

Witold WEIL

Własności zbiornikowe piaskowcowych utworów kambru środkowego strefy Łeby – Żarnowca w świetle analizy statystycznej*

W badanym kompleksie wydzielono dwa typy litologiczne granulanych poziomów zbiornikowych: typ I – względnie jednorodne serie piaskowców drobno- i średnioziarnistych; typ II – serie przekładańców ilowcowo-mułowcowo-piaskowcowych, z przewagą tych ostatnich. Wyróżniono także tzw. semiekranę, będącą formą pośrednią między skałami zbiornikowymi a warstwami uszczelniającymi. Omówiono pionową i poziomą zmienność porowatości laboratoryjnej i geofizycznej (współczynnik porowatości k_p) oraz scharakteryzowano własności filtracyjne poziomów piaskowcowych. Wykorzystując statystyczny program EPISTAT, wykonano analizy: rozkładu pojedynczej zmiennej losowej, korelacji i regresji oraz wariancji jednoczynnikowej zbiorów danych: głębokości, porowatości laboratoryjnej, porowatości geofizycznej, przepuszczalności i gęstości. Przedstawiono geologiczne wnioski wynikające z tych obliczeń.

WSTĘP

Geologiczne badania budowy regionalnej, realizowane przez Państwowy Instytut Geologiczny, oraz prace geologiczno-poszukiwawcze, prowadzone przez górnictwo naftowe od 1968 r. w zachodniej części syneklizy bałtyckiej, przyniosły dotychczas skromne rezultaty w postaci odkrycia dwóch złóż ropy naftowej: Dębki–Żarnowiec i Żarnowiec W. Nowy asumpt do kontynuacji poszukiwań wniosły ostatnie odkrycia akumulacji ropy naftowej i gazu ziemnego w podmorskiej strefie wyniesienia Łeby, dokonane przez W. O. Petrobaltic.

Bardzo ważnym, a niekiedy wręcz decydującym warunkiem prowadzenia dalszych prac w strefie Łeby – Żarnowca, oprócz czynnika strukturalnego, jest poznanie przestrzennego rozkładu własności zbiornikowych piaskowcowej serii kambru środkowego – głównego poziomu perspektywicznego i produktywnego. Prezentowana praca stanowi fragment opracowanej w BG – Geonafta geologicznej analizy własności zbiornikowych wspomnianej serii, cechującej się

bardzo zmiennymi i trudnymi do szczegółowej lokalizacji strefami występowania korzystnych własności. W artykule wykorzystano archiwalne materiały geologiczno-geofizyczne z 18 otworów, zwracając szczególną uwagę na warunki sedimentacji, zmienność facjalną, wewnętrzną budowę serii piaskowcowej, statystyczny rozkład cech zbiornikowych oraz rozwój zachodzących w piaskowcach procesów przeobrażeń diagenetycznych. To ostatnie zagadnienie zostało szerzej przedstawione przez J. Łabęckiego w referacie pt. „Wpływ procesów diagenetycznych na własności zbiornikowe kambru środkowego w rejonie wyniesienia Łeby”, wygłoszonym na konferencji nt. „Budowa geologiczna obszaru południowobałtyckiego” w Gdańsku w 1988 r.

CHARAKTERYSTYKA LITOLOGICZNO-STRATYGRAFICZNA UTWORÓW KAMBRU ŚRODKOWEGO

Utwory kambru środkowego są dwudzielne. W dolnej części są reprezentowane przez monotony kompleks iłowców i mułowców o miąższości 150 m i więcej, przewarstwiany sporadycznie, maksymalnie kilkumetrowymi, wkładkami drobnoziarnistego piaskowca ilastego. Seria ta jest zaliczana do nadpoziomu *Eccaparadoxides oelandicus*. Górną część tworzy kompleks piaskowców, z reguły drobno- i średnioziarnistych, rzadko gruboziarnistych, o ziarnach dobrze obtoczonych i wysortowanych, odznaczających się wysokim stopniem dojrzałości mineralogicznej i teksturalnej, przewarstwianych i laminowanych iłowcami i mułowcami. Jego miąższość waha się od 47,5 do 132,5 m. Jest on zaliczany do nadpoziomu *Paradoxides paradoxissimus*, a jedynie jego przystropowa część, i to tylko w najbardziej północnych rejonach (od Białogóry po Żelazną Górę), obejmuje erozyjnie zredukowany poziom *Paradoxides forchhammeri* (K. Lenzion, 1983).

Piaskowce te nie wykazują istotnego zróżnicowania składu materiału detrytycznego. Są to piaskowce kwarcowe, w których zawartość kwarcu często wynosi 100%. Oprócz kwarcu obserwuje się podrzędne ilości łyszczyków, skaleni, okruchów skał oraz minerały akcesoryczne. Obserwowana niska zawartość skaleni jest najprawdopodobniej spowodowana procesami ich ługowania lub zastępowania przez minerały ilaste.

TYPY LITOLOGICZNE POZIOMÓW ZBIORNIKOWYCH

W badanym górnym kompleksie piaskowców wydzielono dwa typy litologiczne granularnych poziomów zbiornikowych:

1. Typ I – poziomy charakteryzujące się względnie jednorodną budową wewnętrzną, reprezentowane przez dobrze wysortowane, drobnoziarniste, rzadziej średnio- i drobnoziarniste lub słabo zailone piaskowce masywne i gruboławicowe, a niekiedy także średnioławicowe. Głównym składnikiem piaskowców jest kwarc, a frakcja ilasta w formie rozproszonej lub mikroprzeławiczeń występuje sporadycznie lub jej brak.

2. Typ II – poziomy przekładańców iłowcowo-mułowcowo-piaskowcowych, z przewagą piaskowców. Piaskowce są na ogół drobnoziarniste, rzadziej drobno- i średnioziarniste. Charakterystyczną cechą tego typu jest obecność

Tabela 1

Miąższość poziomów zbiornikowych i semiekranych

Otwór	Miąższość całkowita (m)	I typ (m)	II typ (m)	Semiekrany (m)
Dębki 2	72	27	22	23
Białogóra 2	112	33	60	19
Piaśnica 2	120	33	49	38
Żarnowiec IG 4	73,5	15,5	23	35
Łeba 8	132,5	36	58,5	38
Hel IG 1	114	28	58	28
Kościerzyna IG 1	58	0	25	33

licznych ilasto-mułowcowych lamin i drobnych przeławień (5–10 cm). Poszczególne warstwy piaskowców, o miąższości nie przekraczającej 1–2 m, nierzadko cechują się dobrym wysortowaniem, będąc analogiczne do piaskowców I typu. Własności fizyczne tych skał i ich cechy zbiornikowe wykazują znaczną różnorodność w przekroju warstwy.

