

## Analiza współczynnika ścisłości piaskowców o zróżnicowanych parametrach petrofizycznych w zmiennych warunkach ciśnień porowych i nadkładu

### Analysis of the pore volume compressibility of sandstones with different petrophysical parameters under variable pore and overburden pressure conditions

Krzysztof Nowak

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Współczynnik ścisłości przestrzeni porowej skał ma duże znaczenie dla szacowania objętości złóż węglowodorów. Próbkę przechowywaną w magazynach rdzeni ulegają relaksacji (spowodowanej zmianami ciśnienia i temperatury), co prowadzi do zawyżania mierzonej wielkości współczynnika porowatości w porównaniu z rzeczywistymi warunkami złożowymi. Brak uwzględnienia tego typu zmian w szacowaniu objętości złóż węglowodorów może doprowadzić do niewłaściwych wniosków dotyczących wartości złoża. Celem publikacji jest przedstawienie wpływu ciśnień na współczynnik ścisłości, a także znaczenia tego współczynnika w badaniach nad porowatością. Ze względu na dotychczasowy brak eksperymentalnych badań współczynnika ścisłości w Polsce celem pracy było również wskazanie możliwych dalszych kierunków badań pozwalających na lepsze poznanie tego zagadnienia. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań współczynnika ścisłości dla próbek 14 piaskowców o dobrych parametrach petrofizycznych w różnych ciśnieniach porowych i nadkładu. Analizowane próbki reprezentują piaskowce karpackie (10 próbek) oraz piaskowce dolnej jury Niziny Polskiej (4 próbki). Dla wszystkich próbek oznaczono parametry petrofizyczne, które zostały następnie użyte do sprawdzenia, czy istnieją zależności między nimi a ścisłością. Badania zmian przestrzeni porowej przeprowadzono na aparacie przystosowanym do pomiarów ścisłości porowej poprzez zadawanie odpowiednich ciśnień nadkładu i ciśnienia porowego. Pomiarów wykonywano dla ciśnienia porowego wynoszącego 300 psi, 1000 psi i 2000 psi przy maksymalnym ciśnieniu nadkładu 7000 psi, a jako medium wypełniającego przestrzeń porową użyto 5-procentowego roztworu NaCl. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano szereg danych dotyczących zmian ścisłości przestrzeni porowej oraz wyliczono współczynnik ścisłości  $C_{pc}$ . Wyniki pokazują, że porowatość przeanalizowanych próbek pod wpływem ciśnienia nadkładu zmniejsza się od jednego do kilku procent, a z opracowanych modeli zmian porowatości przy różnych ciśnieniach porowych wynika, że im mniejsza różnica między ciśnieniem nadkładu a porowym, tym mniejsza zmiana porowatości. W artykule wykazano też zależność pomiędzy porowatością a współczynnikiem ścisłości oraz wskazano kierunek dalszych prac nad tymi zagadnieniami.

**Słowa kluczowe:** ścisłość porowa, porowatość, piaskowiec, ciśnienie porowe, ciśnienie nadkładu, objętość porów.

**ABSTRACT:** The pore volume compressibility is important for estimating the volume of hydrocarbon fields. Samples stored in the core warehouses relax (due to pressure and temperature changes), which leads to overstating the measured value of the porosity factor in comparison to the actual deposit conditions. Failure to take into account such changes in the estimation of the volume of hydrocarbon fields may lead to incorrect conclusions regarding the value of the field. The aim of the publication is to present the influence of pressures on the pore volume compressibility as well as its importance in research on porosity. Due to the lack of experimental studies of the pore volume compressibility in Poland so far, the aim of the work was also to indicate possible further directions of research allowing for a better understanding of this issue. The paper presents the results of the pore volume compressibility tests for samples of 14 sandstones with good petrophysical parameters under different pore and overburden pressures. The analyzed samples represent Carpathian sandstones and Lower Jurassic sandstones of the Polish Lowland. Petrophysical parameters were determined for all samples and then used to check the relationship between them and compressibility. The research on changes in the pore space was carried out using the apparatus adapted to the pore compressibility measurements by assigning appropriate overburden and pore pressure. Measurements were made at pore pressures of 300, 1000 and 2000 psi with a maximum overburden pressure of 7000 psi, and a 5% NaCl solution was used as the pore-filling medium. As a result of the research, a number of data on changes in the compressibility of the pore space was obtained

Autor do korespondencji: K. Nowak, e-mail: [nowakk@inig.pl](mailto:nowakk@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 07.03.2022 r. Zatwierdzono do druku: 04.07.2022 r.

and the compressibility factor  $C_{pc}$  was calculated. The results show that the porosity of the analyzed samples under the influence of the overburden pressure decreases from one to several percent. The developed models of porosity changes at different pore pressures show that the smaller the difference between the overburden pressure and the pore pressure, the smaller the change in porosity. The article shows the relationship between porosity and compressibility of the pore space and indicates the direction of further work on these issues.

Key words: pore compressibility, porosity, sandstone, pore pressure, overburden pressure, pore volume.

### Wstęp

Zagadnienie ściśliwości przestrzeni porowej piaskowców jest znane już od dawna (Carpenter i Spencer, 1940; Hall, 1953; Fatt, 1958). Szeroko omawia się je w podręcznikach dotyczących inżynierii i geologii naftowej (Zimmerman, 1990; Jaeger et al., 2007; McPhee et al., 2015), jak również w artykułach, dążących do coraz lepszego poznania tego zjawiska (Zimmerman, 1986; Bernabé et al., 1994; Wong i Baud, 1999; Jalalh, 2006a, 2006b; Alok Bakhtiari, 2011; Schutjens i Heidung, 2012; da Silva et al., 2015; de Oliveira et al., 2016; Weibo et al., 2020). W ostatnich latach rozpoczęto badania dotyczące ściśliwości w złożach niekonwencjonalnych, w których skałą zbiornikową są łupki czy też węgle (Lan et al., 2017; Zhang et al., 2018; Hou et al., 2019).

Mimo tylu prac wciąż nie są dobrze poznane zależności pomiędzy współczynnikiem ściśliwości a innymi parametrami skał złożowych.

