

Kazimierz Twardowski*, Jacek Traple*

CHARAKTERYSTYCZNE WSKAŹNIKI NASYCENIA PŁYNAMI POROWATYCH OŚRODKÓW GRUNTOWO-SKALNYCH**

1. WSTĘP

Porowate ośrodki gruntowo-skalne, w których kapilarny potencjał płynów porowych znacznie przewyższa ich potencjał grawitacyjny, uznawane są za ciała kapilarno-porowate [2, 10, 23].

W ogólnym przypadku, w nawiązaniu do ich opisu i modelowania, należy je traktować jako ośrodki wielofazowe i wieloskładnikowe.

W odniesieniu do klasycznych skał zbiornikowych ropo- i gazonośnych jest to oczywiste (np. [3, 6, 17]), natomiast w przypadku gruntów dotyczy to przede wszystkim ich strefy aeracji (napowietrzania), gdzie mogą znajdować się poza wodą zwilżającą fazę stałą, także inne płyny niezwilżające szkieletu gruntowego, w tym gazy (np. powietrze gruntowe) lub/i ciecze (np. pochodzące ze skażeń ciecze ropopochodne).

Z uwagi na złożoną i nieuporządkowaną strukturę ośrodka porowatego opis procesów fizycznych w nim zachodzących jest zagadnieniem trudnym. Aby taki opis uprościć, można wykorzystać możliwość zastąpienia ośrodka porowatego makroskopowo *ekwiwalentnym ośrodkiem ciągłym*. Taką możliwość zapewniają metody *teorii homogenizacji* (uśrednienia przestrzennego), wykorzystywane w praktycznym rozwiązywaniu zagadnień technicznych (np. [12, 21]).

Metody te pozwalają na przejście drogą teoretyczną od lokalnego opisu ośrodka porowatego w *skali mikroskopowej* do jego opisu w *skali mezoskopowej*.

Cechą charakterystyczną metod homogenizacji jest to, iż mezoskopowe właściwości ośrodka porowatego określane są za pomocą *wielkości średnich*.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

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

2. WSKAŹNIKI NASYCENIA WODĄ OŚRODKÓW GRUNTOWO-SKALNYCH

2.1. Rodzaje wody występującej w ośrodkach gruntowo-skalnych

Woda może występować w ośrodkach gruntowo-skalnych w różnej postaci. Modyfikując różne klasyfikacje spotykane w literaturze [5, 13, 18, 20, 22] systematykę wody zawartej w gruntach i skałach można przedstawić, porządkując typy wód w zależności od wielkości sił wiążących daną wodę z ziarnami mineralnymi ośrodka:

- **woda chemicznie związana** wewnątrz ziarn mineralnych:
 - woda krystalizacyjna,
 - woda konstytucyjna;
- **woda fizycznie związana** z powierzchnią ziarn mineralnych:
 - silnie związana,
 - słabo związana;
- woda wolna:
 - kapilarna,
 - grawitacyjna;
- woda w stanie gazowym (para wodna);
- woda w stanie stałym (lód).

Woda chemicznie związana bierze udział w budowie sieci krystalicznej minerałów wchodząc w skład szkieletu mineralnego.

Woda fizycznie związana znajduje się we współdziałaniu z powierzchnią fazy stałej ośrodka i różni się właściwościami od wody wolnej.

Większość współczesnych badaczy biorąc przede wszystkim pod uwagę energetyczne różnice w wiązaniu wody z cząstkami mineralnymi, dzieli wodę fizycznie związaną na dwa typy: wodę silnie związaną i wodę słabo związaną.

Woda silnie związana odpowiada w pewnej mierze wodzie adsorpcyjnej warstwy zwartej, słabo związana – wodzie warstwy dyfuzyjnej w podwójnej warstwie elektrycznej (PWE). Maksymalna ilość silnie związanej wody w ośrodku odpowiada mniej więcej wielkości maksymalnej higroskopijności, tzn. tej wilgotności, którą ośrodek przyjmuje przez adsorpcję cząsteczek pary wodnej na ziarnach mineralnych przy względnej prężności pary wodnej równej 100%. Stwarza to podstawę uznania za synonimy określenia: woda silnie związana, higroskopowa i adsorpcyjna.