W analizowanych osadach wydzielono jeszcze jeden litologiczny typ warstw tzw. semiekrany, wykształcone w postaci serii mułowcowo-ilastych z przewarstwieniami, smugami i laminami piaskowców o miąższości od kilku centymetrów do 0,5 m. Charakteryzują się one bardzo niską porowatością (1–3%). Ten typ stanowi formę pośrednią, gdyż nie można go zakwalifikować ani do skał zbiornikowych, ani też do typowych warstw uszczelniających.

Rozkład miąższości typów litologicznych wydzielonych w profilu dla kilku wybranych otworów przedstawiono przykładowo w tab. 1.

POJEMNOŚĆ SKAŁ ZBIORNIKOWYCH

Omawiane piaskowce charakteryzują się dużą zmiennością porowatości. Przyczyn tego należy upatrywać w zróżnicowanym przestrzennym rozkładzie wydzielonych typów litologicznych, a w głównej mierze w procesie kwarcytyzacji (sylifikacji), przebiegającym tym intensywniej, im większa jest głębokość występowania tych utworów oraz im większą wykazują one niejednorodność litologiczną, uwarunkowaną procesami sedymentacji.

Bardzo ograniczony w wielu otworach pobór rdzenia, a także bardzo niski niekiedy jego uzysk, w znacznym stopniu ograniczyły możliwość zastosowania wyłącznie danych laboratoryjnych do kompleksowej charakterystyki własności zbiornikowych omawianych piaskowców. Wykorzystano więc pomiary geofizyki wiertniczej (profilowanie neutron–gamma) dla wyznaczenia współczynnika porowatości (k_p) w całym piaszczystym profilu kambru środkowego. W dalszych rozważaniach jako materiał podstawowy przyjęto oznaczenia porowatości metodą geofizyczną, traktując dane laboratoryjne jako wartości pomocnicze i weryfikujące.

Graficzne zobrazowanie regionalnych trendów zmian porowatości obliczonej metodą geofizyczną (średnie ważone) przedstawiono na fig. 1 i 2. Na

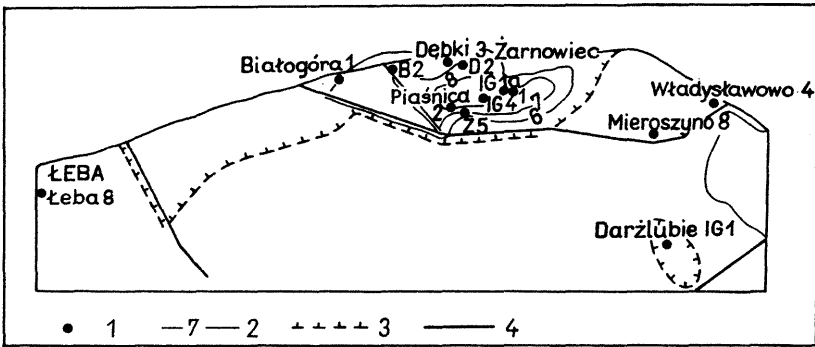


Fig. 1. Szkic porowatości poziomów zbiornikowych I typu litologicznego

Sketch of reservoir horizons porosity of lithological type I

1 – otwór wiertniczy, 2 izolinie porowatości (%), 3 – granica występowania poziomów zbiornikowych zgodna z izolinią porowatości 5%, 4 – główne strefy uskoku

1 – borehole, 2 – porosity isolines (%), 3 – boundary of occurrence of reservoir horizons consistent with 5% porosity isoline, 4 – main fault zones

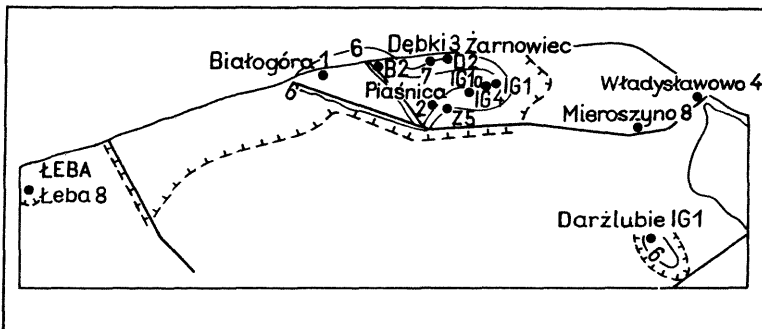


Fig. 2. Szkic porowatości poziomów zbiornikowych II typu litologicznego

Sketch of reservoir horizons porosity of lithological type II

Objaśnienia jak na fig. 1

Explanations as in Fig. 1

załączonych szkicach wykreślono jedynie izolinie porowatości o wartościach $> 5\%$. Tę graniczną wartość, pozwalającą zaliczyć poziomy piaskowce do poziomów zbiornikowych, określono na podstawie analizy własności zbiornikowych szeregu złóż radzieckich, podmorskich, złoża Dębki – Żarnowiec oraz charakterystyk przyływu wód wglębnych w opróbowanych otworach na wyniesieniu Łeby. Poziomy zbiornikowe I typu litologicznego cechują się średnią porowatością w granicach 5–9,16%, zaś II typu w granicach zaledwie 5–7,23%.

Porowatość w profilu otworów jest zmienna (tab. 2). Dla jej charakterystyki posłużono się wartościami najczęściej występującymi, wskazując jednocześnie na wartości maksymalne.