Prezentowana praca ma na celu zbadanie współczynnika ściśliwości piaskowców z najstarszej polskiej prowincji naftowej oraz skał uznanych za potencjalne zbiorniki wód geotermalnych. Praca ta jest również próbą określenia zależności pomiędzy zmianami ściśliwości a parametrami przestrzeni porowej, uzyskanymi z badań porozymetrycznych. Dodatkowo w pracy zaprezentowane zostały modele zmian ściśliwości utworzone na podstawie przeprowadzonych pomiarów.

Artykuł ten pełni rolę demonstracyjną – ma za zadanie ukazanie zagadnienia ściśliwości przestrzeni porowej i możliwych dalszych kierunków badań.

### Pojęcie ściśliwości

Ściśliwość w najogólniejszej jej definicji jest miarą podatności na odwracalną zmianę objętości pod wpływem ciśnienia (ściskania) (Zimmerman, 1990). W przypadku skał mamy do czynienia z całkowitą ściśliwością skały ( $C_t$ ), opisywaną wzorem (Cicha-Szot, 2018):

$$C_t = S_o C_o + S_w C_w + S_g + C_g + C_p \quad (1)$$

gdzie:

$S_o, S_w, S_g$  – odpowiednio nasycenie ropą, wodą i gazem,  
 $C_o, C_w, C_g$  – odpowiednio ściśliwość ropy, wody i gazu,  
 $C_p$  – ściśliwość formacji złożowej.

Na ściśliwość ośrodka skalnego składają się trzy typy ściśliwości:

- 1) ściśliwość objętościowa  $C_b$ , będąca zmianą objętości skały pod wpływem ciśnienia;
- 2) ściśliwość ziarnowa  $C_r$ , będąca zmianą objętości ziaren;
- 3) ściśliwość przestrzeni porowej  $C_p$ , opisująca zmiany w objętości przestrzeni porowej.

Na powyższe ściśliwości oddziałują dwa rodzaje ciśnień:

- 1) ciśnienie porowe  $P_p$ , będące ciśnieniem wytworzonym przez medium (ropa, woda, gaz), znajdujące się w porach skalnych;
- 2) ciśnienie nadkładu  $P_c$ , będące sumą ciśnień wywołanych przez górotwór.

Oprócz tego występuje kilka objętości:

- objętość skały (ang. *bulk volume*), oznaczana jako  $V_b$ ;
- objętość porowa ( $V_p$ );
- ich różnica daje objętość szkieletową ( $V_r$ ).

W badaniach laboratoryjnych przy użyciu podanych wcześniej danych można wyliczyć współczynniki ściśliwości (Zimmerman, 1990; Schutjens i Heidung, 2012; Cicha-Szot, 2018):

- $C_{bc}$  – opisuje ściśliwość szkieletu pod wpływem zmian ciśnienia nadkładu przy stałym ciśnieniu porowym;

$$C_{bc} = \frac{-1}{V_b} \left( \frac{dV_b}{dP_c} \right)_{\Delta P_p=0} \quad (2)$$

gdzie:

$V_b$  – objętość skały,  
 $P_c$  – ciśnienie nadkładu,  
 $P_p$  – ciśnienie porowe (constans);

- $C_{bp}$  – zmiana objętości skały w wyniku zmian ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu nadkładu;

$$C_{bp} = \frac{-1}{V_b} \left( \frac{dV_b}{dP_p} \right)_{\Delta P_c=0} \quad (3)$$

gdzie:

$V_b$  – objętość skały,  
 $P_p$  – ciśnienie porowe,  
 $P_c$  – ciśnienie nadkładu;

- $C_{pc}$  – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia nadkładu przy stałym ciśnieniu porowym;

$$C_{pc} = \frac{-1}{V_p} \left( \frac{dV_p}{dP_c} \right)_{\Delta P_p=0} \quad (4)$$

gdzie:

$V_p$  – objętość porowa,  
 $P_c$  – ciśnienie nadkładu,  
 $P_p$  – ciśnienie porowe;

- $C_{pp}$  – zmiana objętości porowej w wyniku zmian ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu nadkładu;

$$C_{pp} = \frac{-1}{V_p} \left( \frac{dV_p}{dP_p} \right)_{\Delta P_c=0} \quad (5)$$

gdzie:

$V_p$  – objętość porowa,  
 $P_p$  – ciśnienie porowe,  
 $P_c$  – ciśnienie nadkładu.

Dodatkowo występuje ściśliwość ziarnowa  $C_r$ , wyrażona wzorem:

$$C_r = \frac{-1}{V_r} \left( \frac{dV_r}{dP} \right)_{\Delta P_c=\Delta P_p} \quad (6)$$

gdzie:

$V_r$  – objętość ziarnowa,  
 $P$  – ciśnienie oddziałujące na szkielet ziarnowy,  
 $P_c$  – ciśnienie nadkładu,  
 $P_p$  – ciśnienie porowe.

Ściśliwość ziarnowa jest wartością niską (dla piaskowców wynosi około  $0,16 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$  ( $0,023 \cdot 10^{-6} \text{ kPa}^{-1}$ ). W przypadku złóż o dużej porowatości, gdzie przyjmuje się, że parametry  $C_{bc}$ ,  $C_{bp}$ ,  $C_{pc}$  oraz  $C_{pp}$  są równe (McPhee et al., 2015; Cicha-Szot, 2018), jest ona często pomijana. Jednakże Schutjens i Heidung (2012) wskazują, że nieuwzględnienie współczynnika ściśliwości ziarnowej może prowadzić do błędów w oszacowaniu ściśliwości.

Pomiędzy powyższymi parametrami, przy znajomości porowatości i elastyczności ośrodka, można wyznaczyć zależności:

$$C_{bp} = C_{bc} - C_r \quad (7)$$

$$C_{pc} = \left[ \frac{C_{bc} - C_r}{\phi} \right] \quad (8)$$

oraz

$$C_{pp} = \left[ \frac{C_{bc} - (1 + \phi)C_r}{\phi} \right] \quad (9)$$

gdzie:

$C_{bp}$  – zmiana objętości skały w wyniku zmian ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu nadkładu,  
 $C_{bc}$  – zmiana objętości szkieletu pod wpływem zmian ciśnienia nadkładu przy stałym ciśnieniu porowym,

$C_r$  – zmiana objętości szkieletu ziarnowego,  
 $C_{pc}$  – zmiana objętości porowej pod wpływem zmian ciśnienia nadkładu przy stałym ciśnieniu porowym,  
 $C_{pp}$  – zmiana objętości porowej w wyniku zmian ciśnienia porowego przy stałym ciśnieniu nadkładu,  
 $\phi$  – porowatość.

