

Pomiary przepuszczalności fazowej i matematyczna ekstrapolacja otrzymanych wyników*

Józef Kruczek**, Piotr Such**

Pomiary przepuszczalności fazowych*** są najtrudniejszą pod względem wykonania i interpretacji oraz najbardziej kompleksową analizą petrofizyczną. Prawidłowe wykonanie pomiaru wymaga zachowania warunków przepływu laminarnego. Poprawna interpretacja otrzymanych wyników badań wymaga znajomości takich parametrów, jak:

— lepkości płynów badanych w danych warunkach,
— wielkości nasycień przestrzeni porowej poszczególnymi mediami,

— porowatości i przepuszczalności absolutnej badanej próbki oraz morfologii przestrzeni porowej.

Sam pomiar jest bardzo długi i żmudny, przy czym czas jego trwania, uwarunkowany szybkością uzyskania przepływu ustalonego, zależy od wielkości przepuszczalności absolutnej badanej próbki. Należy stwierdzić, że niemożliwe są seryjnie wykonywane pomiary dla wielu próbek, a jedyną możliwością określenia przepływów fazowych dla całych badanych profili jest matematyczna ekstrapolacja wyników analiz za pomocą odpowiedniego modelu. W niniejszej pracy zostaną omówione: posiadany przez Instytut Górnictwa Naftowego i Gazownictwa sprzęt analityczny, jego wady i zalety, występujące ograniczenia metodyczne oraz metoda ekstrapolacji wyników.

Podstawowe wzory i definicje

Podanie podstawowych definicji i pojęć, dotyczących problematyki przepuszczalności fazowych, wydaje się konieczne ze względu na dużą dowolność terminologiczną panującą w tej dziedzinie.

Prawo Darcy'ego opisuje przepływ płynu złożowego przez ośrodek porowaty wiążąc ze sobą wielkości przepływu z przyłożonymi ciśnieniami, lepkością płynu, geometrią przepływu i przestrzenią porową. Przestrzeń porowa jest w tym równaniu scharakteryzowana za pomocą przepuszczalności. W praktyce równanie to stosuje się do wyliczenia wartości przepuszczalności:

$$q = - \frac{C \cdot k \cdot A}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (1)$$

gdzie: q — wielkość przepływu, C — stała liczbowa, A — przekrój poprzeczny przepływu, μ — lepkość, $\Delta p/\Delta x$ — gradient ciśnienia, k — przepuszczalność. Wartość stałej C zależy od doboru jednostek.

Przepuszczalność absolutna — to przepuszczalność pomierzona dla przepływu płynu złożowego przez próbkę, przy 100% nasyceniu przestrzeni porowej tym płynem. Przepuszczalność absolutna jest dla danego ośrodka porowatego wielkością stałą, charakteryzującą ten ośrodek [4].

Przepuszczalność względna — to stosunek przepuszczalności wyliczonej przy danym nasyceniu płynem złożo-

wym do przepuszczalności absolutnej. Przepuszczalność względna jest wielkością bezwymiarową, zawierającą się w granicach od 0 do 1 [4].

Przepuszczalność fazowa — to przepuszczalność absolutna, pomnożona przez przepuszczalność względną [4].

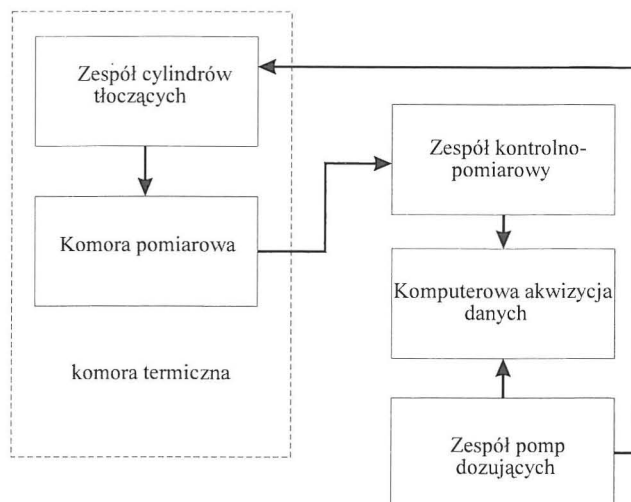
Stan ustalony przepływu charakteryzuje się stałymi ciśnieniami, przy stałym rozkładzie poszczególnych faz (płynów złożowych). W niektórych testach typu woda-ropa występują przepływy pseudoustalone, tym niemniej zmiany czasowe są na tyle wolne, że w reżimie pomiarowym możemy przepływy te traktować jak ustalone [4].