Przedstawione rezultaty dobitnie wykazują jak niskimi wartościami porowatości cechują się piaskowce kambru środkowego w badanym obszarze. Wartości regionalnego tła nie przekraczają właściwie 4–5%, a wszystkie wyższe wartości

Tabela 2

**Zmienność porowatości laboratoryjnej i geofizycznej
piaskowców środkowokambryjskich I i II typu**

Otwór	Porowatość wg badań laboratoryjnych (%)		Porowatość wg badań geofizycznych (k_p) (%)	
	wartości			
	najczęstsze	max.	najczęstsze	max.
Białogóra 1	1,5–3,0	7,0	1,5–2,5/6–6,5	8,0
Białogóra 2	1,5–2,5	9,5	1,0–3,0	8,0
Darżlubie IG 2	0–2,0/8,5–10	10,5	2,5–3/5,5–6	8,5
Dębki 2	2,7–6,5	10,8	3,5–6,0	11,5
Dębki 3	1,0–2,0	10,0	5,0–6,5	7,5
Gdańsk IG 1	0–1,5	2,7	1,0–2,5	4,5
Hel IG 1	1,0–4,0	9,5	2,0–3,0	5,0
Kościerzyna IG 1	0,3–0,5	3,0	1,5–2,0	5,0
Łeba 8	1,0–3,0	7,0	1,0–1,5/3–4,5	8,0
Mieroszyno 8	1,5–2,2	7,8	1,0–2,0	3,0
Niestępowo 1	2,0–3,0	5,3	1,5–3,0	5,5
Piaśnica 2	1,8–2,3/7,8–8,8	8,8	2,0–4,5	8,5
Smółdżino 1	1,4–1,6	3,5	1,0–1,5	3,0
Władysławowo 4	1,5–3,0	8,0	2,0–3,0	4,0
Żarnowiec IG1	0–3,5	10,0	–	–
Żarnowiec IG 1a	1,0–2,0	8,5	4,5–5/5,5–6	8,5
Żarnowiec IG 4	1,5–3,5/10,5–12	13,5	2,0–4,5/7–12	12,0
Żarnowiec 5	0–0,5/1,0–2,5	8,5	1,5–2,5	3,5

można traktować jako anomalne. Genezę ich należy wiązać z zachowaną porowatością pierwotną intergranularną, a także wtórną, utworzoną bądź to dzięki częściowemu rozpuszczaniu spoiwa, głównie węglanowego, bądź też przez mikroszczeliny.

Dla poglądowego zilustrowania tej zmienności posłużono się histogramami w ujęciu ilościowym (częstotliwościowym). Kilka przykładów zestawiono na fig. 3. Statystyczne porównanie obu porowatości i zweryfikowanie różnic przedstawiono w dalszej części artykułu.

CHARAKTERYSTYKA WŁASNOŚCI FILTRACYJNYCH

Własności filtracyjne środkowokambryjskich piaskowców wahają się w bardzo szerokim przedziale od 0 do 24 mD, przy przewadze wartości w przedziale 0–0,2 mD. Najwyższą przepuszczalność (10–20 mD) obserwuje się w piaskowcach I typu litologicznego, zwłaszcza w poziomach o zwiększonej miąższości (8–15 m). Ogólnie piaskowce II typu cechują się bardzo złymi własnościami filtracyjnymi <0,1 mD, sporadycznie osiągając 5 mD.

Do analizy własności filtracyjnych wykorzystano także wykresy histogramów częstotliwościowych (fig. 4), a podstawowe wyniki przedstawiono w tab. 3.

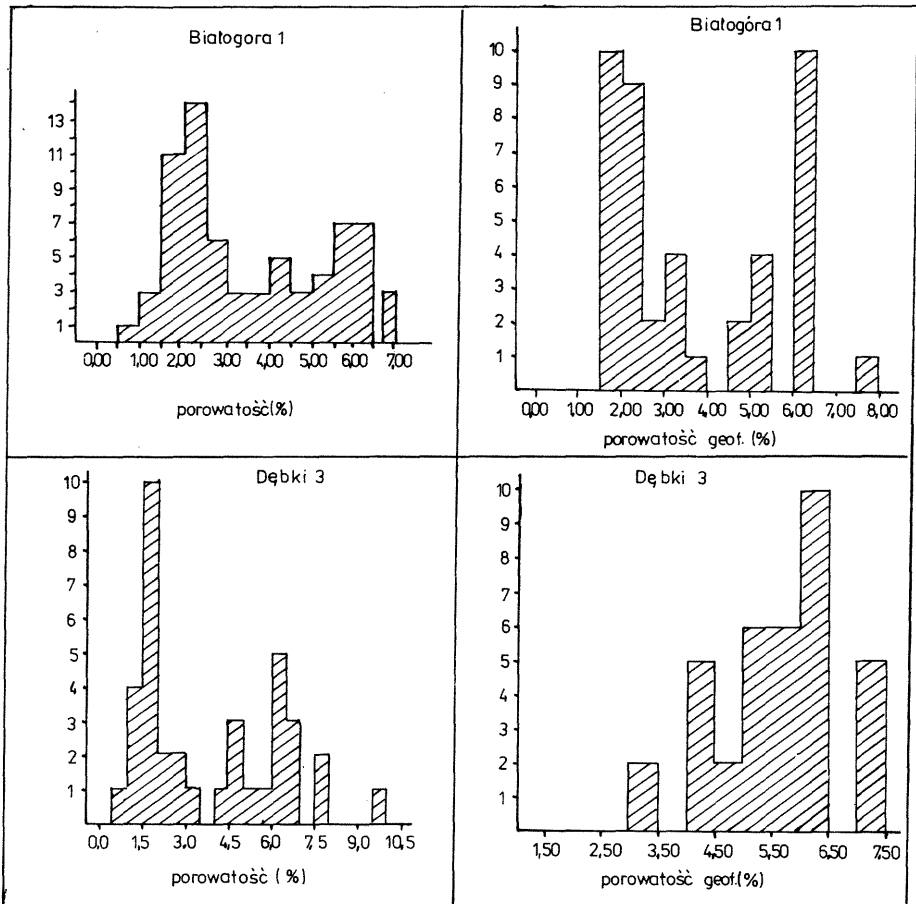


Fig. 3. Histogramy zmienności porowatości w wybranych otworach wiertniczych
 Histogrammes of variability of porosity in selected boreholes

ANALIZA STATYSTYCZNA WYBRANYCH PARAMETRÓW PETROFIZYCZNYCH

Łączny zbiór danych przyjętych do obliczeń statystycznych obejmował następujące ilości parametrów petrofizycznych piaskowców (z uwzględnieniem głębokości występowania każdej próbki): porowatość laboratoryjna (861 pomiarów), porowatość geofizyczna (566 pomiarów), przepuszczalność (646 pomiarów) i gęstość (441 pomiarów).

