Formularz

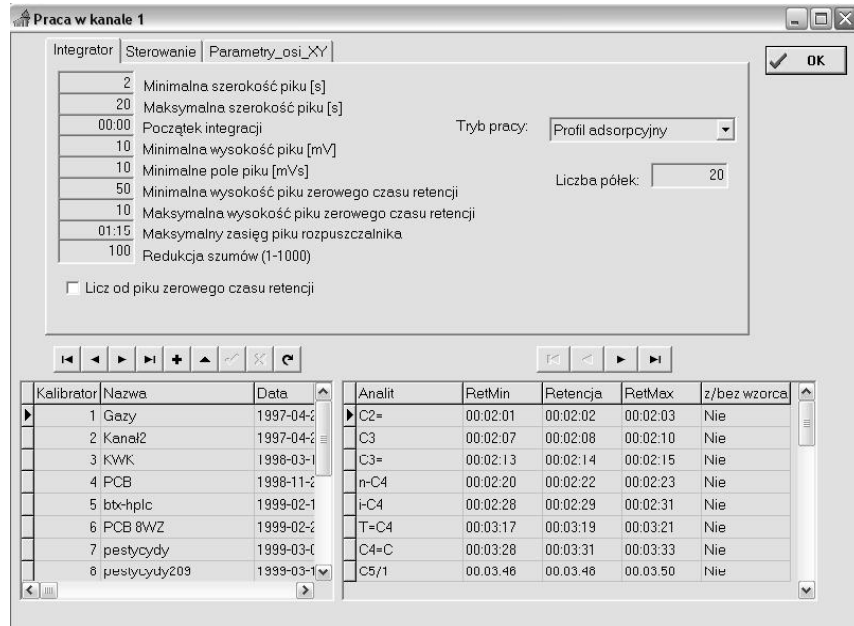
ten składa się z dwóch sekcji, z których każda jest związana z jednym kanałem pomiarowym. Na rysunku 4 przedstawiono okno tego programu z podzielonym pikiem oraz obliczonymi wartościami pola piku i pól poszczególnych segmentów powierzchni adsorpcyjnej. Program ten umożliwia wybranie liczby segmentów, na jakie może być podzielona powierzchnia adsorpcyjna. Liczbę podziału można wprowadzić w oknie *Liczba póltek*, przez otwarcie zakładki *Integrator* w polu wyboru trybu pracy integratora i wybraniu rodzaju pracy *Profil adsorpcyjny* (rys. 5).



Rys. 3. Główne okno programu KSPD
Fig. 3. Main window of KSPD programme



Rys. 4. Podział piku za pomocą programu KSPD
 Fig. 4. The dividing profile of chromatographic peak by KSPD programme



Rys. 5. Wybór liczby segmentów do podziału piku
 Fig. 5. The choice of number for dividing profile of chromatographic peak

4. Program Excel (Excel programme)

Excel jest najpopularniejszą aplikacją używaną do przetwarzania danych liczbowych. To program symulujący na ekranie komputera tzw. zeszyt, który jest standardowym dokumentem i składa się z arkuszy. Do komórek arkusza można wprowadzać dane w postaci liczb, tekstów i formuł obliczeniowych. Wprowadzane dane widoczne są zarówno w komórce aktywnej, jak i na pasku formuły. Przez formułę obliczeniową należy rozumieć zapis, który przy spełnieniu pewnych wymogów formalnych pozwala otrzymać w wybranej komórce wynik obliczeń zrealizowanych zgodnie z procedurą rachunkową wprowadzoną przez użytkownika. Procedura działa wykorzystując wartości liczbowe, które mogą być podane w sposób jawny (jako stałe) lub występować jako adresy komórek, w których zostały umieszczone wartości liczbowe. Excel posiada ok. 200 wbudowanych funkcji, które obejmują podstawowe zagadnienia matematyki, statystyki i logiki, operacje na tekstach i bazach danych. Możliwe jest także wykonywanie rozmaitych obliczeń fizykochemicznych [5]. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki podziału piku przeniesione z programu KSPD i obliczanie wielkości adsorpcji a_{ij} substancji i i ciśnienia parcjalego p_{ij} za pomocą programu Excel.