Mikroparametry — to wielkości określające morfologię przestrzeni porowej (promienie porów i ich kształty).

Makroparametry — to wielkości makroskopowe, charakteryzujące możliwości magazynowania i transportu płynów przez ośrodek porowaty (porowatość, przepuszczalność).

Aparatura badawcza

Instytut Górnictwa Naftowego i Gazownictwa zakupił uniwersalny zestaw pomiarowy, pozwalający na wykonywanie w warunkach laboratoryjnych wszystkich testów i analiz potrzebnych w pracach geologicznych i inżynierii złożowej. Najbardziej uniwersalny okazał się zestaw amerykańskiej firmy TEMCO, która — wykorzystując modułową budowę swoich aparatów — wykonała zestaw spełniający wszystkie stawiane warunki. Ideowy schemat aparatu przedstawiono na ryc. 1. Umożliwia on pracę w symulowanych warunkach złożowych (temperatura, ciśnienie) przy użyciu oryginalnych płynów złożowych, takich jak solanka, ropa, gaz. Zestaw ten umożliwia, dzięki wymiennym komórkom próbkowym i dopasowanym do nich systemom zasilania-



Ryc. 1. Schemat blokowy zestawu firmy TEMCO

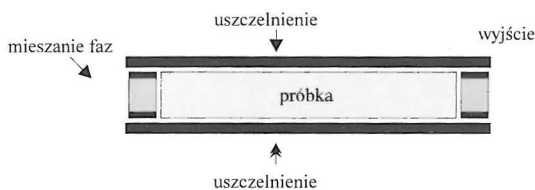
***Opisane metody analityczne i modele matematyczne ekstrapolacji danych będą stosowane w analizie basenów sedymentacyjnych (ABS). Ważne, aby środowisko geologiczne dokładnie zapoznało się z tą problematyką (redakcja).

*Praca finansowana ze środków projektu badawczego nr 9S60203106 *Metodyka pomiaru i interpretacja krzywych przepływów fazowych skał zbiornikowych dla ropy naftowej i gazu ziemnego.*

**Instytut Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, ul. Lubiesz 25a, 31-503 Kraków

nia płynami złożowymi, pomiar przepuszczalności względnych (czy fazowych) oraz wykonanie wszystkich typów przyodwiertowych testów inżynierii złożowej. Przy testach inżynierskich jako płynów badawczych można używać płuczek i roztworów służących do kwasowania skał zbiornikowych.

Geologiczne zastosowania tego aparatu — to pomiary przepuszczalności względnych woda–gaz i woda–ropa, badania ilości wody nieredukowalnej w skale oraz badania określające współczynniki szczypania. Schemat komory próbkowej, służącej do tego typu badań zamieszczono na ryc. 2. Wejście do komory próbkowej jest zbudowane tak, by zapewnić odpowiednie mieszanie się faz. Wyjście powinno zapewniać minimalizację efektów brzegowych. Producent przygotował dwa rodzaje wejścia i wyjścia. Pierwsze wykonane z piaskowca Borea, drugie wykonane ze stali. Piaskowiec Borea chroni aparat przed zanieczyszczeniem porywanymi przez płyny złożowe cząstkami skały i dobrze rozprowadza płyny na wejściu. Wyjście i wejście stalowe minimalizuje spadki ciśnienia i zapewnia mniejsze opory przepływu płynów. Rodzaj materiału stosowanego przy pomiarach zależy od rodzaju badanego rdzenia.



