

Ludwik Zawisza*, Waclawa Piesik-Buś**

**HYDRODYNAMICZNE MODELOWANIE
BASENÓW OSADOWYCH
NA PRZYKŁADZIE BASENU PERMSKIEGO
MONOKLINY PRZEDSUDECKIEJ*****

**1. HYDRODYNAMICZNA KLASYFIKACJA
OSADOWYCH BASENÓW NAFTOWYCH**

Opierając się na danych dotyczących ciśnień i właściwości płynów złożowych można wydzielić [1–5, 9, 10] trzy główne typy basenów osadowych (rys. 1):

- 1) juwenilny (odśrodkowy),
- 2) przejściowy (dośrodkowy),
- 3) dojrzały (statyczny).

Zjawiska fizyczne oraz związki zachodzące pomiędzy nagromadzeniami węglowodorów a towarzyszącymi im wodami złożowymi i ciśnieniami predysponują typ pierwszy, a praktycznie eliminują jako nieperspektywiczny dla występowania węglowodorów trzeci typ basenu.

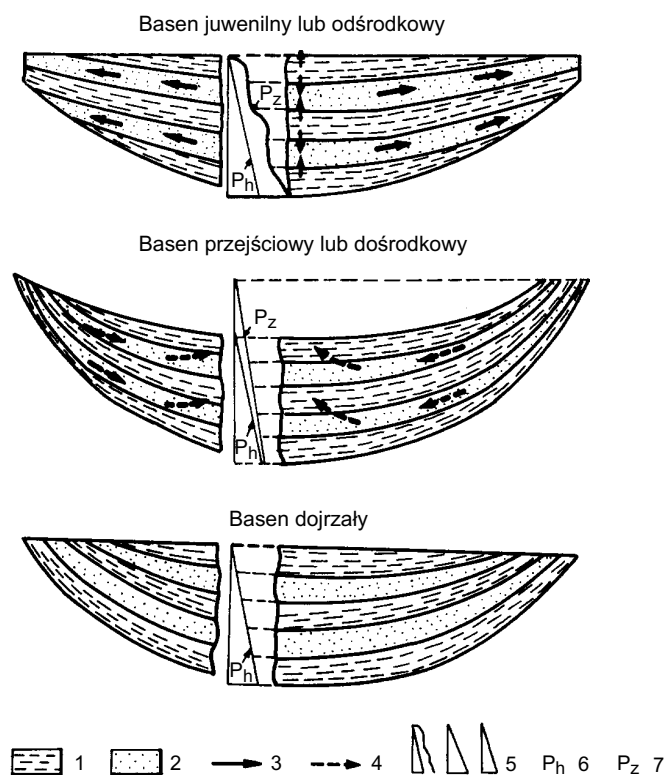
Płyny złożowe oraz ich ruch zmieniają się w sposób regionalny, a zmiany warunków hydrodynamicznych dotyczą zwykle całego lub większej części zbiornika. Faza dynamiczna mediów złożowych zmienia się w czasie o wiele szybciej w stosunku do fazy statycznej, jaką stanowią skały zbiornikowe. Pomiedzy poszczególnymi elementami fazy dynamicznej płynów złożowych zachodzą związki fizyczne i chemiczne. Empirycznie i statystycznie stwierdzono, że istnieje zależność między charakterem wód złożowych, ich genezą, wielkością mineralizacji, składem chemicznym a częstością występowania złóż węglowodorów. Stwierdzono również wpływ wód infiltracyjnych w procesie niszczenia nagromadzeń węglowodorów poprzez rozformowanie złóż, dyfuzję oraz utlenianie węglowodorów.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Instytut Nafty i Gazu, Kraków o/Krosno

*** Praca wykonana w ramach badań własnych w roku 2005

Podstawą klasyfikacji hydrodynamicznej basenów osadowych są procesy różnicujące fazę płynną, a zwłaszcza czynniki związane z ruchem płynów złożowych. Zdefiniowanie typu basenu hydrodynamicznego polega na określeniu, w jakim stadium rozwoju znajduje się on aktualnie: przed, w trakcie czy po inwazji wód infiltracyjnych (rys. 1).