Ostatnim czynnikiem wpływającym na ściśliwość przestrzeni porowej jest ściśliwość płynu ( $C_f$ ) wypełniającego pory. Jest to podobnie jak w przypadku innych ściśliwości zmiana objętości w wyniku zmiany ciśnienia. Zmiany są tutaj stosunkowo niewielkie, zależne od temperatury i składu płynu (Koszela-Marek, 2009; Cicha-Szot, 2018). Ściśliwość płynu przedstawia się w formie wzoru:

$$C_f = \frac{dV}{dP} \cdot 1 \quad (10)$$

gdzie:

$V$  – objętość płynu,  
 $P$  – ciśnienie oddziałujące na płyn.

## Metodyka badań

W pracy analizowane były próbki piaskowców pochodzące z dwóch rejonów. W pierwszej grupie znalazły się cztery piaskowce dolnojurańskie (Toruń TG-2) z Niżu Polskiego, charakteryzujące się szkieletem ziarnowym złożonym w 99% z ziaren kwarcu i bardzo małym udziałem spoiwa (<1%). Druga grupa składała się z 10 próbek piaskowców karpaccich o zróżnicowanym składzie mineralnym z przewagą kwarcu. Reprezentowały one piaskowce ciężkowickie i istebniańskie.

Wszystkie próbki poddano identycznej procedurze badawczej. Z rdzenia wiertniczego odwiercono walczyki o średnicy 2,54 cm, z odciętych końcówek przygotowano próbki na badania petrofizyczne i petrograficzne. Z analiz porozymetrii helowej otrzymano parametry gęstości szkieletowej. Z badań MICP uzyskano gęstość objętościową, porowatość całkowitą, średnią kapilarę, powierzchnię właściwą, rozkład wielkości porów, średnicę progową i histerezę (tabele 1 i 2).

Otrzymane rdzenniki poddano najpierw badaniom przepuszczalności na przepuszczalnościomierzu gazowym w celu uzyskania danych dotyczących przepuszczalności absolutnej, a następnie badaniu ściśliwości przestrzeni porowej na aparacie DCI RCS.

Badanie ściśliwości przestrzeni porowej opiera się na pomiarze ilości zatłoczonej lub wytłoczonej z porów skalnych solanki w danym ciśnieniu nadkładu i porowym. Znając początkową porowatość i objętość całej próbki, można wyliczyć początkową objętość porów w próbce. Następnie, porównując ją do ilości

solanki, która została zatłoczona lub wytłoczona z nasączonego nią rdzennika pod wpływem zadanego ciśnienia, oblicza się, o ile zmieniła się objętość przestrzeni porowej w skale.

W badaniach ścisłości przestrzeni porowej stosuje się próbki w formie walczyków o średnicy około 2,54 cm i długości do 4 cm. Suche rdzenniki umieszcza się w komorze próżniowej, gdzie zostają odgazowane i nasączone solanką. Następnie próbkę sezonuje się w solance w celu wypełnienia

całej przestrzeni porowej (dla celów badania przyjęto jeden tydzień). Tak przygotowane próbki wkłada się do gumowej tulei, którą umieszcza się w cylindrycznej komorze. Następnie za pomocą pompy przepłukuje się układ odpowiadający za zadawanie ciśnienia nadkładu. Podobnie, przy użyciu tego samego medium, którym nasączone próbkę, przepłukuje się układ odpowiadający za zadawanie ciśnień porowych oraz samą próbkę. Ma to na celu usunięcie pozostałego w układzie gazu.

**Tabela 1.** Wyniki badań petrofizycznych

**Table 1.** Results of petrophysical testing

Numer próbki	Otwór	Głębokość [m]	Porowatość		Gęstość		Powierzchnia właściwa [m <sup>2</sup> /g]	Średnica	
			efektywna	całkowita	objętościowa	szkieletowa		wejścia	progowa
			[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]		[μm]	[μm]
1	D-1	1107,72	8,92	12,33	2,33	2,65	0,23	23,00	9,00
2	D-1	1372,32	10,43	11,98	2,36	2,68	1,10	12,00	4,90
3	R-1	1828,95	8,74	11,09	2,35	2,64	0,72	31,00	18,00
4	D-4K	1364,05	10,33	12,72	2,34	2,68	0,72	12,00	6,10
5	S-17	1312,05	12,73	15,13	2,25	2,66	0,63	20,00	12,00
6	S-17	2025,70	4,95	6,87	2,49	2,68	0,32	6,00	3,80
7	S-17	2057,10	9,25	12,50	2,07	2,72	0,69	13,00	5,90
8	S-29	2083,55	4,10	3,65	2,55	2,65	0,49	5,00	3,20
9	S-17	2117,70	8,89	9,80	2,39	2,65	0,39	12,00	3,80
10	S-29	2082,40	6,33	8,19	2,44	2,66	0,32	4,90	2,50
11	TG-2	1803,35	26,60	30,70	1,88	2,71	0,05	141,00	46,00
12	TG-2	1808,68	26,20	29,00	1,91	2,70	0,03	144,00	72,00
13	TG-2	2126,26	22,90	23,90	2,01	2,66	0,16	46,00	31,00
14	TG-2	2133,00	23,70	26,30	1,96	2,68	0,12	72,00	45,00

**Tabela 2.** Wyniki badań petrofizycznych

**Table 2.** Results of petrophysical testing

Numer próbki	Otwór	Głębokość [m]	Megapory	Makropory	Mezopory	Mikropory	Nanopory	Przepuszczalność całkowita [mD]
			[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
19374	D-1	1107,72	3,92	50,03	25,50	18,29	2,26	1,40
19376	D-1	1372,32	0,00	41,21	28,99	18,30	11,51	0,89
19620	R-1	1828,95	11,96	37,35	22,57	19,42	8,70	0,50
19712	D-4K	1364,05	0,00	44,69	21,52	22,30	11,49	2,24
19703	S-17	1312,05	6,05	62,69	14,90	10,83	5,52	4,16
19680	S-17	2025,70	0,00	19,27	41,61	27,24	11,89	0,28
19681	S-17	2057,10	0,56	45,44	27,72	17,54	8,75	2,01
19710	S-29	2083,55	0,00	2,92	43,09	34,60	19,39	0,28
19686	S-17	2117,70	0,00	43,64	30,16	19,20	7,00	3,80
19709	S-29	2082,40	0,00	7,54	62,79	21,98	7,69	0,16
21080	TG-2	1803,35	91,60	6,00	1,80	0,60	0,00	262,80
21081	TG-2	1808,68	94,00	4,50	1,30	0,20	0,00	268,20
21082	TG-2	2126,26	78,20	13,30	5,20	2,60	0,60	340,50
21083	TG-2	2133,00	85,00	9,00	3,70	1,90	0,40	173,50

