

Kazimierz Twardowski*, Jacek Traple*

**WPLYW KOMPAKCJI
NA WLAŚCIWOŚCI ZBIORNIKOWO-FILTRACYJNE
SKAŁ MIOCENU PRZEDGÓRZA KARPAT****

1. WSTĘP

Właściwości fizyczne głęboko zalegających skał, w szczególności skał zbiornikowych będących obiektem zainteresowania m.in. górnictwa naftowego, hydrogeologii i geotermii, w sposób istotny uzależnione są od efektów ich kompaktacji [14]. Przy tym efekty te związane są z nakładaniem się geometrycznych przeobrażeń skał wynikających z kompaktacji mechanicznej oraz ich zmian mineralogicznych warunkowanych kompaktacją chemiczną. Zakres tych przeobrażeń istotnie zależy od pierwotnego składu osadu oraz warunków jego depozycji, a następnie diagenety.

Kompaktacja mechaniczna, polegająca na zmianach geometrycznych wynikających z grawitacyjnego nacisku na utwór geologiczny, powoduje przede wszystkim reorientację i zagęszczenie upakowania materiału detrytycznego, co skutkuje wzrostem jego gęstości objętościowej, redukcją miąższości warstw oraz pogorszeniem ich właściwości zbiornikowo-filtracyjnych, tj. zmniejszeniem odkrytej porowatości i absolutnej przepuszczalności. W pracach [2, 14] przedstawiono dla porowatych skał osadowych model matematyczny opisujący nieodwracalne zmiany ich porowatości z głębokością. Dobra zgodność uzyskiwanych wyników modelowania z danymi empirycznymi świadczy o jego metodycznej poprawności w odniesieniu do procesu mechanicznej kompaktacji skał.

Przebiegająca równolegle kompaktacja chemiczna skał, prowadząca do diagenetycznych przeobrażeń mineralogicznych, polega przede wszystkim na rozpuszczaniu i redystrybucji pierwotnych składników geologicznego utworu [6, 11]. Zasadniczo związana jest z rozpuszczaniem ziaren mineralnych wzdłuż ich kontaktów pod wpływem pionowego ciśnienia geostatycznego; może również działać horyzontalnie w obrębie basenów aktywnych tektonicznie. Ukierunkowana kompaktacja chemiczna może wyznaczać kierunki migracji

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań statutowych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

płynów porowych. Nie zawsze ma istotny wpływ na redukcję porowatości i przepuszczalności skał, gdyż składniki rozpuszczonych ziaren mogą zostać osadzone w ich bliskim sąsiedztwie. Za katalizator przyspieszający reakcję rozpuszczania pod ciśnieniem uważana jest substancja organiczna, natomiast za czynniki utrudniające ten proces – wcześniejsza intensywna cementacja utworu oraz znaczna zawartość ilastej substancji matriks.

Procesy diagenetycznego rozpuszczania mają istotny wpływ na fizyczne właściwości skał, a zwłaszcza ich porowatość, prowadząc do tworzenia się porów wtórnych, m.in. wewnątrzziarnowych. Procesom tym poddają się detrytyczne składniki skalne, do których należą podstawowe minerały skałotwórcze, jak również niektóre minerały ilaste. Roztwory o odczynie alkalicznym rozpuszczają również cementy, zwłaszcza kwarcowe, natomiast roztwory kwaśne oddziałują przede wszystkim na węglanowe składniki skał. Szczególnie ważne jest rozpuszczenie pospolitych w skałach cementów kalcytowych, skutkujące tworzeniem się wtórnych porów międzyziarnowych.

Z innych diagenetycznych procesów kompaktacji chemicznej skał wymienić można cementację, neomorfizm oraz przeobrażenia i zastępowanie minerałów [6, 11].

Cementacja diagenetyczna skał polega na krystalizacji nowych składników spoiw z roztworów porowych.

Neomorfizm obejmuje procesy rekrystalizacji minerałów i ich przeobrażeń polimorficznych, czego pospolitym przykładem są przemiany chalcedonu w kwarc oraz aragonitu w kwarcyt.