5. Program Origin (Origin programme)

W opisie wykonywania obliczeń całą procedurę postępowania przedstawiono zgodnie z instrukcją programu [6] i pracą [7]. Wszystkie polecenia procedur podawano zgodnie z angielskojęzyczną wersją programu.

Uruchomienie programu Origin powoduje otwarcie standardowego okna, które zawiera arkusz do wstawiania danych (rys. 7). Tak, jak w przypadku programu Excel, arkusz składa się z komórek ułożonych w kolumny oznaczone literami i wierszy oznaczonych liczbami. Wyniki pomiarów stopnia adsorpcji i prężności parcjalego adsorbatów wstawiono, jako dane programu Excel. Program Origin jest kompatybilny z programem Excel i zawiera odwołania do niego. Rozwinięcie opcji (*Analysis*) na pasku menu pozwala wybrać polecenie obliczenia metodą najmniejszych kwadratów (*Nonlinear least squares fitter*). Okno dialogowe wyboru równania (*Select function*) przedstawiono na rysunku 8. Należy wybrać polecenie (*Function*), rozwinąć jego pasek i wybrać opcję (*Edit function*), otwierając okno dialogowe przedstawione na rysunku 9. Do tego okna wpisuje się równanie Langmuira (5). Jako wartości stałe tego równania wpisuje się w pasku formuły (*Parameter names*) $K_{A,n}$, b stała równowagi adsorpcji adsorbentu, współczynnik potęgowy, współczynnik proporcjonalności, jako wartości niezależne (*Independent Variables*) p_A – ciśnienie parcjalego adsorbentu, a jako wartości zależne (*Dependent Variables*) r stopień pokrycia. W polu definicji (*Definition*) wpisano równanie (5), w polu formy wybrano rodzaj (*Equations*) i w polu nazwy wpisano *równanie Langmuira*. Przyciskając przycisk (*Save*) można zapisać po-

stać tego równania i wówczas przy kolejnych obliczeniach równanie to będzie dostępne w oknie dialogowym wyboru funkcji (rys. 8). Następnie otwiera się okno dialogowe programu - wybieranie danych do obliczeń (*Select Dataset*). To okno (rys. 10) służy do przyporządkowania niezależnym i zależnym wielkościom równania Langmuira (5) danych z arkusza (rys. 7), które wstawiono w oknie dialogu edycji funkcji (rys. 9). Przyporządkowanie polega na zaznaczeniu wybranej wielkości oraz zaznaczeniu wybranych danych i naciśnięciu przycisku (*Assign*). Przed wykonaniem właściwych obliczeń metodą najmniejszych kwadratów, można określić ilość cyfr znaczących w obliczanych stałych w równaniu i liczbę iteracji, otwierając okno dialogowe (*Control Parameters*). Na rysunku 11 przedstawiono to okno z zaznaczoną liczbą cyfr znaczących i liczbą iteracji. Jest możliwe także ograniczenie wielkości obliczanych stałych przez utworzenie przedziału wartości dopuszczalnych. Taki przedział tworzy się wstawiając dopuszczalne minimalne i maksymalne wartości (okno dialogowe *Parameter Constrains*, rys. 12). Stałą równowagi adsorpcji adsorbentu K_A , współczynnik potęgowy n i współczynnik proporcjonalności b oblicza się metodą najmniejszych kwadratów otwierając okno dialogowe (*Fitting Session*), zaznaczając pola wyboru (*Vary?*) i naciśnięciem przycisku (*10 Iter*). W oknach (*Value*) i (*Error*) zostają wyświetlone wyniki obliczeń (rys. 13), a w polu opisowym zostaje wyświetlony raport.