Ryc. 2. Schemat komory pomiarowej do badań przepuszczalności względnych

Zasada pomiaru

Pomiar polega na ustaleniu warunków przepływu poszczególnych faz przez badaną próbkę i zastosowaniu prawa Darcy'ego dla każdej fazy do tak ustalonych parametrów. Zmieniając wzajemne proporcje wielkości przepływu poszczególnych faz, otrzymujemy kolejne, doświadczalne punkty krzywych przepuszczalności względnych. Pomiary przepuszczalności względnych woda–ropa i woda–gaz, jeśli mają dać poprawne wyniki, wymagają zupełnie odmiennego podejścia do sposobu wykonania analizy.

Pomiary przepuszczalności względnych typu woda–ropa

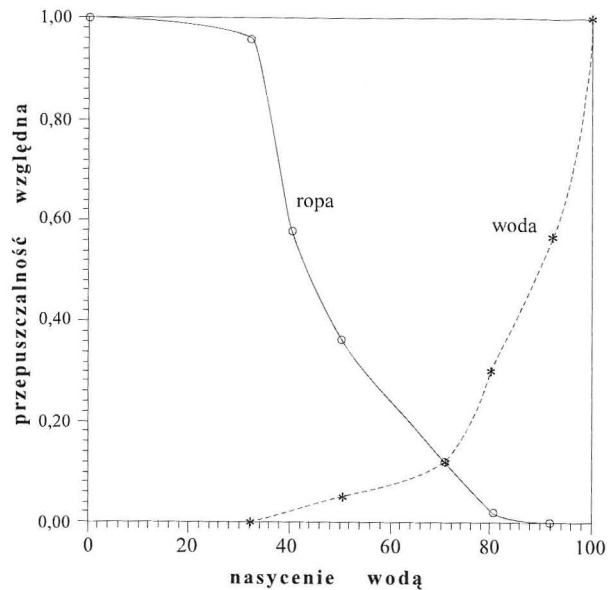
Przy badaniach tego typu mamy do czynienia z płynami nieściśliwymi. Podstawowym parametrem zmieniającym się z ciśnieniem i temperaturą będzie lepkość badanej ropy. Lepkość wody zmienia się w znacznie mniejszym zakresie. Oczywiście zarówno lepkość, jak i wielkość napięcia międzyfazowego zmieniają się w funkcji temperatury i ciśnienia, a zmiany te muszą być uwzględnione w obliczeniach. Ilość płynów wstrzykiwanych do próbki jest określana przez precyzyjne pompy dozujące i uzyskanie zarówno odpowiedniej proporcji płynów, jak i zachowanie stałego łącznego wydatku nie stanowi problemu. Ustala się całkowity przepływ przez próbkę (należy sprawdzić laminarność przepływu) i zmienia się proporcje przepływających płynów np. co 10%, począwszy od 100% wody aż do osiągnięcia 100% przepływu ropy. Dla każdego badanego punktu doprowadzamy do przepływu ustalonego. Następnie określamy nasycenie próbki poszczególnymi fazami i rozwiązujemy równanie Darcy'ego dla każdej fazy. Dla zastosowanej

w aparacie TEMCO liniowej geometrii pomiaru jest to równanie:

$$q = \frac{C \cdot k \cdot A}{\mu} \cdot \frac{p_2 - p_1}{L} \quad (2)$$

gdzie: $p_2 - p_1$ — różnica ciśnień na wejściu i wyjściu, L — długość próbki.

Otrzymane wyniki nanosi się na wykres typu przepuszczalność względna dla danej fazy w funkcji nasycenia próbki wodą. Przykład tego typu krzywej przedstawiono na ryc. 3.