W wypadku mniej przepuszczalnych próbek, solankę przetłacza się przy minimalnych ciśnieniach okólnych (około 100 psi) w celu wymuszenia przepływu przez próbkę. Po kilkakrotnym przepłukaniu układów zadaje się minimalne ciśnienia nadkładu i porowe (ciśnienie nadkładu powinno być zawsze większe od porowego). Następnie do programu sterującego wprowadza się dane próbki: numer identyfikacyjny, wymiary, objętość porową i krzywą kalibracyjną, odpowiednią dla solanki używanej w badaniach. W warunkach minimalnych ciśnień (50 psi ciśnienia porowego i 300 psi ciśnienia nadkładu) wyznacza się wartość początkową (ang. *zero stress condition*), będącą punktem odniesienia dalszych pomiarów. Następnie zwiększa się ciśnienie nadkładu i porowe do wartości docelowej. Po każdej zmianie ciśnienia należy odczekać do ustabilizowania się próbki (warunków ciśnieniowych) i pobrania kilku punktów pomiarowych. Następnie, przed pomiarem w innych warunkach, próbki powinny trafić z powrotem do naczynia z solanką w celu relaksacji.

W przypadku omawianych badań ścisłości za medium przyjęto solankę 5% NaCl, będącą możliwie uniwersalnym medium pozwalającym na badanie próbek pochodzących z różnych lokalizacji, jak i o różnym składzie mineralnym.

Ścisłość mierzono przy określonym ciśnieniu porowym (300 psi) i ciśnieniu nadkładu wzrastającym co 500 psi do maksymalnego ciśnienia 7000 psi.

Zastosowana procedura miała za zadanie wyznaczyć zmianę ścisłości wraz ze wzrostem ciśnienia nadkładu i zachowania próbki w wysokich ciśnieniach. Nawet bez znajomości dokładnych ciśnień nadkładu panujących na danej głębokości tak szeroki zakres badania pozwala na późniejsze znalezienie punktu odpowiadającego warunkom z danej głębokości. Dodatkowo przebadano kilka próbek w wyższych ciśnieniach porowych (1000 i 2000 psi).

### Wyniki badań ścisłości przestrzeni porowej

Badania ścisłości porowej przeprowadzono na 14 próbkach piaskowców przy ciśnieniu porowym 300 psi i maksymalnym ciśnieniu nadkładu 7000 psi. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

W kolumnie nr 4 tabeli 3 podana jest początkowa porowatość efektywna otrzymana z badań porozymetrycznych. W następnej kolumnie, nr 5, znajduje się początkowa objętość

**Tabela 3.** Wyniki dotyczące ścisłości uzyskane na aparacie DCI RCS (kolory w kolumnach pokazują zmiany w wartościach od najniższych (czerwone) do najwyższych (zielone))

**Table 3.** Compressibility results tested using the DCI RCS apparatus (colors in columns show changes in values from lowest (red) to highest (green))

Numer próbki	Otwór	Głębokość	Porowatość	Objętość porowa	Zmiana porowatości	Porowatość przy 7000 psi	Objętość porowa przy 7000 psi	Różnica w porowatości	Różnica w objętościach porowych	Współczynnik ścisłości $C_{pc}$ przy 7000 psi
		[m]	[%]	[ml]	[%]	[%]	[ml]	[%]	[ml]	[10 psi ( $10^{-5}$ 1/psi)]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	D-1	1107,72	8,92	3,07	-11,80	7,87	2,71	1,05	0,36	1,70
2	D-1	1372,32	10,43	3,37	-11,93	9,19	2,97	1,24	0,40	1,70
3	R-1	1828,95	8,74	1,79	-21,50	6,86	1,39	1,88	0,40	3,12
4	S-17	2025,70	4,95	1,33	-25,85	3,67	0,99	1,28	0,34	3,69
5	S-17	2057,10	9,25	2,29	-19,46	7,45	1,85	1,80	0,45	2,78
6	S-17	2117,70	8,89	2,24	-14,15	7,64	1,92	1,26	0,32	2,02
7	S-17	1312,05	12,73	0,54	-16,71	10,60	0,46	2,13	0,07	2,42
8	S-29	2082,40	6,33	1,38	-22,22	4,92	1,07	1,41	0,31	3,17
9	S-29	2083,55	4,10	0,86	-23,92	3,12	0,69	0,98	0,18	3,41
10	D-4K	1364,05	10,33	2,17	-14,93	8,60	1,84	1,73	0,32	2,17
11	TG-2	1803,35	26,60	6,36	-10,66	23,76	5,68	2,84	0,68	1,59
12	TG-2	1808,68	26,20	5,21	-15,00	22,27	4,43	3,93	0,78	2,14
13	TG-2	2126,26	22,90	5,37	-9,24	20,78	4,87	2,12	0,50	1,32
14	TG-2	2133,00	23,70	5,16	-10,38	21,24	4,62	2,46	0,54	1,48

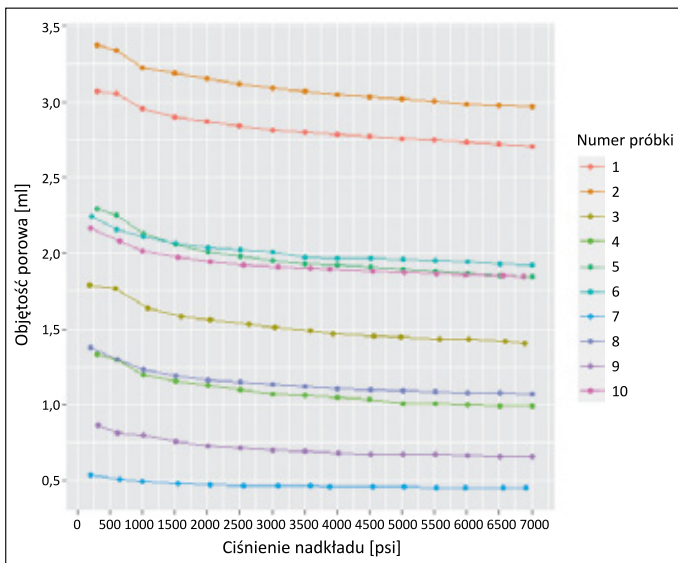
przestrzeni porowej podana w mililitrach, obliczona na podstawie objętości rdzenia i porowatości.