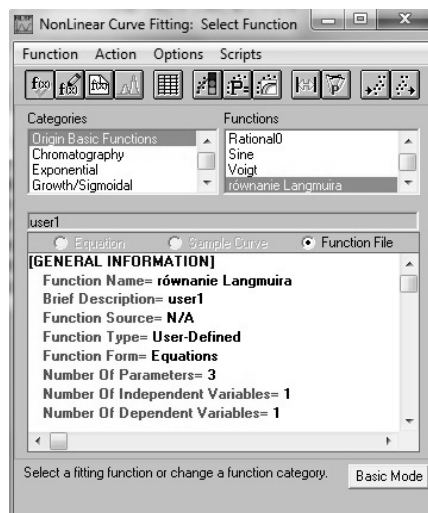
Segment	A_i [umol/g]	P_i [Pa]	Pole piku [mV/s]	Pole seg [mV/s]	a [s]	b [s]	δh [mV]	h [mV]	S_a [mV/s]	a_i [mmol/g]	P_i [Pa]	ΣS_a [mV/s]	Σh [mV]
1	0	0	6555,0822	1211,98350	380	478	1,862	1,862	798,798	1,97141E-07	0,000177834	798,798	1,862
2	0	0	6555,0822	2308,84328	325	380	3,717	1,856	653,8875	3,58518E-07	0,00035	1452,6855	3,717
3	0	0	6555,0822	3324,1962	286	325	5,551	1,834	560,287	4,96794E-07	0,00053016	2012,9725	5,551
4	0	0	6555,0822	4285,87812	259	286	7,396	1,845	502,7625	6,20874E-07	0,000706371	2515,735	7,396
5	0	0	6555,0822	5210,24488	236	259	9,25	1,864	458,865	7,34121E-07	0,000833441	2974,6	9,25
6	0	0	6555,0822	6097,78	212	236	11,089	1,839	411,936	8,35785E-07	0,01059079	3386,536	11,089
7	0	0	6555,0822	6963,11968	196	212	12,949	1,86	379,44	9,29429E-07	0,01236722	3765,976	12,949
8	0	0	6555,0822	7800,09116	180	196	14,787	1,836	345,544	1,01471E-06	0,01412264	4111,52	14,787
9	0	0	6555,0822	8611,00384	165	180	16,623	1,835	316,71	1,05287E-06	0,01597616	4428,23	16,623
10	0	0	6555,0822	9406,42188	149	165	18,48	1,857	291,549	1,16482E-06	0,01764972	4719,779	18,48
11	0	0	6555,0822	10181,74476	137	149	20,323	1,843	263,549	1,22987E-06	0,01940992	4983,328	20,323
12	0	0	6555,0822	10938,11136	125	137	22,165	1,842	241,302	1,26942E-06	0,02116916	5224,63	22,165
13	0	0	6555,0822	11651,08876	113	125	24,045	1,86	223,72	1,34463E-06	0,0229547	5449,35	24,045
14	0	0	6555,0822	12417,71944	98	113	25,864	1,819	191,5045	1,39199E-06	0,02470197	5640,2545	25,864
15	0	0	6555,0822	13127,72052	86	98	27,707	1,843	169,656	1,43384E-06	0,02646217	5808,8106	27,707
16	0	0	6555,0822	13828,75244	74	86	29,569	1,862	148,96	1,4706E-06	0,02824951	5958,7705	29,569
17	0	0	6555,0822	14521,31396	67	74	31,434	1,865	131,4825	1,50305E-06	0,03002172	6090,253	31,434
18	0	0	6555,0822	15192,26592	55	67	33,265	1,831	111,691	1,53062E-06	0,03177046	6201,944	33,265
19	0	0	6555,0822	15846,07964	39	55	35,112	1,847	86,809	1,55204E-06	0,03353447	6288,753	35,112
20	0	0	6555,0822	16470,44988	39	39	36,94	1,828	35,646	1,56804E-06	0,03528035	6324,399	36,94
n	4,464E-09	[mol]											
m	2,86	[g]											
F	26	[cm ² /s]											
T	423,15	[K]											
R	8314000	[cm ³ Pa/Kmol]											
SUMA Sp													