Rys. 1. Typy basenów sedymentacyjnych w zależności od warunków hydrodynamicznych [1]: 1 – łupki ilaste, 2 – skały piaszczyste, 3 – przepływ wód podziemnych spowodowany kompaktcją, 4 – przepływ wód podziemnych spowodowany siłą grawitacji, 5 – wykresy ciśnień, 6 – ciśnienie hydrostatyczne, 7 – ciśnienie złożowe

Basen juwenilny jest basenem o wysokiej perspektywiczności dla występowania złóż węglowodorów. Kierunki przepływu wód głębszych są odśrodkowe, gradienty hydrauliczne bardzo niskie, ciśnienia złożowe są wyższe od hydrostatycznych, a lokalnie występują ciśnienia o anomalnie podwyższonych wartościach. Wody złożowe w tego typu basenie posiadają bardzo wysoką mineralizację. Skały osadowe poddane są bowiem działaniu kompaktcji, diagenety, wysokiego ciśnienia i temperatury, wywołanych subsydencją dna basenu. Przykładem tego typu basenu jest basen Zatoki Meksykańskiej, basen Morza Północnego, basen rzeki Kongo, basen Sahary Północno-Wschodniej [1].

Basen przejściowy jest również basenem aktywnym hydrodynamicznie, posiadającym wysoką, ale mniejszą perspektywiczność (rys. 1). Wyróżnia się w nim dwa podtypy: A i B [6–8, 10].

Basen typu A jest basenem o wysokiej perspektywiczności. Występują w nim strefy o lokalnie podwyższonej koncentracji węglowodorów. Kierunki przepływu wód głębszych są dośrodkowe, a gradienty hydrauliczne podwyższone. Poszczególne kompleksy wodonośne wykazują różnice ciśnień oraz różnice naporów hydraulicznych. W obrębie basenu występują wody słodkie, wody o podwyższonej mineralizacji i wody mieszane. Lokalnie występują strefy o podwyższonej koncentracji węglowodorów oraz złoża o nachylnych konturach. Zwykle są to obszary młodej orogenezy. Do przykładów tego typu basenu należą: Zatoka Perska, Sahara Wschodnia oraz Basen Paryski w doggerze [1].

Basen przejściowy typu B jest basenem o mniejszej perspektywiczności. Obserwuje się postępujące rozformowywanie złóż węglowodorów i postępujący zanik perspektywiczności. Kierunki przepływu wód głębszych są również dośrodkowe, gradienty hydrauliczne małe, a poszczególne kompleksy wodonośne wykazują różnice naporów hydraulicznych. Wody złożowe są znacznie wysłodzone, mogą też występować strefy wód mieszanych. Występują tu pojedyncze złoża węglowodorów. Przykładem tego typu basenu jest Basen Paryski w dolnej kredzie (neokom) oraz wielki artezyjski nadsolny Basen Sahary [1].

Basen dojrzały (statyczny) cechuje się brakiem perspektywiczności. Posiada on warunki hydrostatyczne, zarówno w planie pionowym, jak i poziomym. Ma tutaj miejsce zupełna inwazja słodkich wód infiltracyjnych. Gradienty geotermiczne są niskie. Wśród rzadkich objawów obserwuje się najczęściej produkty utleniania węglowodorów. Do przykładów takich basenów zalicza się: NE część Basenu Akwitańskiego i Basen Paryski w trzeciorzędzie [1].

Na podstawie analizy hydrodynamicznej osadowych basenów naftowych można stosunkowo wcześniej stwierdzić, czy dany basen jest perspektywiczny, czy też nie.

2. METODYKA ILOŚCIOWEJ OCENY WARUNKÓW MIGRACJI I AKUMULACJI WĘGLOWODORÓW

Dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego basenów sedimentacyjnych opracowano metodykę ilościowej oceny warunków migracji i akumulacji węglowodorów [6, 8–11].