W kolejnych kolumnach zamieszczono zmiany w objętości przestrzeni porowej (kolumna nr 6), pokazujące, o ile procent zmniejszyła się porowatość względem wartości początkowej. W kolumnach nr 7 i 8 podano, ile wynosi objętość porowa pod 7000 psi ciśnienia nadkładu, a w następnych kolumnach (nr 9 i 10) – ile wynoszą różnice pomiędzy początkowymi i końcowymi objętościami przestrzeni porowej.

W kolumnie nr 11 zamieszczono wyliczony współczynnik ściśliwości  $C_{pc}$ .

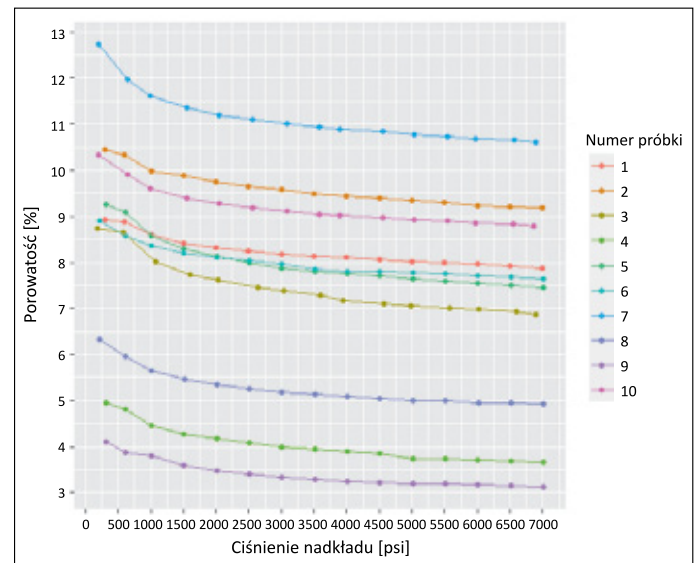
Warto zwrócić tutaj uwagę na zmianę objętości porów skalnych w procentach (kolumna 6) i na to, jak się ona przekłada na różnice w objętościach przestrzeni porowej (kolumny 9 i 10). Próbki o niskich porowatościach (<5%) pomimo znacznego spadku objętości porowej (25%) wciąż tracą mniej objętości porów niż próbki o dużej porowatości początkowej, ale mniejszej ściśliwości (np. próbki 11–14).

Na rysunkach 1 i 2 zaprezentowano zmianę ściśliwości (ukazaną jako zmianę objętości porowej w mililitrach) wraz ze wzrostem ciśnienia nadkładu (przy stałym ciśnieniu porowym wynoszącym 300 psi). Widać tutaj, że największe zmiany



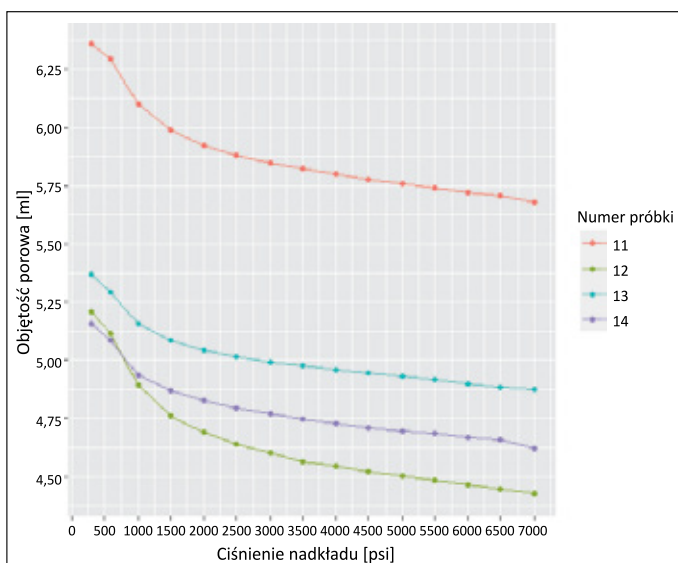
**Rysunek 1.** Zmiany objętości porowej próbek piaskowców karpacckich pod wpływem ciśnienia nadkładu

**Figure 1.** Changes in the pore volume of Carpathian sandstone samples under the influence of the overburden pressure



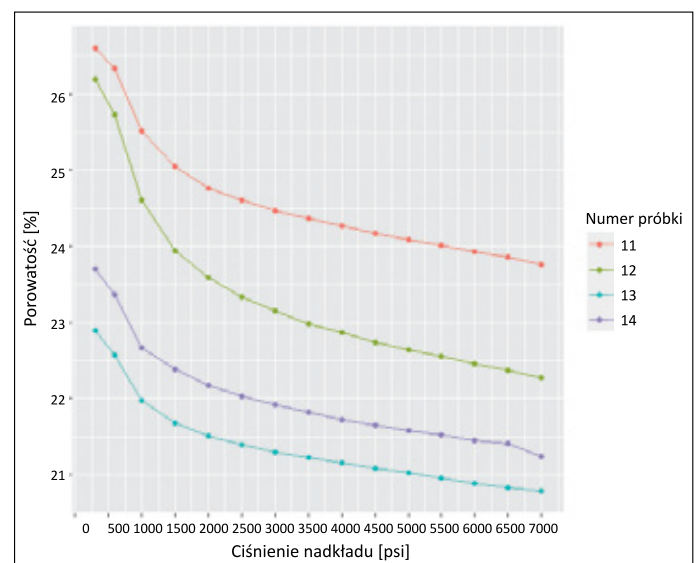
**Rysunek 3.** Zmiany porowatości próbek piaskowców karpacckich pod wpływem ciśnienia nadkładu

**Figure 3.** Changes in porosity of Carpathian sandstone samples under the influence of overburden pressure



**Rysunek 2.** Zmiany objętości porowej próbek piaskowców dolnojurajskich pod wpływem ciśnienia nadkładu

**Figure 2.** Changes in the pore volume of Lower Jurassic sandstone samples under the influence of the overburden pressure