Rys. 6. Obliczanie wielkości adsorpcji a_{ii} substancji i i ciśnienia parcjale p_{ii} za pomocą programu Excel

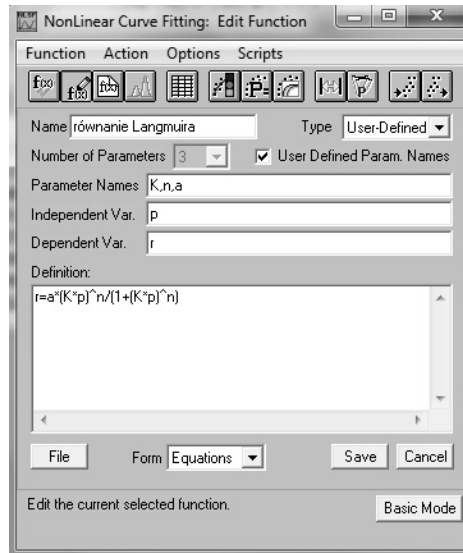
Fig. 6. The calculations of adsorption a_{ii} substance i and partial pressure p_{ii} by Excel programme

	A[X]	B[Y]	C[Y]	D[Y]	E[Y]	F[Y]	G[Y]	H[Y]	I[Y]
1	56307,1486	5067,07332	62,134	62,134	35944,519	2,08522E-6	1,39491E-6	35944,519	62,134
2	56307,1486	60547,0496	124,254	62,12	17393,6	3,09427E-6	2,78951E-6	53338,119	124,254
3	56307,1486	82999,4944	186,346	62,092	14001,746	3,90654E-6	4,18347E-6	67339,865	186,346
4	56307,1486	03626,7244	248,452	62,106	11955,405	4,6001E-6	5,57775E-6	79295,27	248,452
5	56307,1486	122965,905	310,653	62,201	10511,969	5,20992E-6	6,97417E-6	89807,239	310,653
6	56307,1486	41295,7272	372,802	62,149	9415,5735	5,75614E-6	8,36942E-6	99222,8125	372,802
7	56307,1486	58808,4139	434,997	62,195	8458,52	6,24684E-6	9,7657E-6	07681,3325	434,997
8	56307,1486	75589,4492	497,068	62,071	7572,662	6,68615E-6	1,11592E-5	15253,9945	497,068
9	56307,1486	91749,7035	559,184	62,116	6863,818	7,08433E-6	1,25537E-5	22117,8125	559,184
10	56307,1486	07327,1099	621,194	62,01	6263,01	7,44766E-6	1,39458E-5	28380,8225	621,194
11	56307,1486	22427,3157	683,415	62,221	5662,111	7,77613E-6	1,53427E-5	34042,9335	683,415
12	56307,1486	37079,8527	745,579	62,164	5035,284	8,06824E-6	1,67383E-5	39078,2175	745,579
13	56307,1486	251308,232	807,67	62,091	4563,6885	8,33299E-6	1,81322E-5	143641,906	807,67
14	56307,1486	265158,328	869,898	62,228	4107,048	8,57125E-6	1,95292E-5	147748,954	869,898
15	56307,1486	78639,7335	932,073	62,175	3606,15	8,78045E-6	2,09251E-5	151355,104	932,073
16	56307,1486	91707,6632	993,974	61,901	3095,05	8,96E-6	2,23147E-5	154450,154	993,974
17	56307,1486	04400,7568	1055,991	62,017	2604,714	9,11111E-6	2,3707E-5	157054,868	1055,991
18	56307,1486	16727,0074	1118,086	62,095	2173,325	9,23719E-6	2,51011E-5	159228,193	1118,086
19	56307,1486	28720,3318	1180,464	62,378	1621,828	9,33127E-6	2,65015E-5	160850,021	1180,464
20	56307,1486	40162,3975	1242,275	61,811	618,11	9,36713E-6	2,78891E-5	161468,131	1242,275
21									