Obliczenia przeprowadzono na minikomputerze *IBM/PC-XT*. Należy tu wspomnieć, że była to pierwsza próba zastosowania tego aparatu do obliczeń geologicznych w BG Geonafta. Dla zobrazowania i przeanalizowania wzajemnych zależności (w jednym otworze) oraz rozkładu zmienności pojedynczego parametru wykorzystano program statystyczny *EPISAT*. Konstrukcja i for-

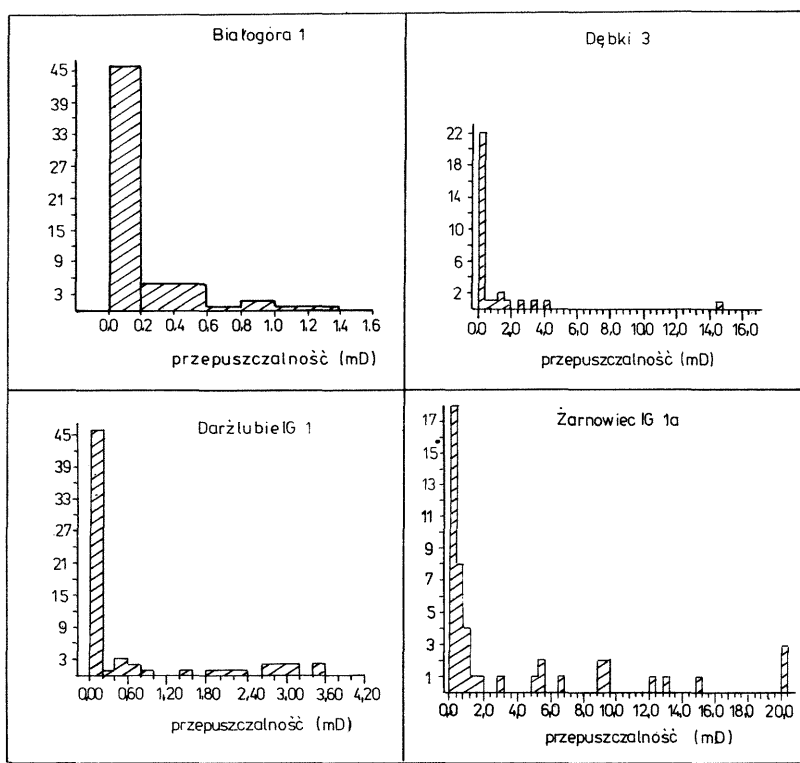


Fig. 4. Histogramy zmienności przepuszczalności w wybranych otworach wiertniczych
 Histogrammes of variability of permeability in selected boreholes

malne ograniczenia tego programu nie pozwoliły na przeprowadzenie łącznej analizy sumarycznego zbioru określonej zmiennej. Na przykład nie było możliwe zbadanie zależności między porowatością (laboratoryjną lub geofizyczną) a głębokością badanych próbek piaskowca w ujęciu regionalnym. W kolejnym etapie prac, po wprowadzeniu odpowiednich modyfikacji programu, przewiduje się przeprowadzenie takiej analizy.

Z bogatego pakietu testów i funkcji statystycznych programu EPISTAT wybrano:

- podprogram CORRELAT – obliczenie współczynnika korelacji liniowej Pearsona, z uwarunkowaniem równolicznych zbiorów par danych;
- podprogram SCATGRAM – badanie zależności między parami zmiennych losowych oraz wykreślenie regresji prostoliniowej, z uwarunkowaniem równolicznych zbiorów par danych;
- podprogram HISTOGRAM – analiza rozkładu pojedynczej zmiennej losowej;
- podprogram ANOVA – analiza wariancji jednoczynnikowej.

ANALIZA KORELACJI I REGRESJI

Z uwagi na możliwość zastosowania wyłącznie regresji prostoliniowej (ograniczenia programu) przeprowadzono najpierw obliczenia współczynnika

Tabela 3

Zmienność przepuszczalności piaskowców środkowokambryjskich

Otwór	Wartości	
	najczęstsze (mD)	max. (mD)
Białogóra 1	0-0,2	1,3
Białogóra 2	0-0,2	11,9
Darżlubie IG 1	0-0,2	3,5
Dębki 2	0-0,2	3,6
Dębki 3	0-0,4	14,6
Gdańsk IG 1	0-0,2/0,8-1,2	4,7
Hel IG 1	-	4,2
Kościierzyna IG 1	0-0,2	0,2
Łeba 8	0-0,4	1,3
Mieroszyno 8	0-0,1	7,4
Niestępowo 1	0,0	2,4
Piaśnica 2	0-0,4	22,1
Smółdzino 1	0-0,2	0,3
Władysławowo 4	0,0	0,2
Żarnowiec IG 1	0-0,2	0,2
Żarnowiec IG 1a	0-0,8	20,1
Żarnowiec IG 4	0-0,4	24,2
Żarnowiec 5	0,0	0,0

korelacji liniowej Pearsona (R), a następnie dla zależności charakteryzujących się istotną wartością współczynnika korelacji R wykreślono diagramy punktowe i wyznaczono linie regresji prostoliniowej. Do obliczeń przyjęto następujące zbiory danych, odpowiednio oznaczonych symbolami, porównując je kolejno parami: P_1 (głębokość, m), P_2 (porowatość laboratoryjna, %), P_3 (porowatość geofizyczna, %), P_4 (przepuszczalność, mD), P_5 (ciężar objętościowy – gęstość, G/cm^3).

Z przyczyn oczywistych nie badano zależności między P_2 i P_3 ; wzajemne porównanie tych zbiorów przeprowadzono metodą analizy wariancji.

Zweryfikowane statystycznie współczynniki korelacji liniowej R , za pomocą współczynnika istotności T-Studenta, przedstawiono w tab. 4. Zestawienie to wskazuje na znaczną ilość wykrytych istotnych zależności między przyjętymi do obliczeń parametrami. Niestety z uwagi na nierównomierną liczbę danych i wspomniane ograniczenia podprogramu CORRELAT, zakres przeprowadzonych obliczeń został bardzo zubożony. Omówienie każdej wykrytej zależności dla poszczególnych otworów przekracza ramy niniejszego opracowania i dlatego też autor ograniczył swoje rozważania do podania najbardziej istotnych wniosków nasuwających się przy analizie tego materiału.