Przeobrażenia diagenetyczne dotyczą procesów tworzenia nowych faz mineralnych kosztem innych, czego przykładem są przeobrażenia skaleni i łuszczyków w minerały ilaste, czy smektytów w minerały mieszanopaketowe illit/smektyt oraz w illit. Sposób wykształcenia nowych faz mineralnych ma ogromne znaczenie dla kształtowania się właściwości filtracyjno-zbiornikowych skał.

Diagenetyczne zastępowanie minerałów należy do grupy procesów metasomatycznych, polegających na zastępowaniu ziaren detrytycznych budujących piaskowce i zlepińce przez cementy. Ich działanie ma duże znaczenie, gdyż częściowo, a czasem nawet całkowicie doprowadza do redukcji porowatości i przepuszczalności skał.

Najnowsze badania dotyczące głęboko zalegających (do 4,5 km) różnowiekowych piaskowców wykazują, że o ich właściwościach zbiornikowo-filtracyjnych, w szczególności porowatości, decydują przede wszystkim przeobrażenia związane z ich mechaniczną kompaktacją oraz diagenetyczną cementacją [4, 7, 14].

2. BADANIE ZALEŻNOŚCI WŁAŚCIWOŚCI ZBIORNIKOWO-FILTRACYJNYCH SKAŁ OD GŁĘBOKOŚCI

2.1. Uwagi ogólne

Badanie wpływu procesów kompaktacji na właściwości zbiornikowo-filtracyjne skał zrealizowano na podstawie danych ilościowych charakteryzujących utwory autochtonicznego miocenu Przedgórze Karpackiego [10, 12]. Na obszarze polskiej części Przedgórze utwory miocenu zalegają na głębokościach sięgających do ok. 4200 m, zaś ich miąższość

zmienia się w szerokich granicach, od kilku metrów w północnych rejonach brzeżnych do ok. 3500 m w rejonie tzw. Rowu Wielkich Oczu.

Ogólnie wiadomo, że na profil utworów miocenu autochtonicznego składają się iłowce margliste, mułowce z dużą ilością muskowitu, piaskowce drobnoziarniste, słabo spojone lepiszczem ilasto-wapiennym oraz podobne piaski o ziarnie drobnym lub bardzo drobnym. Cała seria jest dobrze warstwowana, rytmiczna i wykazuje dość dobrą selekcję materiału. Grubość wkładek piaszczystych jest bardzo zróżnicowana. Obok milimetrycznych lamin, głównie w części wschodniej zapadliska, spotyka się warstwy piaskowca o miąższości kilku, kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu metrów.

Średnie zapiaszczenie omawianych utworów zmienia się od bardzo niskich wartości we wschodniej części zapadliska ($7\pm 20\%$), do ponad 40% w części zachodniej i w obrębie tak zwanej wyspy rzeszowskiej.

Właściwości fizyczne skał miocenu, w szczególności skał zbiornikowych, cechują się również dużą zmiennością [10]. I tak gęstość objętościowa zmienia się w granicach od ok. 1,6 do ok. 3,0 g/cm³, współczynnik porowatości efektywnej zbliżony do współczynnika porowatości odkrytej [13], osiąga wartości do ponad 41%, współczynnik przepuszczalności absolutnej, przyjmuje wartości do prawie 7 D (ponad 6 940 mD), zawartość węglanów niezależnie od formy ich występowania zmienia się praktycznie od 0 do prawie 49%.

Analizę ilościową zależności właściwości zbiornikowo-filtracyjnych skał miocenu Przedgórze Karpat od głębokości ich zalegania oparto na wynikach oznaczeń laboratoryjnych współczynników porowatości K_p i przepuszczalności K_{pr} próbek skał z rejonu Przemyśla [12]. Dane laboratoryjne w ilości ok. 2300 oznaczeń porowatości oraz ok. 850 oznaczeń przepuszczalności udostępnione zostały przez ówczesne Przedsiębiorstwo Poszukiwań Nafty i Gazu w Jaśle. Dotyczyły one serii miocenu o miąższości ok. 3500 m zalegającego na głębokościach od ok. 500 m do ok. 4000 m. W trakcie ilościowej analizy danych laboratoryjnych określano interwałowe oceny podstawowych charakterystyk statystycznych badanych parametrów w odniesieniu do poszczególnych interwałów głębokościowych o miąższości 200 m, na jakie rozbito cały przedział obserwowanych głębokości. Przy czym należy tu wspomnieć, że głębokości poboru rdzeni były odnoszone względem stałego poziomu +300 m n.p.m., w celu wyeliminowania wpływu morfologii terenu.