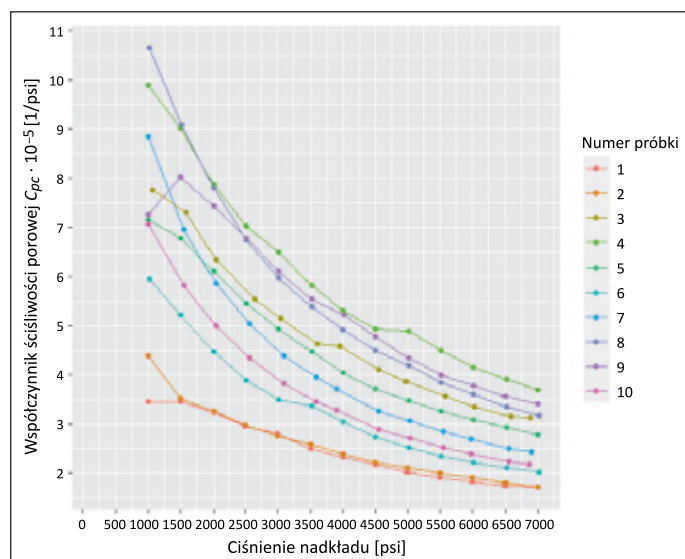


**Rysunek 4.** Zmiany porowatości próbek piaskowców dolnojurajskich pod wpływem ciśnienia nadkładu

**Figure 4.** Changes in porosity of Lower Jurassic sandstone samples under the influence of overburden pressure

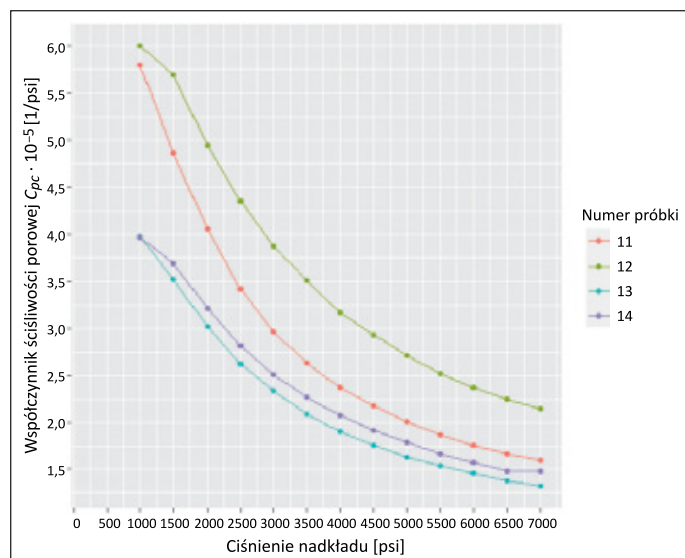
w przestrzeni porowej obserwuje się przy niższych ciśnieniach okólnych (w zakresie 500–1500 psi). Wraz ze wzrostem ciśnień krzywe zaczynają się wyplaszczać. Podobny trend można zaobserwować na rysunkach 3 i 4.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zmiany współczynnika ściśliwości  $C_{pc}$ . Współczynnik ten jest powszechnie zestawiany z porowatością. Widać tutaj, że próbki wykazują podobny trend jak na wcześniej pokazanych wykresach.



**Rysunek 5.** Zmiany współczynnika ściśliwości  $C_{pc}$  dla próbek piaskowców karpacckich pod wpływem zmian ciśnienia nadkładu przy ciśnieniu porowym 300 psi

**Figure 5.** Changes in the pore volume compressibility  $C_{pc}$  for Carpathian sandstone samples due to changes in the overburden pressure for the pore pressure of 300 psi



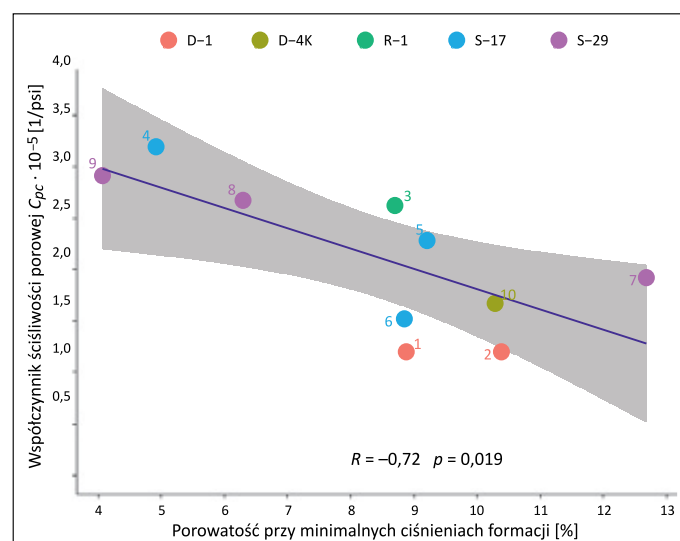
**Rysunek 6.** Zmiany współczynnika ściśliwości  $C_{pc}$  dla próbek piaskowców dolnojurańskich pod wpływem zmian ciśnienia nadkładu przy ciśnieniu porowym 300 psi

**Figure 6.** Changes in the pore volume compressibility  $C_{pc}$  for Lower Jurassic sandstone samples due to changes in the overburden pressure for a pore pressure of 300 psi

## Związek ściśliwości z porowatością

Po zakończeniu badań uzyskane wyniki ściśliwości porówano z danymi parametrami petrofizycznymi. W większości przypadków nie uzyskano wyraźnej korelacji pozwalającej na jednoznaczne stwierdzenie zależności pomiędzy parametrami petrofizycznymi a ściśliwością. Należy tutaj zwrócić uwagę, że działano na dosyć małej liczbie próbek pochodzących z dwóch odrębnych rejonów i z różnych otworów. Jednym z bardziej miarodajnych wyników, ważnym ze względów złożowych, potwierdzonym również przez innych autorów, był związek pomiędzy porowatością a ściśliwością (Hall, 1953; Jalalh, 2006a, 2006b).