A. W 11 otworach stwierdzono istotną zależność między głębokością występowania badanych próbek a ich porowatością laboratoryjną.

W dwóch przypadkach (Łeba 8, Żarnowiec 5) współczynnik korelacji ma wartość ujemną, a więc występuje zależność o charakterze funkcji malejącej (wzrost głębokości – spadek porowatości). W pozostałych ma on natomiast wartości dodatnie, a więc występuje zależność o charakterze funkcji rosnącej

Zweryfikowane współczynniki korelacji R na poziomie prawdopodobieństwa = 0,025

Otwór	Parametr	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Otwór	Parametr	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Otwór	Parametr	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Białogóra 1	P ₁₍₇₀₎ P ₂₍₇₀₎ P ₃₍₄₃₎ P ₄₍₆₁₎ P ₅₍₇₀₎	–	0,4963	0,4671	n.w.	– 0,4045	Dębki 3	P ₁₍₃₇₎ P ₂₍₃₇₎ P ₃₍₃₆₎ P ₄₍₃₁₎ P ₅₍₀₎	–	0,7875	–0,2771	n.w.	n.w.	Łeba 8	P ₁₍₃₀₎ P ₂₍₃₀₎ P ₃₍₄₉₎ P ₄₍₂₎ P ₅₍₀₎	–	– 0,7745	–0,1045	n.w.	n.w.
Białogóra 2	P ₁₍₅₆₎ P ₂₍₅₆₎ P ₃₍₄₂₎ P ₄₍₄₉₎ P ₅₍₅₆₎	–	0,3191	0,0463	n.w.	–0,2604	Gdańsk IG 1	P ₁₍₇₅₎ P ₂₍₇₅₎ P ₃₍₂₉₎ P ₄₍₆₈₎ P ₅₍₇₅₎	–	–0,2078	–0,3548	n.w.	0,2681	Mieroszyno 8	P ₁₍₁₁₎ P ₂₍₁₁₎ P ₃₍₃₃₎ P ₄₍₉₎ P ₅₍₁₁₎	–	0,3249	–0,2331	n.w.	–0,4082
Darżlubie IG 1	P ₁₍₆₉₎ P ₂₍₆₉₎ P ₃₍₃₂₎ P ₄₍₆₅₎ P ₅₍₆₆₎	–	0,5906	0,5724	n.w.	n.w.	Hel IG 1	P ₁₍₅₄₎ P ₂₍₅₄₎ P ₃₍₄₀₎ P ₄₍₇₎ P ₅₍₅₄₎	–	0,1561	0,4283	n.w.	– 0,1807	Niestępowo 1	P ₁₍₁₂₎ P ₂₍₁₂₎ P ₃₍₂₃₎ P ₄₍₇₎ P ₅₍₁₂₎	–	0,3309	–0,2154	n.w.	– 0,6727
Dębki 2	P ₁₍₂₁₎ P ₂₍₂₁₎ P ₃₍₂₄₎ P ₄₍₁₁₎ P ₅₍₀₎	–	0,4953	0,4975	n.w.	n.w.	Kościężyna IG 1	P ₁₍₁₅₎ P ₂₍₁₅₎ P ₃₍₁₅₎ P ₄₍₅₎ P ₅₍₁₅₎	–	0,2399	–0,3535	n.w.	0,2331	Piaśnica 2	P ₁₍₁₅₎ P ₂₍₁₅₎ P ₃₍₄₃₎ P ₄₍₁₅₎ P ₅₍₀₎	–	0,4679	0,1828	0,0433	n.w.
Smółdzino 1	P ₁₍₅₎ P ₂₍₅₎ P ₃₍₂₉₎ P ₄₍₃₎ P ₅₍₀₎	–	–0,4556	–0,8269	n.w.	n.w.	Żarnowiec 5	P ₁₍₃₃₎ P ₂₍₃₃₎ P ₃₍₄₂₎ P ₄₍₁₅₎ P ₅₍₃₂₎	–	–0,3456	–0,4315	n.w.	n.w.	Żarnowiec IG 1a	P ₁₍₅₈₎ P ₂₍₅₈₎ P ₃₍₂₀₎ P ₄₍₄₇₎ P ₅₍₀₎	–	0,6015	–0,1413	n.w.	n.w.
Władysławowo 4	P ₁₍₃₆₎ P ₂₍₃₆₎ P ₃₍₃₀₎ P ₄₍₁₂₎ P ₅₍₂₆₎	–	0,4438	0,3916	n.w.	– 0,4099	Żarnowiec IG 1	P ₁₍₅₃₎ P ₂₍₅₃₎ P ₃₍₀₎ P ₄₍₅₎ P ₅₍₂₄₎	–	0,3214	n.w.	n.w.	n.w.	Żarnowiec IG 4	P ₁₍₂₁₁₎ P ₂₍₂₁₁₎ P ₃₍₃₆₎ P ₄₍₂₁₁₎ P ₅₍₀₎	–	0,3429	–0,0791	0,2570	n.w.
						– 0,8693													0,8507	n.w.

Liczby wytuszczone – istotna wartość współczynnika korelacji;

(70) – liczba próbek w zbiorze

Tabela 5

**Wybrane współczynniki determinacji (dla istotnych wartości R)
w procentach**

Otwór	$P_1:P_2$	$P_1:P_3$	$P_1:P_4$	$P_1:P_5$	$P_2:P_4$	$P_2:P_5$
Białogóra 1	24,63	21,82	—	16,36	—	79,88
Białogóra 2	10,18	—	—	—	—	92,68
Darżlubie IG 1	34,88	57,24	—	—	—	—
Dębki 2	24,53	24,75	—	—	—	—
Dębki 3	62,01	—	—	—	—	—
Gdańsk IG 1	—	—	—	7,18	—	18,48
Hel IG 1	—	18,34	—	—	—	85,43
Kościerzyna IG 1	—	—	—	—	—	35,61
Łeba 8	59,98	—	—	—	—	—
Mioszyno 8	—	—	—	—	—	68,93
Niestępowo 1	—	—	—	45,25	—	—
Piaśnica 2	—	—	—	—	49,68	—
Smołdzino 1	—	68,37	—	—	—	—
Władysławowo 4	19,69	15,33	—	16,80	—	75,56
Żarnowiec IG1	10,32	—	—	—	—	—
Żarnowiec IG 1a	36,18	—	—	—	—	—
Żarnowiec IG 4	11,75	—	6,60	—	72,36	—
Żarnowiec 5	11,94	18,61	—	—	—	—

(wzrost głębokości — wzrost porowatości). Wydaje się to sprzeczne z ogólnie stwierdzanym spadkiem porowatości z głębokością, jednakże jest to potwierdzeniem znanego faktu, że stropowe partie piaskowców kambru środkowego są bardziej skwarcytyzowane niż dolne, które cechują się wyższymi porowatościami.