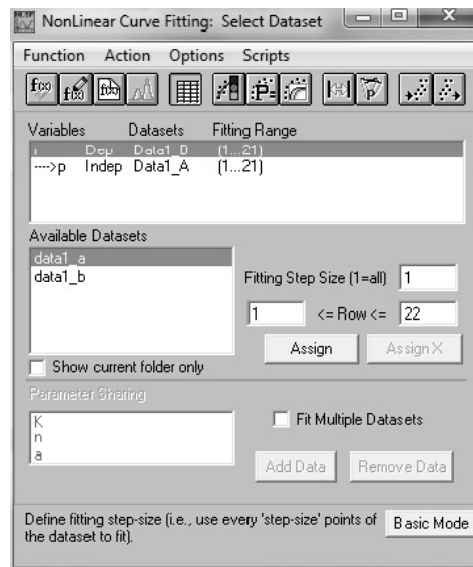
Rys. 7. Okno programu Origin z zamieszczonymi wynikami pomiarów adsorpcji
 Fig. 7. Window of Origin programme with the adsorption measurement data



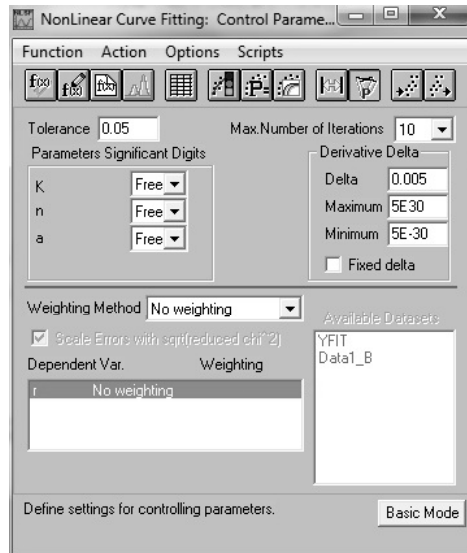
Rys. 8. Okno programu - wybór funkcji
 Fig. 8. Window of Origin programme – the selection of function



Rys. 9. Okno programu - wprowadzanie nowej funkcji
 Fig. 9. Window of Origin programme – the introduction of new function

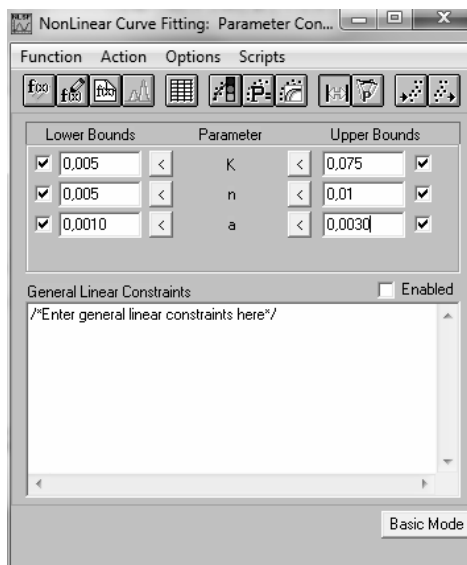


Rys. 10. Okno programu - wybieranie danych do obliczeń
 Fig. 10. Window of Origin programme – the selection of data of calculations