Metodyka ta polega na wykonaniu kilkunastu niżej wymienionych map. Są to:

- Mapy strukturalne poziomów wodo-ropo-gazonośnych $z(x,y)$.
- Mapy izopachytowe poziomów wodo-ropo-gazonośnych $m(x,y)$.
- Mapy parametrów zbiornikowych poziomów wodo-ropo-gazonośnych, m.in. mapa współczynnika filtracji $K_{ws}(x,y)$ oraz mapa współczynnika przewodności hydraulicznej $T(x,y)$.
- Mapy mineralizacji wód złożowych poziomów wodo-ropo-gazonośnych $M(x,y)$.
- Mapy ciężaru właściwego wód złożowych $\gamma_w(x,y)$, ropy $\gamma_r(x,y)$ i gazu $\gamma_g(x,y)$.
- Mapy potencjometryczne wód złożowych w przeliczeniu na słup wody słodkiej $H_{ws}(x,y)$. Mapa potencjometryczna wód złożowych przedstawia rozkład pola hydrodynamicznego, główne kierunki przepływu, a także położenie obszarów zasilania i drenażu oraz względnego zastoju. Zagadnienie rozkładu powierzchni potencjometrycznej wód głębszych sprowadza się do rozwiązania uogólnionego równania Laplace'a, w sposób analityczny lub numeryczny, które dla środowiska heterogenicznego o zmiennej minerali-

zacji wód złożowych oraz dla przepływu stacjonarnego (ustalonego), dwuwymiarowego będzie miało postać [6, 8]

$$K_{ws} \nabla^2 H_{ws}(x, y) = 0 \quad (1)$$

Warunkami brzegowymi dla rozwiązania powyższego równania są wartości potencjału H_{ws} wyznaczone w otworach wiertniczych według wzoru

$$H_{ws} = z + p / \gamma_{ws} \quad (2)$$

gdzie:

- γ_{ws} – ciężar właściwy wody słodkiej, N/m^3 ,
- p – ciśnienie złożowe, Pa,
- z – wysokość położenia punktu pomiaru ciśnienia złożowego w stosunku do poziomu morza (lub wysokość położenia stropu poziomego wodno-gazowego w stosunku do poziomu morza), m.

- Mapy wartości bezwzględnych gradientów naporów hydraulicznych wód złożowych $\bar{I}(x, y)$ skonstruowane w oparciu o odpowiednie mapy potencjometryczne zgodnie z formułą

$$|\bar{I}(x, y)| = |\nabla H_{ws}(x, y)| \quad (3)$$

- Mapa gradientów naporów hydraulicznych przedstawia lokalne anomalie i kierunki zmian potencjału wód złożowych H_{ws} .
- Mapy wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji wód złożowych $\bar{v}(x, y)$ zdefiniowane równaniem

$$|\bar{v}(x, y)| = |K_{ws} \nabla H_{ws}(x, y)| \quad (4)$$

Mapa wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji pozwala na określenie kierunków i prędkości przepływu wód złożowych w dowolnym punkcie przestrzeni porowej.

- Mapy wartości bezwzględnych równych przepływów jednostkowych wód złożowych $\bar{q}(x, y)$, które mogą być skonstruowane w oparciu o równanie

$$|\bar{q}(x, y)| = |T(x, y) \nabla H_{ws}(x, y)| \quad (5)$$

- Mapa wartości bezwzględnych równych przepływów jednostkowych wód złożowych pozwala na określenie objętości wody złożowej, w przeliczeniu na wodę słodką, przepływającej w jednostce czasu przez jednostkowy przekrój o szerokości 1 m i wysokości równej całkowitej miąższości analizowanego profilu warstw, w dowolnym punkcie obszaru.
- Mapy potencjalnych pułapek hydrodynamicznych dla ropy $H_r(x, y)$ i gazu ziemnego $H_g(x, y)$.