Właściwości wody silnie związanej fizycznie są podobne do właściwości ciała stałego, którego struktura różni się jednak od struktury lodu. Często traktowana jest wręcz jako dodatkowy czwarty stan skupienia; określany jako stan quasi-stały [5] lub faza przejściowa w gruntach – tzw. ściśliwa błona [24]. Z badań wynika, że siła wiążąca tę wodę osiąga wartości rzędu 2500 MPa, a jej gęstość równa jest 1,2–2,4 g/cm³, średnio ok. 1,7 g/cm³. Woda silnie związana ma ponadto znaczną lepkość, sprężystość i wytrzymałość na ściana. Temperatura jej zamarzania wynosi średnio –78 °C.

Woda słabo związana fizycznie znajduje się na powierzchni ziaren mineralnych na zewnątrz wody silnie związanej. Cząsteczki wody słabo związanej utrzymywane są na powierzchni szkieletu dość słabymi siłami van der Waalsa i siłami pola zorientowanych cząsteczek wody w warstwie adsorpcyjnej (warstwie dyfuzyjnej PWE). Warstwa wody słabo związanej ma grubość rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset średnic cząsteczek wody (średnica cząsteczki wody $\approx 0,138$ nm).

Słabo związana woda charakteryzuje się podwyższoną lepkością i może powoli przemieszczać się pod działaniem znacznych sił mechanicznych. Jej temperatura zamarzania równa się ok. $-1,5$ °C. Ma ona niedużą zdolność rozpuszczania soli. Wodę słabo związaną można podzielić na dwie grupy: **wodę poliwarstw** oraz **wodę osmotyczną**. Woda poliwarstw utrzymuje się w gruncie jeszcze pod działaniem powierzchniowych sił przyciągania. Tworzy ona wokół cząstek mineralnych jednolitą warstwę i dlatego nazywana jest **wodą błonkową** (w gleboznawstwie – **blonkowatą**). Woda osmotyczna jest trudna do odróżnienia od wody zawartej w porach kapilarnych o małej średnicy.

Do **wody wolnej** zawartej w gruntach i skałach zalicza się zwykle wodę kapilarną (włoskowatą) i wodę grawitacyjną (np. [18]). **Woda kapilarna** wypełnia małe pory o rozmiarach od 10^{-7} do 10^{-4} m lub ostre, wąskie zagłębienia większych porów. W porach takich, w wyniku ciśnienia kapilarnego, występującego dzięki działaniu sił molekularnych na granicach faz, odbywać się może samoczynny ruch wody. Na przykład przy zmniejszaniu się ilości wody kapilarnej w wyniku wysychania jednej części ośrodka może następować uzupełnienie tej wody dzięki jej podciąganiu z pozostałej części.

Wodą grawitacyjną jest woda zawarta w ponadkapilarnych porach gruntów i skał. Nie podlega ona działaniu sił występujących na powierzchniach szkieletu mineralnego i może swobodnie przemieszczać się w przestrzeni porowej pod działaniem różnicy napórów hydraulicznych (sił ciężkości i różnicy ciśnienia). Woda grawitacyjna ma wszystkie właściwości fizyczne wody zwykłej.

Woda w postaci pary wodnej wywiera wpływ na ciśnienie wody w porach gruntu i na wartość naprężeń efektywnych w gruncie.

Woda w stanie stałym (lód) ma istotne znaczenie na przemieszczanie się wody w gruncie i na właściwości gruntu (np. wysadziny i przełomy na drogach).

2.2. Wskaźniki zawartości wody w gruntach i skałach

Całkowita ilość wody zawartej w porach w naturalnych warunkach zaleganiu gruntu określa jego naturalną **wilgotność**. Zgodnie z normą geotechniczną PN-98/B-02481 [16] wilgotność gruntu w definiowana jest jako stosunek masy wody w porach gruntu m_w do masy szkieletu gruntu m_s :

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (1)$$

gdzie m oznacza masę badanej zawilgoconej próbki.

Według definicji, w gruntach niespoistych pojęcie wilgoci nie obejmuje wolnej wody grawitacyjnej. Wartości m i m_s wyznacza się przez ważenie próbki wilgotnej i suchej (wysuszonej w temperaturze 105–110 °C), stąd wskaźnik w nazywany jest niekiedy wilgotnością wagową (masową).

Wilgotność naturalna jest bardzo ważną charakterystyką fizycznego stanu gruntu, gdyż obecność wody w porach wpływa w określony sposób na wszystkie inne właściwości fizyczne gruntu.