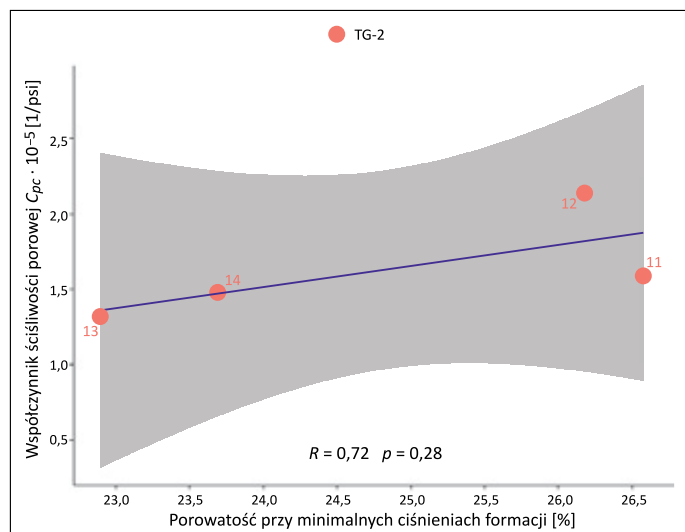
W przypadku próbek piaskowców karpacckich porowatość wykazuje dobrą korelację ze współczynnikiem ściśliwości (rysunek 7). Jak wynika z wykresów, im większa porowatość, tym mniejsza zmiana objętości porowej. Jest to chyba najważniejsza obserwacja, którą potwierdza część autorów (Jalalh, 2006a). Próbki karpacckie, charakteryzujące się generalnie niższą porowatością początkową, są bardziej podatne na wzrost ciśnienia nadkładu niż próbki o większej porowatości. Odwrotny trend można obserwować w przypadku próbek dolnojurańskich, których ściśliwość rośnie wraz ze zwiększającą się porowatością początkową. Piaskowce te mają znacznie większą porowatość początkową (około 20%) w porównaniu z karpacczymi. Podobnych obserwacji dokonał Horne (1990, za: Jalalh, 2006a). W swojej pracy zademonstrował on model, w którym o ile wraz ze wzrostem porowatości ściśliwość maleje, to próbki o wysokiej porowatości (w tamtym przypadku powyżej 30%) mają ten trend odwrócony. W niniejszej pracy liczba przebadanych próbek jest zbyt mała, by jednoznacznie



**Rysunek 7.** Korelacja pomiędzy współczynnikiem ściśliwości  $C_{pc}$  a porowatością piaskowców karpacckich

**Figure 7.** Relation between the pore volume compressibility  $C_{pc}$  and porosity of Carpathian sandstones

stwierdzić, czy odwrócenie trendu, o którym wspomina Horne (1990, za: Jalalh, 2006a), ma rzeczywiście miejsce. Warto tu też zaznaczyć, że na ścisłość mogą wpływać inne czynniki, nieujęte w tym artykule.



**Rysunek 8.** Korelacja pomiędzy współczynnikiem ścisłości  $C_{pc}$  a porowatością piaskowców dolnojurajskich

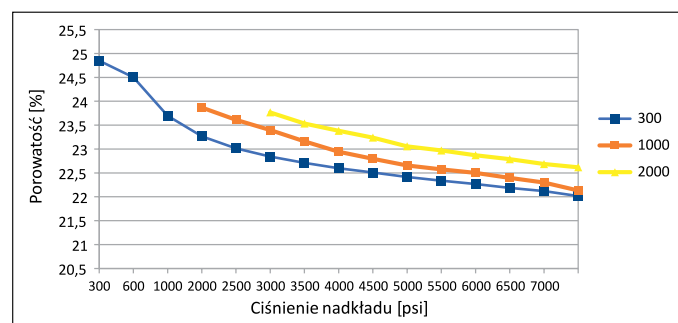
**Figure 8.** Relation between the pore volume compressibility  $C_{pc}$  and porosity of Lower Jurassic sandstones

### Modele ścisłości dla różnych ciśnień

Jednym z dodatkowych celów pracy było wykonanie pomiarów dla różnych ciśnień porowych w celu sprawdzenia, jak próbki zachowują się w tych warunkach. W pracy przebadano pięć próbek (dwa piaskowce karpackie i trzy dolnojurajskie) przy ciśnieniu porowym 1000 psi i 2000 psi. Na podstawie uzyskanych wyników utworzono modele ścisłości (rysunek 9 i 10). Wyniki analizy pokazują, że ciśnienie porowe wpływa znacznie na zmianę porowatości – im większe ciśnienie porowe, tym mniejsza ścisłość. Jak widać na wykresie (rysunek 9), przy ciśnieniu nadkładu wynoszącym 2000 psi i ciśnieniu porowym 300 psi uśredniona wartość porowatości dla próbek jurajskich wynosiła prawie 24%, natomiast przy ciśnieniu porowym wynoszącym 3000 psi wartość ta osiągnęła prawie 23%. Oznacza to zmianę o 1% porowatości, co dla szacowania zasobów złoża ma również duże znaczenie. Dodatkowo pokazuje to, że zmiany ciśnienia porowego spowodowane działalnością człowieka, np. odwiertami, działalnością górniczą, czy też zmiany naturalne, związane ze zjawiskami geologicznymi, mogą również wpłynąć na zmiany przestrzeni porowej. W przypadku spadku ciśnienia porowego wzrasta udział ciśnień zewnętrznych (nadkładu), co może doprowadzić do kompaktacji i zmniejszenia porowatości (Słota-Valim, 2017), a w ekstremalnych sytuacjach do zamknięcia się porów i zmniejszenia przepuszczalności. W przypadku gdy ciśnienie

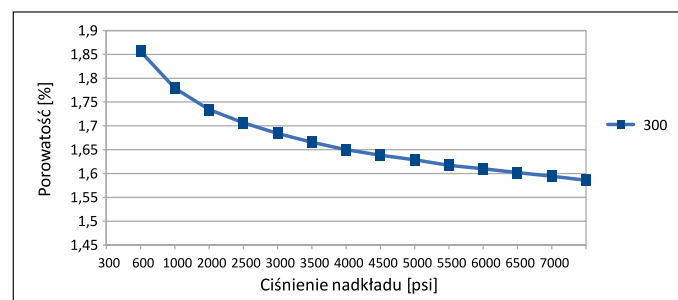
nadkładu ulega zmniejszeniu, efekty mogą okazać się odwrotne i skutkować np. zwiększoną przepuszczalnością.