B. Tylko w 7 otworach stwierdzono istotną zależność między głębokością występowania a porowatością geofizyczną. W dwóch przypadkach (Smołdzino 1, Żarnowiec 5) współczynnik korelacji R ma wartości ujemne.

C. We wszystkich przeanalizowanych przypadkach stwierdzono bardzo istotną zależność o charakterze funkcji malejącej między porowatością laboratoryjną a gęstością.

D. Z powodu niewielkiej liczby obliczeń (4) trudno jest szczegółowo scharakteryzować zależność między głębokością a gęstością, jednak we wszystkich zbadanych przypadkach ma ona charakter funkcji malejącej, co — przy istnieniu odwrotnej zależności między porowatością laboratoryjną a gęstością (punkt C) — potwierdza wniosek przedstawiony w punkcie A.

E. Silna zależność między porowatością laboratoryjną a przepuszczalnością, statystycznie potwierdzona tylko w dwóch punktach (ograniczenia programowe), nie upoważnia do daleko idących wniosków (o istocie tego związku poniżej).

W celu lepszego zobrazowania liniowej zależności jednej zmiennej (y) od drugiej (x) posłużono się współczynnikiem determinacji $R^2 \cdot 100\%$. Określa on jaki procent zmienności wielkości y można przypisać różnicom w wielkości x (zależność od x) — tab. 5.

Przykładowe diagramy punktowe z wykreślonymi liniami regresji prosto-liniowej przedstawiono na fig. 5. Dla lepszego scharakteryzowania zależności porowatość laboratoryjna — przepuszczalność, przedstawionej na wydruku

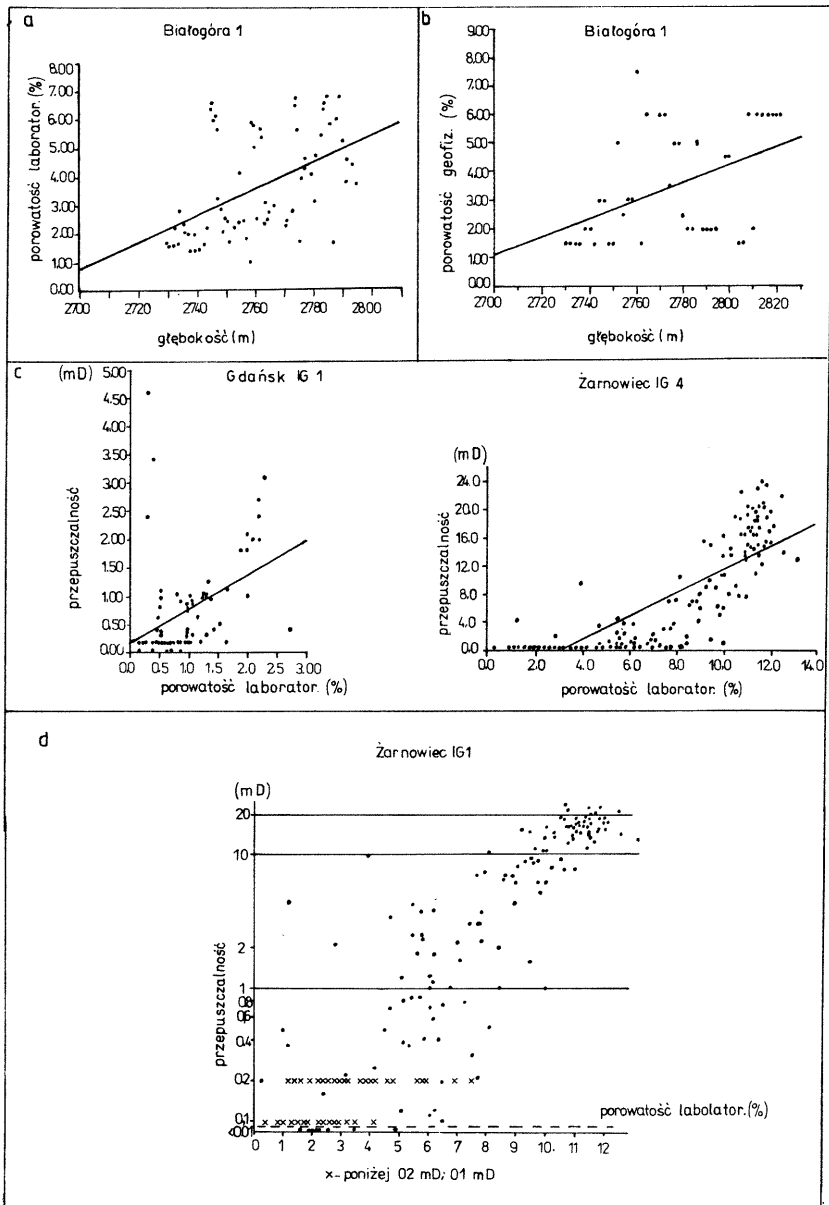


Fig. 5. Diagramy punktowe i regresja liniowa par wyróżnionych zbiorów: a – głębokość – porowatość laboratoryjna, b – głębokość – porowatość geofizyczna, c – porowatość laboratoryjna – przepuszczalność (komputerowy), d – porowatość laboratoryjna – przepuszczalność („ręczny”)

Punctual diagrams and linear regression of pairs of selected sets: a – depth – laboratory porosity, b – depth – geophysical porosity, c – laboratory porosity – permeability (computer), d – laboratory porosity – permeability (manual)

komputerowym w skali liniowej, dodatkową metodą, „ręczną”, wykreślono przykładowo diagram tej zależności w powszechnie stosowanej skali półlogarytmicznej.