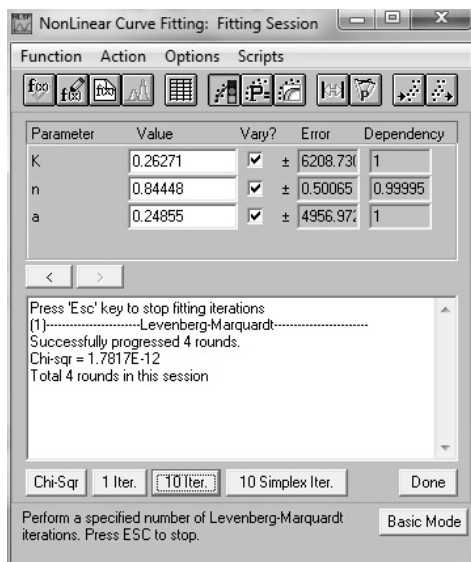
Rys. 11. Okno programu - określanie dokładności obliczeń

Fig. 11. Window of Origin programme – the determination of accuracy of calculations



Rys. 12. Okno programu – określanie przedziału wartości obliczanych parametrów

Fig. 12. Window of Origin programme – the determination of range of calculated parameters



Rys. 13. Okno programu – obliczanie stałej równowagi adsorpcji adsorbentu K_A , współczynnika potęgowego n , współczynnika proporcjonalności b metodą najmniejszych kwadratów
 Fig. 13. Window of Origin programme – the calculations of adsorption equilibrium constants K_A , power coefficient n , proportionality coefficient b by least-squares method

6. Przykład obliczeń (Example of calculations)

Jako przykład do obliczeń przedstawiono sposób wyznaczania izoterm adsorpcji o-ksylenu na sorbencie haloizytowym z kopalni Dunino.

Pomiary adsorpcyjne wykonano przy użyciu chromatografu gazowego 505 M sprzężonego z komputerem PC wyposażonym w przetwornik analogowo-cyfrowy i program KSPD. Przed pomiarami adsorpcji rurkę sorpcyjną zawierającą sorbent haloizytowy kondycjonowano w strumieniu azotu $10 \text{ cm}^3/\text{min}$, w temp. 195°C przez 24 godziny. Termostat rurki adsorpcyjnej utrzymywał zadaną temperaturę pomiaru $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Temperatura dozownika 160°C , temperatura detektora 160°C . Pomiary adsorpcji wykonano w temperaturze 180°C . Na Rysunku 14 przedstawiono przykład dopasowania krzywej wyrażonej przez równanie (5) do wyników pomiarów adsorpcji o-ksylenu.

7. Podsumowanie (Conclusions)

Pakiet programów komputerowych składający się z KSPD, Excela i Origin pozwala na szybkie opracowanie wyników. Możliwość przenoszenia danych pomiędzy programami z pakietu i przetwarzania ich za pomocą operacji, których nie posiada inny z programów pakietu zdecydowanie ułatwia pracę.

Praca finansowana z projektu nr 6/1/821/POKL 2009 „Stypendia naukowe dla doktorantów kierunków istotnych dla rozwoju regionu”

Literatura (Literature)

1. Lech, Program komputerowy KSPD, Metroster, Toruń, 1999.
2. S. Wigdegrauz, *Raztchety w gazovoj chromatografii*, Izd. Khimija, Moskwa, 1978.
3. P.M. Słomkiewicz, *Wyznaczanie stałych równowagi adsorpcji metodą inwersyjnej chromatografii gazowej*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, **9/2**(2004)109-117.
4. K. Czech, P.M. Słomkiewicz, *Wyznaczanie izoterm adsorpcji benzenu na adsorbentach mineralnych metodą inwersyjnej chromatografii gazowej* (w druku), materiały IX Konferencji Chromatograficznej, Poznań 2011.
5. W. Ufnalski, *Excel dla chemików...*, WNT, Warszawa, 2000.
6. Origin User's Manual, Microcal Software Inc. Northampton MA, USA, 1999.
7. P.M. Słomkiewicz, *Zastosowanie programu Origin do analizy regresyjnej wyników badań kinetyki reakcji katalitycznych*, Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, **9/1**(2004)6-12.



Projekt pn „Stypendia naukowe dla doktorantów kierunków istotnych dla rozwoju regionu”
współfinansowany ze środków Unii Europejskiej ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach
Programu Operacyjnego Kapitał Ludzi