Każdy układ fazowy dąży do osiągnięcia minimum energetycznego (minimum potencjału) zgodnie z ogólnymi zasadami fizyki. Istotną rolę w lokalizowaniu pułapek złożowych odgrywa określenie miejsca, w którym węglowodory osiągnęły stan równowagi statycznej w stosunku do wód podziemnych przemieszczających się w ośrodku porowatych skał zbiornikowych. Ropa i gaz migrują od stref o potencjałach wyższych do stref o potencjałach niższych i będą się gromadzić w pułapkach lub w strefach, gdzie ich potencjały osiągają lokalne minimum. Pułapki dla ropy i gazu występują w miejscu niskich potencjałów, otoczonym strefami wysokich potencjałów pod nieprzepuszczalnym nadkładem.

Do kartograficznego określania lokalizacji pułapek hydrodynamicznych dla ropy i gazu służą następujące równania [6, 8]:

$$H_r(x, y) = H_{ws}(x, y) - z(x, y) \frac{w(x, y) - r(x, y)}{ws} \quad (6)$$

$$H_g(x, y) = H_{ws}(x, y) - z(x, y) \frac{w(x, y) - r(x, y)}{ws} \quad (7)$$

Wyrażenia H_{ws} , H_r i H_g oznaczają potencjały dla wody, ropy i gazu, wyrażone w metrach słupa wody słodkiej, określone dla tego samego punktu złoża.

Metodyka konstrukcji map potencjalnych pułapek złożowych dla ropy i gazu sprowadza się do wykonania kilku stosunkowo prostych operacji algebraicznych, jak dodawanie, odejmowanie, mnożenie wartości przedstawionych na poszczególnych mapach, zgodnie z równaniami (6) i (7).

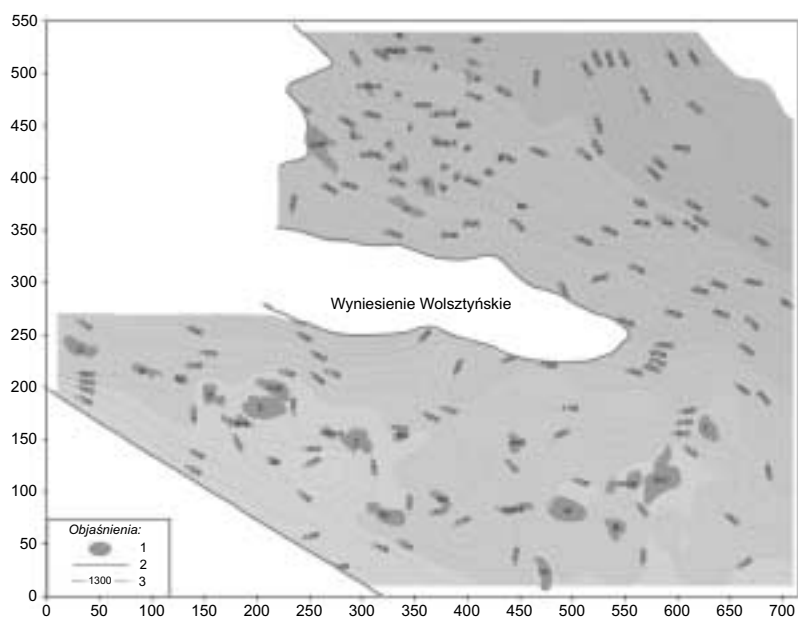
3. HYDRODYNAMICZNE MODELOWANIE BASENU PERMSKIEGO MONOKLINY PRZEDSUDECKIEJ

Przedstawiona hydrodynamiczna klasyfikacja basenów została zastosowana do analizy hydrodynamicznej basenu permskiego monokliny przedsudeckiej (rys. 2, 3, 4, 5, 6).