Oznaczanie naturalnej wilgotności gruntów metodą wagową nie jest łatwe, gdyż wymaga takiego sposobu pobrania i przechowywania próbki do chwili badania, który uniemożliwia zmianę jej wilgotności.

Próbka gruntu pozostawiona dłuższy czas działaniu powietrza w przeciętnych warunkach laboratoryjnych osiąga, w wyniku parowania wody z próbki, tzw. stan powietrzno-suchy, w którym wilgotność gruntu jest w przybliżeniu równa połowie maksymalnej wilgotności higroskopowej.

Do oznaczania wilgotności naturalnej powinny być użyte próbki gruntu o wilgotności naturalnej (NW). Mogą też oczywiście być do tego celu używane próbki o naturalnej strukturze (NNS), których sposób pobierania i przechowywania zapewnia zachowanie naturalnej wilgotności gruntu.

Innym wskaźnikiem ilościowym charakteryzującym zawartość wody w gruncie niespoistym jest **stopień wilgotności gruntu** S_r [16]. Jest on definiowany jako stosunek objętości wody zawartej w porach gruntu V_w do objętości porów V_p :

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \quad (2)$$

Parametr ten wskazuje stopień wypełnienia porów gruntu przez wodę.

Zawartość wody w gruncie w strefie wzniosu kapilarnego nazywa się **wilgotnością kapilarną** [13]. Zgodnie ze wzorem (1) określa ją stosunek różnicy mas próbki odsączonej z wody wolnej i próbki suchej do masy próbki suchej. Podobnie określa się wodochłonność kapilarną.

Woda kapilarna znajdująca się w strefie wzniosu nad swobodnym zwierciadłem pozostaje w łączności z wodą wolną i zwana jest niekiedy **wodą kapilarną właściwą**. Istnieje również w strefie aeracji **woda kapilarna zawieszona**, która wypełnia niektóre przestrzenie porowe, nie łącząc się z wodą wolną.

Zawartość wody w skałach określa się często w sposób podobny jak w gruntach [17, 18]. W warunkach laboratoryjnych wilgotność skały wyznacza się przez suszenie próbki wilgotnej skały w temperaturze 105–110 °C aż do osiągnięcia stałej masy próbki. Przyjmuje się przy tym, że próbka znalazła się w stanie fizycznym suchym (bez wody wolnej i fizycznie słabo związanej), a jej masa równa jest masie szkieletu mineralnego próbki.

W klasycznej petrofizyce naftowej ogólną zawartość wody w przestrzeni porowej skały charakteryzuje się ilościowo **współczynnikiem nasycenia skały wodą** K_w ¹⁾ [6, 14, 22], definiowanym analogicznie, jak stopień wilgotności gruntu S_r – wzór (2).

Zawartość wody w odniesieniu do jednostki objętości skały określa się czasem jako **wilgotność objętościową** W_o (nasycenie objętościowe wodą):

$$W_o = K_{p.o} \cdot K_w \quad (3)$$

gdzie $K_{p.o}$ oznacza współczynnik porowatości z reguły otwartej (odkrytej lub nasycenia) [6, 22, 23].

Sumaryczną zawartość w skałe wody fizycznie związanej ocenia się ilościowo **współczynnikiem nasycenia skały wodą fizycznie związaną**:

$$K_{w.zw} = \frac{V_{w.zw}}{V_p} \quad (4)$$

gdzie $V_{w.zw}$ oznacza objętość wody związanej, odpowiadającą części objętości porów wypełnionych tą wodą.

W odniesieniu do skał ropo- i gazonośnych woda fizycznie związana i woda kapilarna (nazywana też wodą umownie ruchomą) tworzą tzw. **reszkowe nasycenie skały wodą**, które charakteryzuje się ilościowo **współczynnikiem reszkowego nasycenia skały wodą**:

$$K_{w.r} = \frac{V_{w.r}}{V_p} \quad (5)$$

gdzie $V_{w.r}$ oznacza objętość wody reszkowej.

Woda fizycznie związana praktycznie w całości wypełnia objętość hydrofilowych kapilar o promieniu $r < 20\text{--}30$ nm, przy czym kapilary o promieniu $r < 1,5\text{--}2,0$ nm wypełnione są głównie wodą silnie związaną.