2.2. Zależność porowatości i przepuszczalności skał od głębokości

W trakcie statystycznej analizy danych laboratoryjnych dla poszczególnych interwałów głębokościowych obliczano według ogólnie przyjętych zasad m.in. oceny statystycznych wartości średniej lub oczekiwanej \bar{X} oraz odchylenia standardowego S_x . Zgodność rozkładu empirycznego z rozkładem normalnym sprawdzano przy pomocy przybliżonej metody momentów [10]. W przypadku odrzucenia hipotezy zerowej powtarzano całą procedurę obliczeniową, operując wartościami logarytmów naturalnych zmiennych losowych $X - \ln X$. Brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej pozwalał wówczas uznać empiryczny rozkład zmiennej X za logarytmiczno-normalny.

Przy analizie współczynników przepuszczalności K_{pr} , które często posiadały wartości zerowe lub zbliżone do zera, aby uniknąć przypadków nieoznaczoności, posługiwano się logarytmami wartości $(K_{pr}+1)$, a następnie do obliczonych ocen parametrów statystycznych wprowadzano odpowiednie poprawki.

Biorąc pod uwagę fakt, że wszystkie analizowane statystyki mają asymptotycznie rozkłady normalne, granice przedziałów ufności dla poszczególnych wielkości Y określano na poziomie ufności 0,95, na podstawie zasady:

$$Y \pm 1,96S_Y \cong Y \pm 2S_Y \quad (1)$$

Rezultaty statystycznej analizy oznaczeń laboratoryjnych K_p i K_{pr} przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Otrzymane wyniki świadczą, że współczynnik porowatości efektywnej cechuje się typem rozkładu który można przybliżyć rozkładem normalnym, zaś rozkład wartości współczynnika przepuszczalności K_{pr} można uznać za zbliżony do rozkładu logarymiczno-normalnego.

Uzyskane wyniki dotyczące porowatości skał (rys. 1) generalnie potwierdzają uwagi i wnioski prezentowane w pracach [4, 14].

Kompakcji zarówno mechanicznej, jak i chemicznej, ulegają w określonym stopniu wszystkie utwory geologiczne, jednak w zależności od charakteru litologicznego ich podatność na wpływ kompaktacji i jej skutki są różne.

Kompaktacja utworów piaszczystych powoduje stosunkowo niewielką utratę porowatości (i zazwyczaj także przepuszczalności), zaś ich deformacje są w znacznym stopniu sprężyste (odwracalne).