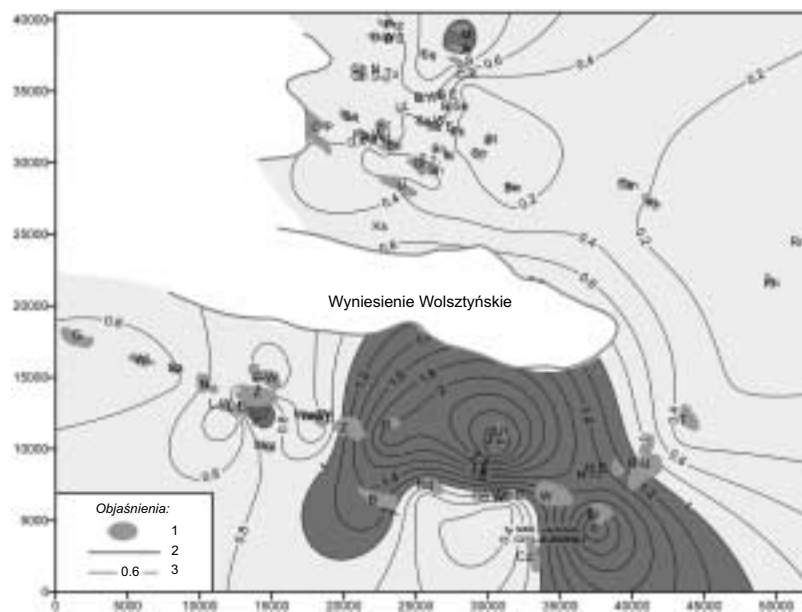
W programie badań hydrodynamicznych dla utworów czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej wykonano następujące mapy:

- mapę strukturalną stropu czerwonego spągowca (rys. 2),
- mapę przepuszczalności,
- mapę mineralizacji wód wglębnych,
- mapy hydrochemiczne wód wglębnych (rys. 3),
- mapę potencjometryczną wód złożowych (rys. 4),
- mapę bezwzględnych wartości równych prędkości filtracji dla wody złożowej (rys. 5),
- mapy pułapek hydrodynamicznych dla ropy i gazu,
- przekroju hydrogeologicznego (rys. 6).

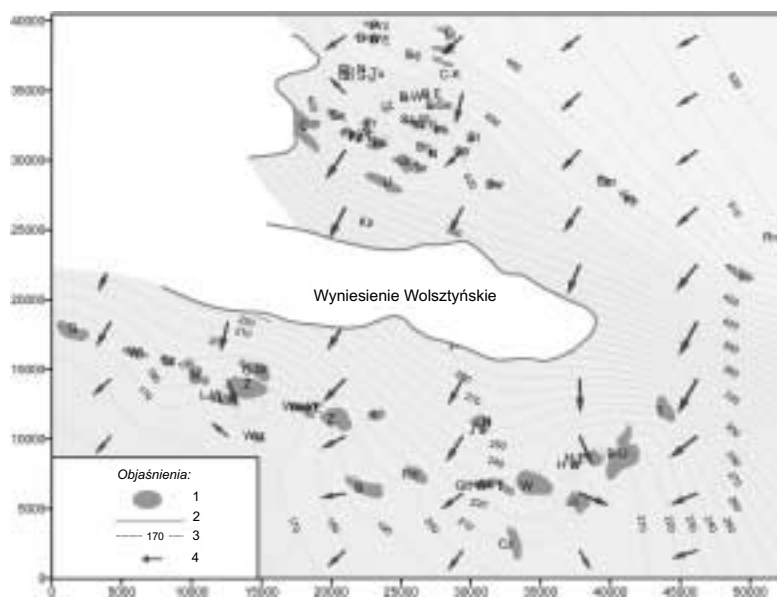
Mapa strukturalna stropu utworów czerwonego spągowca (saksonu) została przedstawiona na rysunku 2.