Woda przytrzymywana kapilarnie charakterystyczna jest dla porów, których promień wynosi 30–500 nm, a także dla narożników porów związanych ze stykami między ziarnami budującymi szkielet skały. Dla hydrofilowych skał zbiornikowych roponośnych jako górną granicę promienia porów, zawierających wodę przytrzymywaną kapilarnie, przyjmuje się 0,5–0,1 μm , dla skał gazonośnych 0,1–0,2 μm . Pory hydrofilowe subkapilarne są całkowicie wypełnione wodą związaną fizycznie.

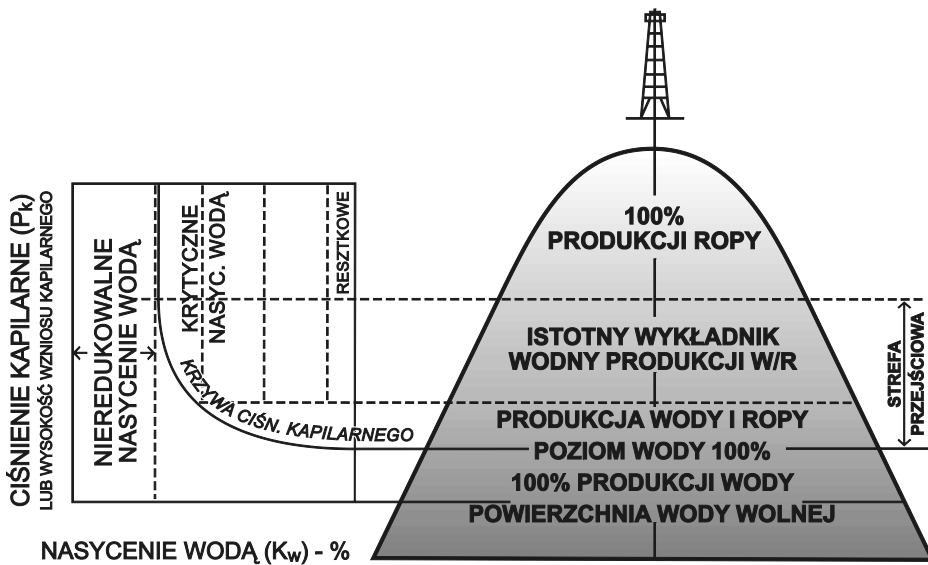
¹⁾ Wielkości petrofizyczne oznaczano wg normy PN-86/G-01201 [15].

Współczynniki $K_{w,zw}$ i $K_{w,r}$ nawiązują bezpośrednio do wykorzystywanych w inżynierii naftowej ważnych z punktu widzenia charakterystyki hydrofilowych skał produktywnych następujących pojęć [1, 2, 4, 6, 19]:

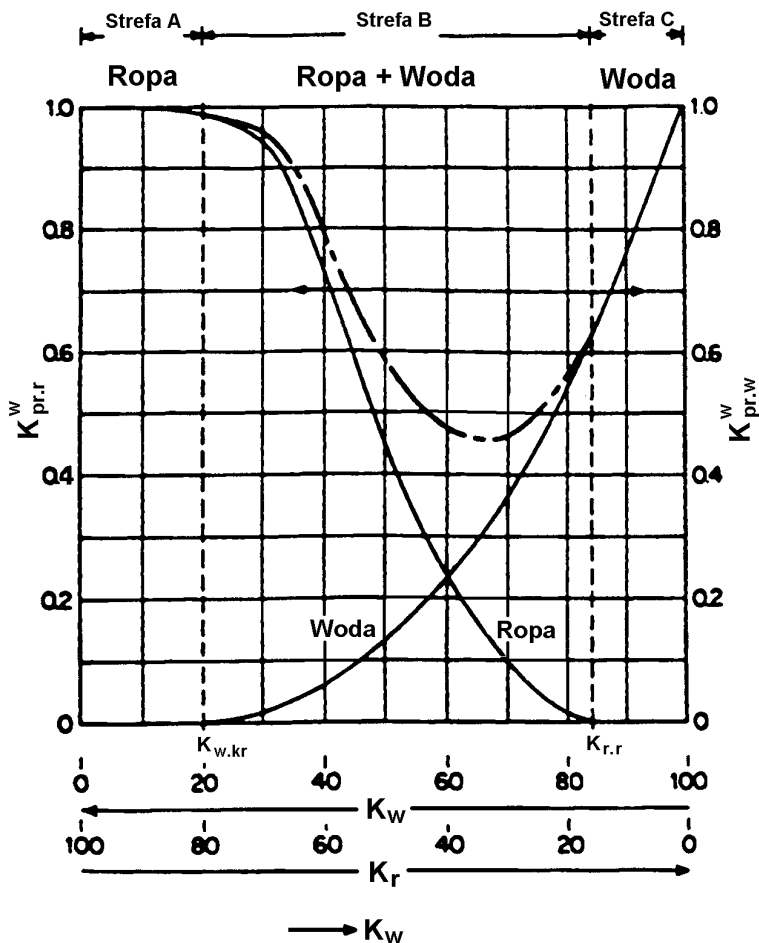
- nieredukowalne nasycenie skały wodą (rys. 1), które należy wiązać z zawartością w skale wody fizycznie związanej, charakteryzowanej współczynnikiem $K_{w,zw}$ – wzór (4); (w literaturze angielskiej odpowiednikiem są alternatywne terminy: *irreducible water saturation* S_{wir} lub rzadziej: *connate water saturation* S_{wi});
- krytyczne nasycenie skały wodą (rys. 1 i 2), które charakteryzowane jest w cyklu wytłaczania ropy przez wodę (zwanym nasyceniem wodą lub saturacją) współczynnikiem $K_{w,kr}$ (*critical water saturation* S_{wc}); dla cyklu wypierania wody przez ropę (zwanym drenażem lub desaturacją) wskaźnik ten odpowiada współczynnikowi resztkowego nasycenia skały wodą $K_{w,r}$ – wzór (5) (*residual water saturation* S_{wr}), co oznacza, że obejmuje on wodę fizycznie związaną oraz wodę kapilarną (umownie ruchomą).

Nieredukowalne nasycenie skały wodą wyznacza na osi odciętych (K_w) asymptota krywej ciśnienia kapilarnego $P_k = f(K_w)$ (rys. 1).

Teoretycznie współczynniki nasycenia krytycznego i resztkowego dla danej cieczy (wody lub ropy) powinny być identyczne. W rzeczywistości tak jednak nie jest, czego powodem jest zjawisko histerezy kapilarnej oraz histerezy przepuszczalności względnych fazowych ośrodka [1]. Krytyczne nasycenie cieczą zwilżającą określane jest w warunkach rosnącego nasycenia, natomiast nasycenie nieredukowalne, jak i resztkowe, badane są w warunkach nasycenia malejącego.



Rys. 1. Relacja między ropą i wodą w złożu z uwzględnieniem ciśnienia kapilarnego oraz charakterystycznych nasycień ([19]; wg Sneidera 1987, ze zmianami)



Rys. 2. Typowy diagram względnych przepuszczalności fazowych skały hydrofilowej dla układu dwufazowego ropa-woda ([1]; ze zmianami)

3. WSKAŹNIKI NASYCENIA SKAŁ WĘGLOWODORAMI

W przestrzeni porowej skał zbiornikowych ropo- i gazonośnych woda, ropa naftowa i gaz ziemny występują w różnych proporcjach. Rozmieszczenie w skale zbiornikowej płynów złożowych zależy od charakteru zwilżalności szkieletu mineralnego, skały i w pewnym stopniu również od rodzaju właściwości tych płynów. Na rysunku 3 przedstawiono schemat rozmieszczenia wody i ropy naftowej (lub wody i gazu) w kapilarze porowej przestrzeni hydrofilowych i hydrofobowych skał zbiornikowych przy różnym stopniu ich nasycenia. W przyrodzie rozpowszechnione są przeważnie skały zbiornikowe hydrofilowe, czyli dobrze zwilżane wodą, gdyż szkielet mineralny tych skał jest zbudowany z minerałów hydrofilowych.