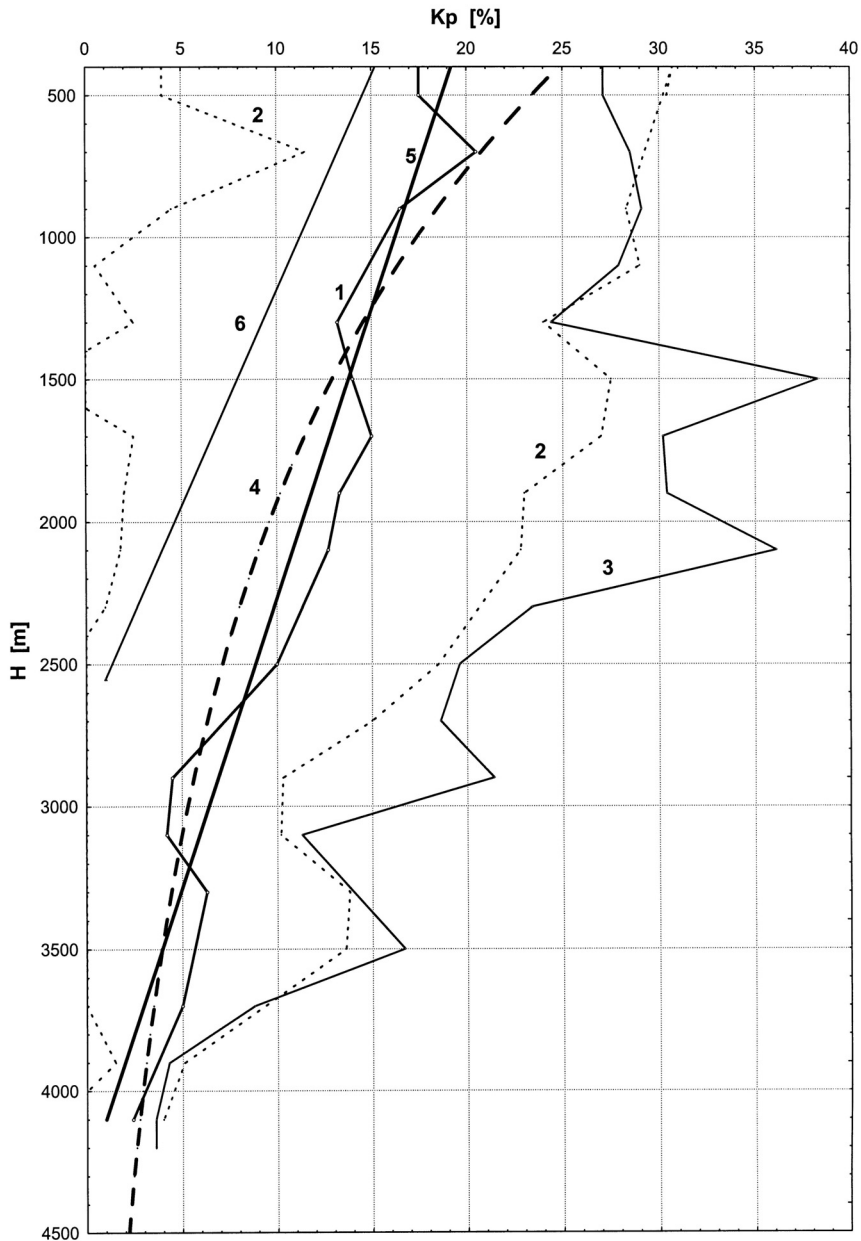
Ważniejsze prawidłowości dotyczące kompaktacji utworów piaszczystych, można podsumować następująco:

- intensywność spadku porowatości piasków i piaskowców z głębokością zależy od ich zailenia wyraźnie rosnąc wraz ze wzrostem zawartości frakcji ilastej;
- analiza ilościowa kompaktacji w utworach piaszczystych powinna być oparta na zmianie maksymalnej porowatości, która związana jest z porowatością czystych piasków;
- intensywność kompaktacji piaskowców niezależnie od ich wieku wyraźnie rośnie wraz ze wzrostem wartości średniego gradientu geotermicznego badanego profilu;
- uśrednione zależności między porowatością piaskowców i głębokością ich zalegania są przedstawiane przez różnych autorów z wykorzystaniem modeli liniowych lub wykładniczych z wyraźną preferencją wariantów liniowych;
- kompaktacji mechanicznej piaskowców bardzo często towarzyszą wtórne procesy diagenetyczne objęte kompaktacją chemiczną.