Ryc. 3. Krzywe przepuszczalności względnych; pomiar woda–ropa; przepuszczalność absolutna = 80mD

Pomiary typu woda–gaz

Przy pomiarach tego typu mniej istotne są zmiany lepkości płynów złożowych czy napięć międzyfazowych, które dla wody i gazu zmieniają się w znacznie mniejszym zakresie niż dla ropy, natomiast podstawowym parametrem jest w tym przypadku ściśliwość gazu. Dla geometrii liniowej pomiaru, dla stanu ustalonego otrzymujemy:

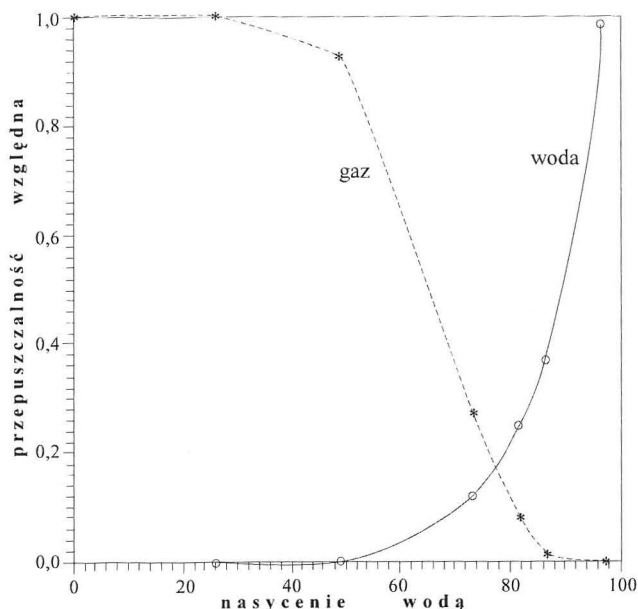
$$q_r = \frac{C \cdot k \cdot A \cdot (p_2^2 - p_1^2)}{T \cdot z \cdot \mu \cdot L} \quad (3)$$

gdzie: q_r — wydatek w warunkach normalnych, T — temperatura, z — współczynnik odchylenia.

Równanie to pozwala odnieść ilość gazu, który przepływa przez próbkę do warunków normalnych i w ten sposób znormalizować pomiary przepuszczalności fazowych. W złożach gazu mamy do czynienia przeważnie z przepływami nieustalonymi lub z przepływami pseudoustalonymi. W warunkach pomiaru laboratoryjnego możemy mówić o przepływach ustalonych gaz–woda. W IGNiG powstał program numeryczny [1], wyliczający współczynnik nadściśliwości „ z ” dla zadanego składu gazu. Krzywą przepuszczalności względnych dla pomiaru typu woda–gaz zamieszczono na ryc. 4.

Ograniczenia metody i badania metodyczne

Zestaw firmy TEMCO został zakupiony w połowie 1994 roku. Po uruchomieniu zestawu rozpoczęto normalne prace analityczne, przy czym starano się dobierać w pierwszym okresie próbki o różnych właściwościach petrofizycznych. W



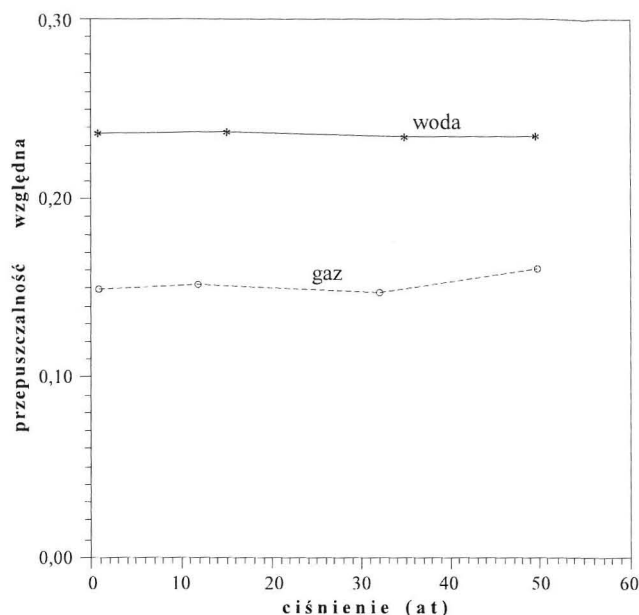
Ryc. 4. Przepuszczalności względne dla piaskowca miocenińskiego; pomiar woda-gaz