W ogólnym przypadku objętość porów jest całkowicie wypełniona płynami złożowymi:

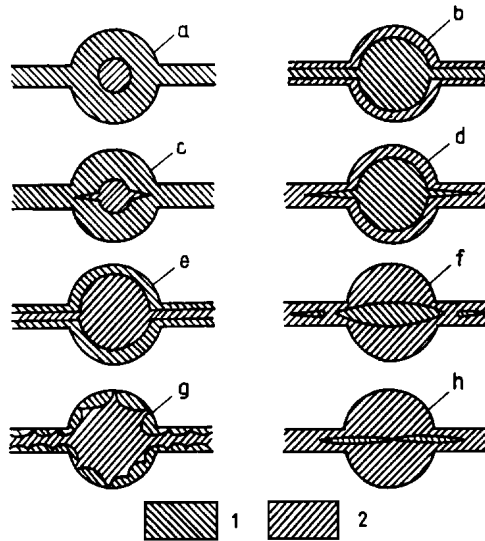
$$V_p = V_r + V_w + V_g \quad (6)$$

gdzie: V_r , V_w , V_g – odpowiednio objętości, które zajmują w porowej przestrzeni skały ropa naftowa, woda i gaz ziemny.

Po obustronnym podzieleniu równania (6) przez V_p otrzymujemy oczywistą relację:

$$\frac{V_r}{V_p} + \frac{V_w}{V_p} + \frac{V_g}{V_p} = K_r + K_w + K_g = 1 \quad (7)$$

gdzie: K_r , K_w , K_g – współczynniki nasycenia skały ropą naftową, wodą i gazem ziemnym.



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia wody i ropy naftowej (lub wody i gazu) w kapilarze porowej przestrzeni hydrofilowych i hydrofobowych skał zbiornikowych przy różnym stopniu ich nasycenia ([14]; wg G.W. Kellera, 1957)

1 – woda, 2 – ropa naftowa;

skały zbiornikowe w pełni nasycone wodą:

a – hydrofilowe, b – hydrofobowe;

skały przy nasyceniu wodą większym niż krytyczne:

c – hydrofilowe, d – hydrofobowe;

skały przy nasyceniu krytycznym:

e – hydrofilowe, f – hydrofobowe;

skały przy nasyceniu mniejszym niż krytyczne:

g – hydrofilowe, h – hydrofobowe

Ropa naftowa, woda i gaz ziemny znajdujące się w porach skały zbiornikowej są szczyrywalne tylko częściowo. W związku z tym rozróżnia się **współczynnik nasycenia szczyrywalnego** $K_{r,sc}$ i **współczynnik nasycenia resztkowego** $K_{r,r}$ ropą naftową:

$$K_r = K_{r,sc} + K_{r,r} \quad (8)$$

W szczególnym przypadku dla hydrofilowej skały nasyconej ropą naftową mamy:

$$K_r + K_w = K_{r,sc} + K_{r,r} + K_{w,sc} + K_{w,zw} = 1 \quad (9)$$

gdzie: $K_{w,sc}$ – współczynnik nasycenia skały wodą szczyrywalną (ruchomą).

Jeżeli skała zbiornikowa roponośna nie zawiera wody ruchomej (przypadki *e, f, g, h* na rys. 3), wówczas:

$$K_r + K_w = K_{r,sc} + K_{r,r} + K_{w,zw} = 1 \quad (10)$$

Analogiczne sytuacje dotyczą skał zbiornikowych gazonośnych.

Zawartość fazy węglowodorowej w odniesieniu do jednostki objętości skały określa się czasem:

- dla ropy naftowej – jako **współczynnik nasycenia objętościowego skały ropą**:

$$K_{r,o} = K_p \cdot K_r \quad (11)$$

- dla gazu ziemnego – jako **współczynnik nasycenia objętościowego skały gazem**:

$$K_{g,o} = K_p + K_g \quad (12)$$

4. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono systematykę wody zawartej w gruntach i skałach, uwzględniając w szczególności siły wiążące wodę z ziarnami mineralnymi tych ośrodków. Następnie omówiono ważniejsze ilościowe wskaźniki opisujące zawartość wody w ośrodkach gruntowo-skalnych. Zwraca uwagę nieuporządkowany charakter i niespójność terminologii w tym zakresie, szczególnie w odniesieniu do geotechniki, hydrogeologii oraz inżynierii naftowej. Wynika to m.in. stąd, że:

- geotechnika i hydrogeologia zajmują się przede wszystkim klasycznymi dwufazowymi ośrodkami porowatymi – gruntami i skałami w pełni nasyconymi wodą (strefa saturacji);
- inżynieria naftowa ma do czynienia z typowymi ośrodkami porowatymi trójfazowymi, w których obok szkieletu mineralnego występują zwilżająca i niezwilżająca go fazy płynne, co powoduje pojawienie się różnych efektów kapilarnych, w tym w szczególności zjawiska histerezy kapilarnej oraz histerezy przepuszczalności względnych fazowych ośrodka [1].