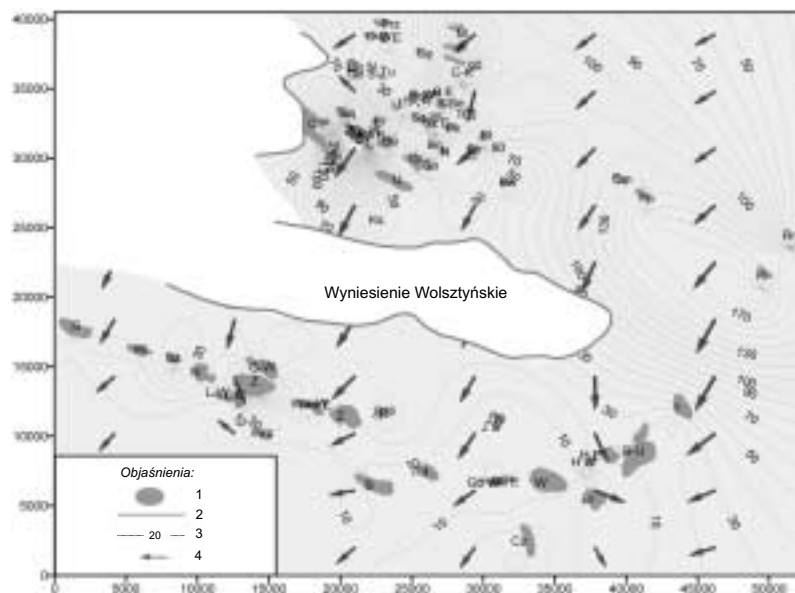
Rys. 2. Mapa strukturalna stropu czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej: 1 – złożę gazu ziemnego, 2 – granica zasięgu czerwonego spągowca, 3 – warstwiec stropu czerwonego spągowca



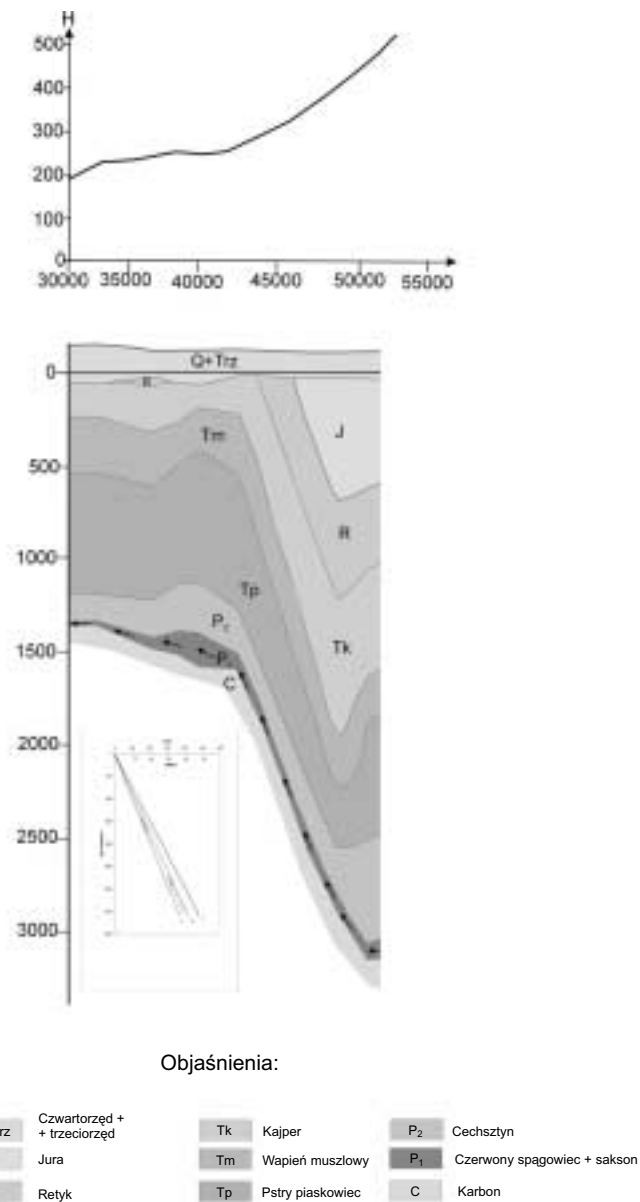
Rys. 3. Mapa hydrochemiczna wód głębinnych w utworach czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej: 1 – złożę gazu ziemnego, 2 – granica zasięgu czerwonego spągowca, 3 – linie równych wartości współczynnika $(rSO_4 \cdot 100)/rCl$