pracy [5] opublikowano wyniki badań przepuszczalności fazowych woda-ropa dla związanej próbki o niskiej przepuszczalności. Dla tego typu próbek jedynym problemem jest długi czas wykonania analizy — dochodzący do tygodnia. Dla próbek innych typów pojawiają się nowe ograniczenia metodyczne.

Pierwszym, dość oczywistym ograniczeniem, jest — podobnie jak przy oznaczaniu przepuszczalności absolutnej — niemożność wycięcia próbek dla słabo związanych rdzeni. Część słabo związanych rdzeni zostaje zniszczona już w komorze pomiarowej przy kontakcie z przepływającą solanką.

Wzmiankowane przyczyny uniemożliwiają wykonanie analiz, prowadzą bowiem do zniszczenia próbek. Dla części próbek, które nie zostają zniszczone, nie można wykonać pomiarów w symulowanych warunkach złożowych i przy wykonywaniu krzywych przepuszczalności względnych zachodzi konieczność rezygnacji z wykonania pomiaru przy zakładanym ciśnieniu złożowym. Dotyczy to próbek o dużej i bardzo dużej przepuszczalności absolutnej, praktycznie piaskowców, z których w trakcie testu pomiarowego odrywają się ziarna skały i zostają zabrane wraz z przepływającymi płynami. Ziarna te, osadzając się na membranie urządzenia ustalającego ciśnienie, niszczą ją praktycznie po zakończeniu analizy każdego punktu pomiarowego krzywych przepuszczalności względnych. Wejścia i wyjścia z komory próbkowej wykonane z piaskowca Borea zapobiega wynoszeniu ziaren z komory próbkowej, ale sam piaskowiec staje się czynnikiem odpowiedzialnym za większość oporów przepływu. Z tego typu problemem zetknięto się przy pomiarach solanka-gaz dla przepuszczalnych piaskowców miocenijskich. Po zniszczeniu wielu diafragm, zdecydowano się na wykonanie badań sprawdzających możliwości wykonania oznaczeń typu woda-gaz bez uzyskiwania ciśnienia złożowego. Otrzymane wyniki zamieszczono na ryc. 5. Widać że analizy takie dają poprawne wyniki, pod warunkiem zachowania reżimu przepływu laminarnego przez próbkę. Im niższe ciśnienia stosowane przy analizie, tym trudniej utrzymać ten warunek.

Biorąc pod uwagę wymogi aparaturowe, analizy typu woda-ropa są znacznie łatwiejsze i mniej podatne na błędy systematyczne.



Ryc. 5. Zależność wyliczonej wartości przepuszczalności względnej od ciśnienia wyjściowego

Model matematyczny

W poprzednich rozdziałach opisano metodykę pomiaru i trudności w poprawnym wykonaniu analizy. Jeśli do tego dodać konieczność wyjmowania badanej próbki z komory pomiarowej po analizie każdego punktu krzywej ciśnień kapilarnych i oznaczanie jej nasycenia płynami złożowymi, staje się oczywiste, że tego typu analizy mogą być wykonywane dla ograniczonej liczby próbek. Jeśli chcemy otrzymać wyniki ekstrapolować na cały profil wierceń, potrzebne są wyniki badań ciśnień kapilarnych (a te można wykonywać seryjnie) i odpowiedni model matematyczny.

Zaproponowany model matematyczny, opisujący przepływ płynów złożowych przez ośrodek kapilarny, powinien być na tyle prosty, by bez kłopotów można się było nim posługiwać, i na tyle fizyczny, by dawał poprawne przewidywania wyników. Powinien wiązać ze sobą oznaczane w laboratorium mikro- i makroparametry, a zwłaszcza badania ciśnień kapilarnych z badaniami przepuszczalności względnych.