LITERATURA

- [1] Ahmed T.: *Reservoir Engineering – Handbook*. Gulf Professional Publishing, Boston–London–Auckland–Johannesbourg–Melbourne–New Delhi 2001
- [2] Aksielrud G.A., Altszuler M.A.: *Ruch masy w ciałach porowatych*. Wyd. Nauk.-Techn., Warszawa 1987 (tłum. z ros.)
- [3] Azis K., Settari A.: *Petroleum Reservoir Simulation*. Applied Science Publishers Ltd., London 1979
- [4] Danekar A.Y.: *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*. CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton–London–New York 2006
- [5] Derski W., Izbicki R., Kisiel I. (red.), Mróz Z.: *Mechanika skał i gruntów*. PWN, Warszawa 1982
- [6] Dobrynin V.M., Vendelštejn B.J., Kozevnikov D.A.: *Petrofizyka*. Izd. „Nedra”, Moskwa 1991
- [7] Fedyshyn V., Nesterenko M.: *Substantiation of Fluid Saturation of Reservoir-Rocks on the Basis of Petrophysical Studies*. Wiertnictwo Nafta Gaz (półrocznik AGH), t. 25, z. 2, 2008
- [8] Hawkins J.T.: *Comparison of Three Methods of Relative Permeability Measurement*. The Log Analyst, vol. 30, no. 5, 1989.
- [9] Karniadakis G., Beskok A., Aluru N.: *Microflows and Nanoflows. Fundamentals and Simulation*. Springer Science + Business Media, Inc. 2005
- [10] Kowalski S.J.: *Inżynieria materiałów porowatych*. Wyd. Polit. Pozn., Poznań 2004
- [11] Liszka K., Rychlicki S.: *Wtórne metody eksploatacji złóż ropy (wybrane zagadnienia)*. Mat. St. Podypl. z zakresu „Eksploatacja i ochrona złóż węglowodorów”, WWNiG AGH, Kraków 2002 (mat. niepublikowane)
- [12] Marynowicz A., Wyrwał J.: *Badanie właściwości wilgotnościowych wybranych materiałów budowlanych w warunkach izotermicznych*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2005
- [13] Pisarczyk S.: *Gruntoznawstwo inżynierskie*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2001
- [14] Plewa M., Plewa S.: *Petrofizyka*. Wyd. Geolog., Warszawa 1992
- [15] Polska Norma PN-86/G-01201: *Geofizyka wiertnicza – Symbole*
- [16] Polska Norma PN-98/B-02481: *Geotechnika – Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar*
- [17] Rogoż M.: *Hydrogeologia kopalniana z podstawami hydrogeologii ogólnej*. Wyd. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2004
- [18] Ryncarz T.: *Zarys fizyki górotworu*. Śląskie Wyd. Techn., Katowice 1993
- [19] Slatt R.M.: *Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists and Engineers*. Handbook of Petroleum Exploration and Production, vol. 6, ELSEVIER, Amsterdam–Boston–Heidelberg–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo 2006
- [20] *Słownik hydrogeologiczny* (red. nauk.: J. Dowgiałło, A.S. Kleczkowski, T. Macioszczyk, A. Rózkowski). Wyd. PIG, Warszawa 2002

- [21] Strzelecki T. (red.): *Mechanika ośrodków niejednorodnych. Teoria homogenizacji*. Dolnośl. Wyd. Edukacyjne, Wrocław 1996
- [22] Twardowski K., Traple J.: *Charakterystyka ilościowa porowatości ośrodków grunto-wo-skalnych a zjawiska molekularno-powierzchniowe*. *Wiertnictw Nafta Gaz* (rocznik AGH), t. 23, z. 1, 2006
- [23] Twardowski K.: *Fizyka złóż węglowodorów*. *Mat. St. Podypl. z zakresu „Eksploracja i ochrona złóż węglowodorów”*, WwNiG AGH, Kraków 2002 (mat. niepublikowane)
- [24] *Właściwości gruntów nienasyconych* (pr. zbior. pod red. B. Grabowskiej-Olszewskiej). Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1998
- [25] Wyrwał J.: *Termodynamiczne podstawy fizyki budowli*. Wyd. Polit. Opol., Opole 2004