Warto w tym miejscu przytoczyć niektóre wątki z obrad konferencji w Banff (Kanada) w 1986 r. na temat „Geologia i poznanie skał zbiornikowych” (P. Gretener, 1987). Uczestnicy zgodnie stwierdzili, że na podstawie rozważań teoretycznych nie można oczekiwać żadnej korelacji między porowatością a przepuszczalnością. Przepuszczalność jest proporcjonalna do kwadratu promienia kanałów por lub ich średnicy. Stąd gruboziarniste, dobrze wysortowane i dobrze obtoczone piaski (sferyczne ziarna o średnicy 1 mm) powinny mieć przepuszczalność 10^4 razy większą niż ility (średnica ziarn 0,01 mm), zbudowane z ziarn tego samego typu. W przypadku ścisłego i szczelnego upakowania – romboedryczne ułożenie ziarn – każdy materiał, który można przyrównać do sferycznych kul równej wielkości, będzie miał jednakową porowatość około 26%. Powszechnie znany jest fakt, że przepuszczalność jest silnie ukierunkowana; mierzona równoległe do uwarstwienia często jest większa od przepuszczalności pionowej o rzędy wielkości. Powstaje więc pytanie, czy tak złożona i wieloskładnikowa wielkość (tensor) może być pochodną pojedynczej wartości liczbowej (skalar)?

Mimo tych niejasności i wątpliwości, wykresy krzyżowe porowatość – logarytm przepuszczalności powszechnie stosowane w literaturze i praktyce przemysłu naftowego zostały przez uczestników w pełni zaakceptowane, jednakże nie przedstawiono żadnego konstruktywnego wyjaśnienia wspomnianych powyżej obaw. Fakt jednak pozostaje faktem, że w wielu przypadkach występuje taka zależność ze współczynnikiem korelacji mniejszym od 1, ale o wartościach pozwalających na jego uznanie za istotny. Zaproponowano następujące rozwiązanie tej zagadki. Bardzo często wzrostowi porowatości towarzyszy tendencja do wzrostu rozmiarów ziarn, mimo że teoretycznie porowatość nie zależy od ich wielkości. Większe rozmiary ziarn oznaczają oczywiście większe rozmiary kanałów (wolnych przestrzeni) między nimi, tak więc przepuszczalność będzie wzrastać z porowatością.

ANALIZA ROZKŁADU POJEDYNCZEJ ZMIENNEJ LOSOWEJ

Wyniki uzyskane dzięki zastosowaniu histogramów częstotliwościowych dla dwóch najważniejszych parametrów petrofizycznych: porowatości laboratoryjnej i geofizycznej oraz przepuszczalności przedstawiono wcześniej.

ANALIZA WARIANCJI

Dla statystycznego porównania dwóch zbiorów porowatości: laboratoryjnej i geofizycznej, pomierzonych w każdym otworze, zastosowano analizę wariancji jednoczynnikowej, wychodzącej z klasyfikacji opierającej się na jednej zmiennej niezależnej. Za jej pomocą możemy sprawdzić hipotezę zerową (H_0), dotyczącą równości wartości średnich obu zbiorów (M_1 – średnia porowatość laboratoryjna, M_2 – średnia porowatość geofizyczna), a tym samym i podobieństwa obu zbiorów. Wyniki tej analizy, oparte na zweryfikowanym statystycznie ilorazie wariancji na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ przedstawiono w tab. 6.

Z tabeli tej wynika, że tylko w przypadku czterech otworów hipoteza zerowa o równości średnich okazała się niesłuszna. Faktyczne różnice między nimi,

Tabela 6

Wyniki analizy wariancji

Otwór	M_1	M_2	$H_0: M_1 = M_2$
Białogóra 1	3,61071	3,48837	+
Białogóra 2	3,85392	3,33333	+
Darżlubie IG1	3,80921	3,56250	+
Dębki 2	4,39333	4,52083	+
Dębki 3	3,84216	5,36111	-
Gdańsk IG 1	0,94613	1,55172	-
Hel IG 1	2,77611	2,87500	+
Kościerzyna IG 1	0,78133	1,86666	-
Łeba 8	2,31866	2,58163	+
Mioszyno 8	2,36636	1,71212	+
Niestępowo 1	3,00083	2,36956	+
Piaśnica 2	5,52666	4,94186	+
Smołdzino 1	2,01600	1,31034	+
Władysławowo 4	2,34583	2,26666	+
Żarnowiec IG 1a	3,30000	4,87500	-
Żarnowiec IG 4	6,42175	5,50000	+
Żarnowiec 5	1,83333	1,86904	+

spowodowane błędem systematycznym, w przypadku otworu Dębki 3 należy przypuszczalnie wiązać z niedokładną oceną współczynnika porowatości (k_p) w zakresie niskich jego wartości, oraz roponośnością profilu, utrudniającą przeprowadzenie dokładnych obliczeń. W otworach Gdańsk IG 1 i Żarnowiec IG 1a analizowane zbiory były na tyle różne ilościowo, iż ich porównanie jest właściwie niemiarodajne. W otworze Kościerzyna IG 1 wyznaczone wartości współczynnika porowatości (k_p) są natomiast tak niskie, że mieszczą się w granicach błędu metody.

W przypadku kompleksu piaskowcowego kambru środkowego analiza wariancji w pełni potwierdziła możliwość stosowania oznaczeń porowatości metodą geofizyczną dla jego szczegółowej charakterystyki jako serii zbiornikowej i uzasadniła ich wykorzystanie w niniejszym artykule jako materiału podstawowego.

Biuro Geologiczne Geonafta
Warszawa, ul. Krucza 36
Nadesłano dnia 21 października 1988 r.

PIŚMIENNICTWO

- GRETENER P. (1987) — The national Conference on Earth Science. Banff. September 15—19 1986: Geology and Reservoir Management — Conference Report. Bull. Can. Petrol. Geol., 35, nr 3.
- LENDZION K. (1983) — Rozwój kambryjskich osadów platformowych Polski. Pr. Inst. Geol., 105.