Ciśnienia kapilarne w ośrodku porowatym

W badaniach porozymetrycznych przyjmuje się powszechnie walcowy model przestrzeni porowej, umożliwiający powiązanie ciśnień kapilarnych z odpowiadającymi im promieniami porów przy pomocy równania Washbourne'a [2]. Końcowym rezultatem analizy porozymetrycznej jest więc przejście od badanych w trakcie analizy nasycień do rozkładu promieni porów w badanym ośrodku.

Gdy liczbę porów o promieniach zawartych pomiędzy R i $R+dR$ znaczymy jako $\delta(R)dR$, wtedy znormalizowana do jedności dystrybuanta będzie miała postać:

$$\int \delta(R)dR = 1 \quad (4)$$

Całkowita wielkość przekroju poprzecznego dla wszystkich promieni równa będzie:

$$A \cdot Por = N \cdot \int_0^{\infty} \pi R^2 \delta(R)dR = N\pi \bar{R}^2 \quad (5)$$

gdzie: A — poprzeczny przekrój rdzenia, Por — porowatość, N — całkowita liczba porów.

Objętość porów dla rdzenia o długości L wyliczamy mnożąc równanie (5) przez L .

Z teorii Washbourne'a wynika, że dla danego ciśnienia kapilarnego, dla stanu równowagi, faza zwilżająca wypełnia wszystkie pory mniejsze od odpowiadającego temu ciśnieniu promienia R :

$$p_{kap}(S) = (2\sigma \cos(\theta))/R \quad (6)$$

gdzie: S — nasycenie fazą zwilżającą.

Nasycenie przestrzeni porowej wynosi wtedy:

$$S = \frac{\int_0^R \pi R^2 \delta(R) dR}{\int_0^\infty \pi R^2 \delta(R) dR} \quad (7)$$

Eliminując S z równania (7), za pomocą równań (5) i (6), otrzymujemy:

$$\delta(R) = \frac{2\sigma \cos(\theta) R^2}{R^4} \cdot \left(\frac{dp_{kap}}{dS} \right)^{-1} \quad (8)$$

dp_{kap}/dS jest liczone dla warunku Washbourne'a, wartość przeciętną R wyliczamy z równania normalizacyjnego $\delta(R)$.

Przepuszczalności względne

Wykorzystując walcowy model przestrzeni porowej, powiązано ciśnienia kapilarne z rozkładem promieni porów oraz porowatością i nasyceniem przestrzeni porowej. Model ten będzie podstawą do powiązania krzywych ciśnień kapilarnych z krzywymi przepuszczalności względnych. Dodatkowym elementem będzie wprowadzenie współczynnika krętości dla porów w badanym ośrodku, zależnego od promienia porów.

Z równania Darcy'ego i Poiseuille'a określa się przepuszczalność w rurze, której ścianki nie są regularne jako:

$k = k(R) = R^2/(8\rho(R))$, gdzie $\rho(R)$ — współczynnik krętości (nierównomierności).

Wielkość przepływu we wszystkich tubach kapilarnych zawartych między R i $R+dR$ wynosi:

$$dQ = \pi R^2 \frac{R^2 N \delta(R) dR}{8\rho(R)\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (9)$$

Dla wszystkich porów o promieniach mniejszych od R , całkowity przepływ otrzymamy całkując wzór (9) po promieniach od 0 do R . Wstawiając otrzymany wynik do wzoru Darcy'ego otrzymamy dla fazy zwilżającej:

$$k_w = \frac{Q_w L \mu_w}{A \Delta p} = \frac{N}{A} \cdot \int_0^R \frac{\pi R^4 \delta(R) dR}{8\rho(R)} \quad (10)$$