Rys. 4. Mapa potencjometryczna wód złożowych w utworach czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej: 1 – złożo gazu ziemnego, 2 – granica zasięgu czerwonego spągowca, 3 – izolinie powierzchni potencjometrycznej wód złożowych, 4 – kierunki przepływu wód podziemnych



Rys. 5. Mapa wartości bezwzględnych równych prędkości filtracji wody w utworach czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej: 1 – złożo gazu ziemnego, 2 – granica zasięgu czerwonego spągowca, 3 – linie równych wartości prędkości filtracji, 4 – kierunki przepływu wód podziemnych



Rys. 6. Przekrój hydrogeologiczny I-I' przez monoklinę przedśudecką

Mapę mineralizacji wód złożowych wykonano w oparciu o badania laboratoryjne. Mineralizacja wód głębszych w utworach czerwonego spągowca monokliny przedśudeckiej mieści się w granicach 221÷312 g/l. Zmniejszenie mineralizacji następuje w rejonie wyniesienia wolsztyńskiego, po obu jego stronach. Wyniesienie wolsztyńskie stanowi niejako zapórę, wokół której następuje stopniowe wysładzanie się wód głębszych.

Charakterystykę składu chemicznego wód wglębnych uważa się za jeden z pośrednich wskaźników ropo-gazo-nośności [8, 11]. Celem scharakteryzowania wód złożowych w saksonie monokliny przedsudeckiej wybrano grupę stosunków jonowych: r_{Na}/r_{Cl} , $r_{SO_4\ 100}/r_{Cl}$ oraz Cl/Br . Współczynnik $r_{SO_4\ 100}/r_{Cl}$ (rys. 3) jest wskaźnikiem procesów redukcyjnych, jakie zachodzą w czasie migracji w wodach wglębnych. W centrum basenu, wraz ze wzrostem głębokości maleje wartość wskaźnika $r_{SO_4\ 100}/r_{Cl}$. Im dalej od strefy zasilania, tym bardziej wzrasta charakter redukcyjny wód złożowych. W kierunku południowym, w rejonie złóż Janowo, Rawicz, Grabówka, Wierzchowice i Brzostowo wzrasta wartość wskaźnika $r_{SO_4\ 100}/r_{Cl}$, co świadczy o infiltracji wód powierzchniowych.

Mapa potencjometryczna wód złożowych w utworach czerwonego spągowca (rys. 4) przedstawia rozkład pola hydrodynamicznego, główne kierunki przepływu, a także położenie obszarów zasilania i drenażu. Wartości naporów hydraulicznych w utworach czerwonego spągowca są bardzo wysokie i wynoszą od 150 do 530 metrów słupa wody słodkiej n.p.m. Przepływ wód podziemnych odbywa się od centrum basenu do jego wychodni, w kierunku południowym.

Z mapy równych prędkości filtracji dla wody złożowej (rys. 5) wynika, że prędkości filtracji wód podziemnych są stosunkowo wysokie i wynoszą od kilku do 190 cm/rok. Liczne akumulacje złożowe występują w strefach o obniżonej prędkości filtracji, poniżej 100 cm/rok. Zmniejszenie prędkości filtracji następuje w rejonie wyniesienia wolsztyńskiego, które stanowi niejako zapórę dla przepływających wód wglębnych.