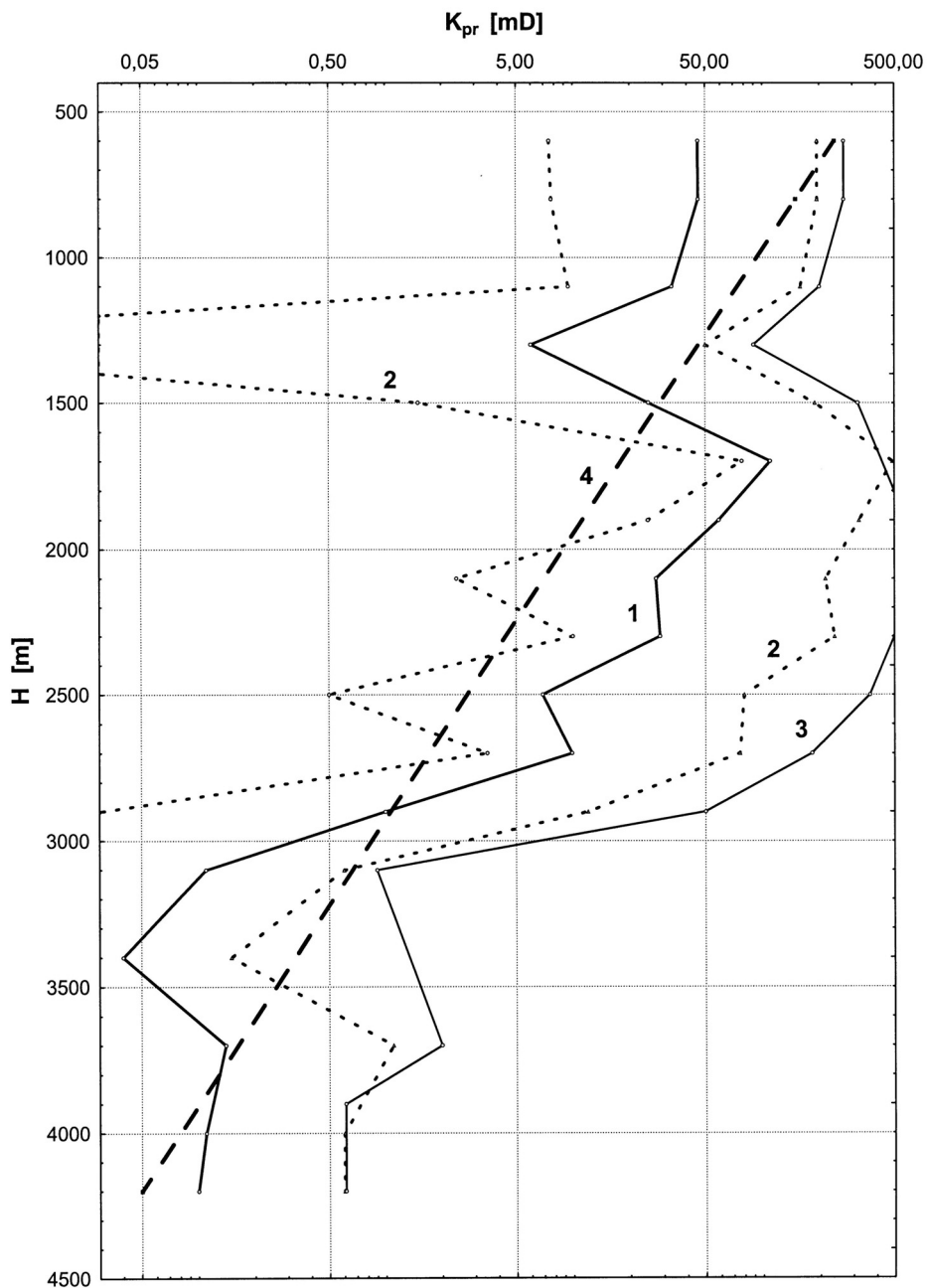
Kompaktacja utworów ilastych powoduje ciągłą znaczną utratę porowatości i przepuszczalności, zaś ich deformacje są w dużym stopniu plastyczne (niesprężyste). Utwory te dobrze nadają się do badania zjawiska kompaktacji ze względu na ich wysoką początkową ogólną porowatość, małe znaczenie innych zjawisk diagenetycznych, a także powszechne występowanie w profilach osadowych, często w postaci warstw o co najmniej kilkumetrowej miąższości. Ze względu na dużą podatność na kompaktację oraz specyficzne właściwości petrofizyczne utwory ilaste mogą być z powodzeniem wykorzystywane do charakterystyki procesu kompaktacji badanego profilu.

Interesujące są obserwowane równoległe zmiany zarówno porowatości, jak i przepuszczalności skał miocenu z głębokością (rys. 1, 2).

Należy przy tym brać pod uwagę fakt, że badane laboratoryjnie próbki skał dotyczyły z założenia skał zbiornikowych, w związku z czym litologicznie reprezentowały mniej lub bardziej zailone piaskowce oraz mułowce.



Rys. 1. Zależność porowatości efektywnej skał miocenu rejonu Przemyśla od głębokości i ich zalegania (wg [12], ze zmianami): 1 – interwałowe oceny wartości przeciętnych K_p ; 2 – granice przedziału ufności zmian K_p ($q = 0,95$); 3 – maksymalne wartości obserwowane K_p ; 4 i 5 – uśrednione zależności wg modeli odpowiednio wykładniczego i liniowego; 6 – uśredniona zależność liniowa dla piaskowców miocenu Przedgórzia Karpat według [9]



Rys. 2. Zależność przepuszczalności skał miocenu rejonu Przemyśla od głębokości ich zalegania (wg [12], ze zmianami): 1 – interwałowe oceny wartości przeciętnych; 2 – szacunkowe granice przedziału ufności zmian wartości przeciętnych; 3 – maksymalne wartości obserwowane; 4 – uśredniona zależność według modelu logarytmicznego

Jak widać z rysunków 1 i 2, właściwości zbiornikowo-filtracyjne utworów mioceni-
skich zmieniają się w szerokich granicach, zarówno w określonych interwałach głęboko-
ściowych, jak i wraz z głębokością.