Zmieniając zmienną pod całką z dR na dS , otrzymujemy:

$$dS = \frac{\pi R^2 \delta(R) dR}{A P_{or}} \quad (11)$$

i przepuszczalność dla fazy zwilżającej:

$$k_w = P_{or} \cdot \int_0^R \frac{R^2 dS}{8\rho(R)} \quad (12)$$

Parametryzując współczynnik krętości $\rho(R) = a/R^\alpha$ i przechodząc od zmiennych R do S , otrzymamy:

$$k_w = \frac{(2\sigma \cos(\theta))^{(2+\alpha)}}{8a} \cdot P_{or} \cdot \int_0^S \frac{dS}{(p(S))^{(2+\alpha)}} \quad (13)$$

Analogiczne równanie można napisać dla drugiej fazy

oraz dla przepływu jednofazowego i wykorzystując je otrzymać wzory na przepuszczalności względne. Przepuszczalność względna dla wody będzie miała postać:

$$k_{w_w} = \frac{k_w}{k} = \frac{\int_0^S (dS/p)^{2+\alpha}}{\int_0^1 (dS/p)^{2+\alpha}} \quad (14)$$

Wprowadzony powyżej, prosty model matematyczny [5, 6, 3] pozwolił powiązać ze sobą wszystkie parametry, które wyznacza się w badaniach laboratoryjnych.

Ekstrapolacja wyników badań przepuszczalności względnych

Badania przepuszczalności względnych są bardzo czasochłonne i drogie, toteż konieczność określenia możliwości transportu płynów dla pełnego profilu wiercen narzuca konieczność ekstrapolowania otrzymanych krzywych doświadczalnych przepuszczalności względnych.

Sposób ekstrapolacji wynika bezpośrednio z przedstawionego w poprzednim rozdziale modelu matematycznego. Kolejne kroki można określić następująco:

— wyznaczenie dla wszystkich badanych próbek z danego profilu krzywych ciśnień kapilarnych oraz porowatości i przepuszczalności absolutnych,

— podział otrzymanych krzywych ciśnień kapilarnych na grupy utworzone ze względu na podobieństwo kształtu (czyli dla takiej samej dystrybucji rozkładu promieni porów),

— wykonanie dla najbardziej typowej próbki w utworzonych grupach oznaczeń krzywych przepuszczalności względnych i następnie:

a) w przypadku identyfikacji krzywych porozymetrycznych (tj. takiego samego kształtu, takiej samej wartości promienia progowego i takiego samego efektu histerezy), również krzywe przepuszczalności względnych będą identyczne,

b) jeśli nie można mówić o identyfikacji kształtu, do oznaczonych doświadczalnie krzywych przepuszczalności względnych dopasowujemy krzywe teoretyczne (wzór 14), w celu wyliczenia wartości a (ewentualnie również dopasowujemy stałą a) i za jej pomocą wykreślamy krzywe teoretyczne dla pozostałych próbek.

Prace nad odpowiednim modelem ekstrapolacji zostały dopiero rozpoczęte. Zebranie odpowiedniej bazy danych doświadczalnych pozwoli na zweryfikowanie i ewentualne modyfikacje przyjętego modelu matematycznego.

L i t e r a t u r a

- 1 BUDAK P., SZPUNAR T. 1993 — Opis numerycznego programu „z”. Praca nie publ. Arch. IGNiG.
- 2 DE WIEST R.J.M. 1969 — Flow through Porous Media. New York.
- 3 SERCOMBE W.J. 1993 — Performance of Lower — Porosity Nugget Reservoirs..., Amoco Thrust Belt and Foreland Basin Studies, AMOCO Poland Limited.
- 4 SLIDER H.C. 1976 — Practical Petroleum Reservoir Engineering Methods. Petroleum Publishing Company, Tulsa.
- 5 SUCH P. 1994 — Mat. symp. IGNiG. Badania geochemiczne i petrofizyczne w poszukiwaniach ropy naftowej i gazu ziemnego. Balice k. Krakowa. Wyd. IGNiG.
- 6 ZAWISZA L. 1989 — Arch. Górn., 34: 638–702.