Na tle przekroju hydrogeologicznego I-I' (rys. 6) przedstawiono rozkład naporów hydraulicznych oraz kierunki przepływu wód wglębnych w utworach czerwonego spągowca. Z danych przedstawionych na rysunku 6 wynika, że ciśnienia złożowe są równe ciśnieniom hydrostatycznym lub są wyższe od hydrostatycznych, oraz że przepływy wód wglębnych są odśrodkowe.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Sumując wyniki rozważań hydrodynamicznych przeprowadzonych dla basenu permskiego monokliny przedsudeckiej, można stwierdzić, że:

- wody złożowe w utworach saksonu posiadają wysoką mineralizację w granicach od 221 g/l do 312 g/l,
- ciśnienia złożowe są równe ciśnieniom hydrostatycznym lub są wyższe od hydrostatycznych (rys. 3, 6),
- kierunki przepływu wód wglębnych są dośrodkowe (rys. 3, 6),
- gradienty hydrauliczne są stosunkowo wysokie i wynoszą od 0,0015 do 0,0200,
- prędkości przepływu wód wglębnych są również wysokie i wynoszą od 5 do 190 cm/rok (rys. 4),
- licznym akumulacjom złożowym towarzyszą wody o wysokiej mineralizacji oraz lokalnie obniżonej prędkości przepływu wód.

Na tle przedstawionej klasyfikacji hydrodynamicznej basenów naftowych można stwierdzić, że basen permski monokliny przedsudeckiej jest basenem odśrodkowym i należy do basenów o wysokiej perspektywie występowania węglowodorów.

Potencjalne pułapki złożowe, zarówno w utworach karbonu, jak i dewonu powinny być związane ze strefami o obniżonej prędkości filtracji wód wglębnych oraz ze strefami obniżonej wymiany wód. Prawidłowości te potwierdzają dotychczas odkryte akumulacje złożowe.

LITERATURA

- [1] Coustau H. i in.: *Classification hydrodynamique des bassins sedimentaires utilisations combinee avec d'autres methodes pour rationaliser l'exploration dans des bassins non-productifs*. IX World Petroleum Congress, Tokio 1975
- [2] Dahlberg E.C.: *Applied hydrodynamics in petroleum exploration*. 2nd Edition. New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, Springer 1995
- [3] Hubbert M.K.: *Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions*. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., vol. 37, No. 8, 1953, 1954–2026
- [4] Hubbert M.K.: *Application of hydrodynamics to oil exploration*. Paper RPCR-4, 7th World Petrol. Congr., Mexico City, 1967, 59–75
- [5] Jucha S., Weiner R., Zawisza L.: *Polish method of digital mapping of potential hydrodynamic traps for oil and gas deposits exploration*. Sci. de la Terre, Sér. Inf., Nancy, vol. 27, 1988
- [6] Zawisza L.: *Hydrodynamic condition of hydrocarbon accumulation exemplified by the Carboniferous formation in the Lublin Synclinorium, Poland*. Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation, vol. 1, No. 3, 1986, 286–294
- [7] Zawisza L.: *Methodics of mapping hydrodynamic petroleum traps in sedimentary basins with groundwater of variable density*. Arch. Górnictwa, t. 31, z. 1. Kraków, 1986
- [8] Zawisza L.: *Warunki hydrodynamiczne dla akumulacji węglowodorów w karbonie i dewonie synklinorium lubelskiego*. Wrocław Warszawa Kraków Gdańsk Łódź, Prace Geologiczne Komisji Nauk Geologicznych PAN, nr 134, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk 1988
- [9] Zawisza L.: *Hydrodynamic condition of hydrocarbon accumulation exemplified by the Pomorsko and Czerwieńsk oil fields in the Polish Lowland*. SPE Paper 90586, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, U.S.A., 26–29 September 2004
- [10] Zawisza L., Wojna-Dyłał E.: *Hydrodynamiczne modelowanie basenów osadowych na przykładzie basenów naftowych Polski*. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowe metody i technologie w geologii naftowej, wiertnictwie, eksploatacji otworowej i gazownictwie”, Kraków, 20–21.06.1996
- [11] Zawisza L., Wojna-Dyłał E., Smulski R., Macuda J.: *Hydrodynamic conditions of hydrocarbon accumulation exemplified by the Żarnowiec oil field, Poland*. 7th Off-shore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, March 16–18, 2005