Średnie wartości współczynników porowatości efektywnej K_p i przepuszczalności K_{pr}
wyraźnie maleją wraz ze wzrostem głębokości. \bar{K}_p zmienia się od ok. 20% przy głęboko-
ściach do 800 m do 4÷5% przy głębokościach ponad 2800 m i ok. 2% przy głębokościach
ok. 4000 m. Jeszcze większe zróżnicowanie cechuje \bar{K}_{pr} – od wartości kilkudziesięciu mD
przy głębokościach rosnących do 2800 m i mniej więcej stabilizując się na poziomie warto-
ści 0,1 mD przy głębokościach ponad 3000 m.

Obserwowana tendencja pogarszania się charakterystyk zbiornikowo-filtracyjnych
skał ze wzrostem głębokości uwarunkowana jest ich diagenetycznymi zmianami, przede
wszystkim grawitacyjną kompaktacją [7, 10, 12].

W odniesieniu do utworów miocenijskich rejonu Przemyśla ustalenie granicy głęboko-
ściowej, od której dominujący wpływ na K_p i K_{pr} skał mają procesy diagenetyczne, jest
trudne. Według [1] granica ta dla piaszczystych skał zbiornikowych ze spoiwem ilastym
znajduje się na głębokości około 2300 m. Powyżej niej właściwości zbiornikowo-filtracyj-
ne piaskowców warunkowane są głównie przez ich sedymentacyjne właściwości, poniżej –
decydującym czynnikiem jest stopień ich grawitacyjnej kompaktacji. Stadium epigenezy,
w czasie którego skały przechodzą do stanu, w którym porowa przepuszczalność nie gwa-
rantuje już przemysłowych przyływów, autorzy [1] proponują nazywać stadium konsoli-
dacji. W ich pojęciu skały skonsolidowane są to skały, które straciły własności porowych
skał zbiornikowych, przechodząc w nieefektywne skały zbiornikowe porowe lub skały zbi-
te nieprzepuszczalne. Potencjalnie mogą one być natomiast szczelinowatymi lub szczelino-
wo-porowymi skałami zbiornikowymi.

W przypadku miocenu rejonu Przemyśla o stadium konsolidacji można mówić przy
głębokościach rzędu 3000 m i więcej. Właściwości zbiornikowo-filtracyjne skał, uwarun-
kowane porowatością międzyziarnistą, osiągają wówczas wartości (rys. 1 i 2) nie gwarantu-
jące przemysłowych przyływów.

Autorzy pracy [3] na podstawie analizy danych laboratoryjnych i przemysłowych
z obszaru złoża gazowego Bohorodczany (ukraińska część zapadliska) stwierdzają, że ska-
ły praktycznie nieprzepuszczalne cechują się współczynnikiem przepuszczalności mniej-
szym od 0,01 mD i porowatością mniejszą od 5%. Duże znaczenie przypisują oni zawarto-
ści węglanów, podobnie jak [5, 7, 10]. I tak – według nich – skały zbiornikowe o zawartości
węglanów poniżej 10÷11% cechują się średnią i wysoką przepuszczalnością (0,1÷500 mD)
i porowatością powyżej 10%. Skały zawierające 11÷18% węglanów są trudnoprzepuszczal-
ne ($K_{pr} = 0,01 \div 0,1$ mD) z porowatością 6÷16%. Zawartość węglanów powyżej 18% czyni
skały praktycznie nieprzepuszczalne ($K_{pr} < 0,01$ mD).

Wartości powyższe należy traktować jako szacunkowe, biorąc pod uwagę chociażby
fakt, iż nie uwzględniają one porowatości i przepuszczalności szczelinowej.