Витольд ВАЙЛЬ

КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ПЕСЧАНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СРЕДНЕГО КЕМБРИЯ ЗОНЫ ЛЭБА – ЖАРНОВЕЦ В СВЕТЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Резюме

Очень важным, а иногда даже решающим условием ведения нефтяных поисковых работ в зоне Лэба – Жарновец, кроме структурного фактора, является знакомство пространственного распределения коллекторских свойств песчанистой серии среднего кембрия – главного перспективного и продуктивного горизонта. Отложения среднего кембрия состоят из двух частей. Нижнюю часть представляет монотонный комплекс аргиллитов и алевролитов мощности около 150 м. Верхний комплекс сложен кварцевыми песчаниками силифицированными в разной степени, чаще всего мелко- и среднезернистыми, хорошо окатанными, с прослойками аргиллитов и алевролитов. Его мощность колеблется в пределах 47,5–132,5 м.

В песчанистом комплексе выделены два литологических типа зернистых коллекторских горизонтов:

I тип – горизонты с относительно однородным внутренним строением представленные хорошо сортированными, немного заглиненными массивными и крупнослоистыми песчаниками.

II тип – горизонты сложенные аргиллитно-алевролитно-песчанистыми отложениями с перевесом песчанистых. Иногда отдельные прослойки песчаников мощности не более 1–2 м бывают подобны песчаникам I типа.

Для более полной характеристики коллекторских свойств песчаниковых серий, из-за малого количества кернового материала был использован геофизический коэффициент пористости (k_p) вычисленный из кривой нейтронного гамма – каротажа. Песчаники характеризуются низкими, но одновременно изменчивыми пористостями (таб. 2, фиг. 1–3). Было установлено, что предельная величина пористости, позволяющая причислить песчанистую серию к коллекторским горизонтам равняется 5%. Горизонты I типа отличаются величинами среднего взвешенного пористости в пределах 5–9,16%, II типа – 5–7,23%.

Фильтрационные свойства песчаников изменяются в широких пределах 0–24 миллидарси (таб. 3, фиг. 4). Самые высокие значения (10–20 миллидарси) были определены в песчаниках I типа, особенно в горизонтах с увеличенной мощностью. Песчаники II типа как правило отличаются очень низкой проницаемостью, меньше 0,1 миллидарси, только спорадически достигая 5 миллидарси.

Был проведен статистический анализ следующих петрофизических параметров (с учетом глубины залегания для каждого образца): лабораторная пористость, геофизическая пористость, проницаемость и плотность. Вычисления были проведены на миникомпьютере *IBM/PC/XT* с использованием готовой статистической программы ЭПИСТАТ. Конструкция и формальные ограничения этой программы не позволили провести общего анализа суммарного множества определенного параметра, а только его анализ в отдельной скважине.

Был проведен анализ корреляции регрессии отдельных пар параметров с применением коэффициента линейной корреляции Пирсона (R), тестуя его существенную величину на уровне правдоподобия $\alpha = 0,05^\circ$ (таб. 4), дополненную анализом распределения отдельной случайной переменной (параметра).

Для статистического сравнения двух множеств пористости был использован анализ однофакторной дисперсии. Это сделало возможной проверку равенства средних величин обеих множеств, а тем самым их сходства (таб. 6). Выказано, что в случае детальной характеристики кембрийского песчанистого комплекса как коллекторской серии – вполне

обоснованным и достоверным является применение определений пористости вычисленных геофизическим методом.

Witold WEIL

THE RESERVOIR PROPERTIES OF THE MIDDLE CAMBRIAN SANDSTONE DEPOSITS IN THE LĘBA – ŻARNOWIEC AREA IN THE LIGHT OF THE STATISTIC ANALYSIS

S u m m a r y

A very important or sometimes decisive condition to carry out oil exploration works in the Lęba – Żarnowiec area, besides a structural factor, is the knowledge of spatial distribution of the reservoir properties of the Middle Cambrian sandstone series – a main perspective and productive horizon. The Middle Cambrian formation is bipartite. The lower part represents monotonous claystone and siltstone complex with thickness about 150 m. The upper complex formed quartzitic sandstones with a various degree of silification, generally fine- and medium-grained, well rounded, interbedded and laminated with claystones and siltstones. Its thickness ranges from 47.5 to 132.5 m.

Two lithological types of granular reservoir horizons have been distinguished in the sandstone complex:

- type I – horizons with relatively homogenous interior structure representing well sorted, fine-grained, poorly clayey massive and thick-bedded sandstone,
- type II – horizons of interbedded claystones, siltstones and sandstones with sandstones domination. Sometime particular beds of sandstone with thickness not exceeding 1–2 m are analogous to the type I sandstone.

To complete the characteristic of reservoir properties of the sandstone series, due to poor quantity of core material, the geophysical coefficient (k_p) counted from the neutron – gamma logs was used. Sandstones are characterized by low various porosities (Tab. 2, Figs. 1–3). It has been stated that boundary value of porosity that permits to qualify the sandstone series to the reservoir horizons is 5%. Horizons of type I are characterized by values of mean weighted porosity varied from 5.0 to 9.16%; type II from 5.0 to 7.23%.

Permeability of sandstones vary in a wide interval from 0 to 24 mD (Tab. 3, Fig. 4). The highest values (10–20 mD) were stated in type I sandstones, especially in horizons with larger thickness. Type II sandstones generally are low permeable <0,1 mD, occasionally reaching 5 mD.

The statistic analysis comprised the following petrophysical parameters of sandstones (regarding the depth of occurrence for each sample): laboratory porosity, geophysical porosity, permeability and density. Calculations were carried out with the *IBM/PC-XT* microcomputer using EPISTAT – a ready statistic program. Structure and formal limitations of this program do not allow to carry out the cumulative analysis of the total set of the determined parameter, but only its analysis in a single borehole.

The analysis of correlation and regression of particular pair of parameters was done using the Pearson's linear correlation coefficient (R), testing its real value on the probability level $\alpha = 0,05$ (Tab. 4) supplemented by the analysis of single parameter random variable distribution.

To statistic comparison of two sets of porosity the unifactor variance analysis was used. It allowed to check the equality of mean value of both sets, thereby their similarity (Tab. 6). It was showed that in the case of detailed characteristics of the Cambrian sandstone complex as a reservoir series, is fully justifiable and reliable to use porosity determinations calculated from logs.