3. PODSUMOWANIE

Właściwości fizyczne głęboko zalegających skał zbiornikowych w istotny sposób uza-
leżnione są od efektów ich kompaktacji. Decydujące znaczenie ma przy tym przede wszyst-
kim kompaktacja mechaniczna (geometryczna), znacznie mniejsze zaś kompaktacja chemiczna

(mineralogiczna). Dotyczy to w szczególności właściwości zbiornikowo-filtracyjnych skał, charakteryzowanych często współczynnikiem porowatości odkrytej i przepuszczalności absolutnej.

Obserwowane w praktyce czasem znaczące rozejścia między faktyczną porowatością otwartą skał piaszczysto-ilastych i jej oceną prognostyczną wynikającą z modelu kompaktacji mechanicznej, można objaśnić dwoma zasadniczymi czynnikami:

- 1) różną zawartością minerałów ilastych i węglanowych w przestrzeni porowej skał (różnym ich zaileniem i wapnistością),
- 2) różną intensywnością przebiegających równolegle procesów kompaktacji chemicznej, prowadzących głównie do diagenetycznych przeobrażeń mineralogicznych, w tym przede wszystkim do diagenetycznej cementacji.

Przepuszczalność piaszczysto-ilastych skał zależna od ich kompaktacji mechanicznej może być oszacowana na podstawie przybliżonej zależności potęgowej (o wykładniku równym aż +4) między zmianą przepuszczalności i zmianą odkrytej porowatości tych skał [2].

LITERATURA

- [1] Bedčer A.Z., Okuň M.I.: *Metod matematičeskogo modelirovanija epigenetičeskich preobrazovanij porod-kollektorov*. Sb. „Sostojanie i perspektivy izučenija kollektorov nefti i gaza”. IV Vsesojuznoe soveščanie po kollektoram nefti i gaza, Moskwa 1971
- [2] Dobrynin V.M., Vendelštejn B.J., Koževnikov: *Petrofizika*. Izd. “Nedra”, Moskwa 1991
- [3] Gricišin V.I., Bardovskij V.J., Stepanjuk V.P.: *Statističeskie svjazi fizyko-mineralogičeskich parametrov i emkostnyh svojstv kollektorov verchnetortonskich otloženij*. Sb. „Razvedka i razrabotka neftjanych i gazowych mestoroždenij”, vyp. 8, Volv 1971
- [4] Kiełt M.: *Geofizyka wiertnicza w poszukiwaniach węglowodorów. Strukturalne i sedymentologiczne zastosowanie otworowych profilowań geofizycznych, t. I i II*. Toruń, Wyd. Adam Marszałek 2002
- [5] Klęba J.: *Wpływ węglanów na własności zbiornikowe piaskowców miocénskich w rejonie Przemysł-Jaksmanice*. Nafta, nr 4, 1988
- [6] Maliszewska A.: *Wybrane zagadnienia diagenезy skał klastycznych*. Przegląd Geologiczny, vol. 44, nr 6, 1996
- [7] Maliszewska A., Kozłowska A., Kuberska M.: *Wpływ diagenезy na porowatość i przepuszczalność piaskowców miocenu w rejonie Tarnogrodu (zapadlisko przed-karpackie)*. Prace INiG, Kraków 2004
- [8] Plewa M., Plewa S.: *Petrofizyka*. Warszawa, Wyd. Geologiczne 1992
- [9] Plewa S.: *Wyniki badań petrofizycznych własności skał*. Prace Geol. Kom. Nauk Geol. PAN, 105, Kraków 1977
- [10] Rychlicki S., Twardowski K.: *Rozwiązanie niektórych zagadnień geologiczno-złożowych miocenu Przedgórz Karpát z wykorzystaniem metod matematycznych*. Zesz. Nauk. AGH, Geologia, z. 25, 1978

- [11] Środoń J.: *Minerały ilaste w procesach diagenety*. Przegląd Geologiczny, vol. 44, nr 6, 1996
- [12] Twardowski K.: *Własności zbiornikowe skał miocenu w rejonie Przemysła*. Nafta, nr 2, 1974
- [13] Twardowski K., Traple J.: *Charakterystyka ilościowa porowatości ośrodków grunto-wo-skalnych a zjawiska molekularno-powierzchniowe*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 23/1, 2006
- [14] Twardowski K., Traple J.: *O kompaktacji utworów geologicznych*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 25, z. 1, 2008