Należy też zaznaczyć, że to prawdopodobnie różnica pomiędzy ciśnieniem nadkładu a ciśnieniem porowym odpowiada za zmiany porowatości, a nie sama wartość ciśnienia. Oznacza to, że przy ciśnieniu nadkładu 1500 psi i porowym 500 psi ścisłość może wynosić tyle samo co przy 3000 psi ciśnienia nadkładu i 2500 psi porowego.



**Rysunek 9.** Uśredniony model zmian porowatości piaskowców dolnojurajskich dla różnych ciśnień porowych

**Figure 9.** Model of changes in porosity of Lower Jurassic sandstones under different pore pressures



**Rysunek 10.** Uśredniony model zmian porowatości piaskowców karpackich dla 300 psi ciśnienia porowego

**Figure 10.** Model of changes in the porosity of Carpathian sandstones at 300 psi of pore pressure

### Dyskusja

Próbki piaskowca zmieniły objętość porową od 9,42% do 25,85%. W przeliczeniu na mililitry solanki daje to odpowiednio od 0,07 ml do 0,78 ml (tabela 1). Jak wykazano wcześniej, oprócz ścisłości wyrażonej w procentach należy brać pod uwagę zmianę porowatości. Próbki o wysokiej porowatości mogą mimo mniejszej ścisłości utracić większą objętość porową niż próbki o dużej ścisłości, ale małej porowatości. Potwierdzają to też inne badania (de Oliveira et al., 2013). Zmiany porowatości są szczególnie istotne przy szacowaniu zasobów złoża. Dokładny pomiar ścisłości pozwala realnie oszacować zasoby, co ma duże znaczenie przy tworzeniu strategii poszukiwania złóż. Należy również pamiętać, że w prezentowanych badaniach nie uwzględniano ścisłości



ziarnowej, co może rzutować na ostateczny wynik (Schutjens i Heidung, 2012). Ścisłość ziarnowa, czy też ścisłość ośrodka skalnego jako całości, jest równie interesująca i warta przyjrzenia się z myślą o coraz dokładniejszych pomiarach.

Jak wykazano w poprzednich rozdziałach, można zauważyć zależność ścisłości od porowatości. Jest to najbardziej widoczna korelacja – im większa porowatość, tym mniejsza ścisłość (rysunek 7). Zależność ta jest spójna z obserwacjami innych autorów badających ścisłość i tworzących modele ścisłości (Hall, 1953; Jalalh, 2006a, 2006b), którzy wyszli z propozycjami własnych modeli. Wydaje się, że obecnie część z tych modeli ma całkiem dobre potwierdzenie w kolejnych badaniach (da Silva et al., 2015). W przedstawionym przez Horne'a (1990, za: Jalalh, 2006a) modelu dla próbek o porowatości powyżej 30% widać odwrócenie trendu. Przy tak wysokiej porowatości ścisłość również zaczyna być coraz większa. W próbkach dolnojurajskich widać podobny trend. Próbka 13, o porowatości 22,9%, ma najniższą ścisłość spośród przebadanych próbek dolnojurajskich. Dwie próbki o wartościach powyżej 25% porowatości (11 i 12) mają widocznie większą ścisłość (tabela 3, rysunek 8). Możliwe, że jest to początek trendu dla próbek o wysokiej porowatości zaobserwowanego przez Horne'a (1990, za: Jalalh, 2006a).

Z modeli pokazanych w artykule widać, że wzrost ciśnienia porowego zmniejsza ścisłość (rysunek 9), jednak zmiany te nie są duże i maksymalnie sięgają 1%. Mimo to należy pamiętać, że nawet tak niewielka zmiana w zakresie całego złoża może już być znacząca.

Przy obniżaniu ciśnień porowych zwiększa się wpływ sił oddziałujących na pory z zewnątrz, co może prowadzić do „kompakcji” części skał złożowych i w efekcie do zamknięcia złoża. Jest to kolejne zagadnienie warte lepszego poznania, zwłaszcza biorąc pod uwagę powolne wyczerpywanie się obecnie eksploatowanych złóż. Należałoby się również zastanowić, czy można użyć tej wiedzy w innych dziedzinach geologii, jak górnictwo, gdzie zmiany ciśnień związane z pozyskiwaniem surowców skalnych mogą wpływać choćby na zagrożenie niebezpiecznymi gazami, takimi jak metan czy siarkowodor.

## Wnioski

1. Ciśnienie porowe i nadkładu mają wpływ na stopień ścisłości i wartość porowatości *in situ*.
2. Zmiany ciśnień porowych oddziałujących na skałę złożową wpływają na jej porowatość, co może prowadzić do zaciskania się porów, m.in. w trakcie szczypania złoża.
3. Istnieje zależność pomiędzy ścisłością a porowatością. Im mniejsza porowatość, tym większa ścisłość, a przy

większych porowatościach ten trend może zacząć się odwracać, co potwierdzają inne publikacje (Jalalh, 2006a).

4. Dalsze badania nad tym zagadnieniem oraz stworzenie odpowiednich modeli dla skał o określonej charakterystyce i pochodzeniu mogą pozwolić na coraz dokładniejsze szacowanie rzeczywistej objętości złóż. Dodatkowo w przypadku dużej liczby próbek o odpowiednio dobranych parametrach można pokusić się o poszukiwanie większej liczby zależności pomiędzy ścisłością a innymi danymi petrofizycznymi, jak również mineralogicznymi czy petrograficznymi. Dałoby to dodatkowe narzędzie jeszcze bardziej ułatwiające szacowanie zmian porowatości w związku z oddziaływaniem ścisłości.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Modele zmian ścisłości w różnych warunkach ciśnienia porowego*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0076/SG/2021, nr archiwalny: DK-4100-0064/2021.

## Literatura

- Aloki Bakhtiari H.A.V., Moosavi A., Kazemzadeh E., Goshtasbi K., Esfahani M.R., Vali J., 2011. The effect of rock types on pore volume compressibility of limestone and dolomite samples. *Geopersia*, 1(1): 37–82. DOI: 10.22059/jgeope.2011.22163.
- Bernabé Y., Fryer D.T., Shively R.M., 1994. Experimental observations of the elastic and inelastic behaviour of porous sandstones. *Geophysical Journal International*, 117(2): 403–418. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1994.tb03940.x.
- Carpenter C.B., Spencer G.B., 1940. Measurements of compressibility of consolidated oil-bearing sandstones. Report 3540. *United States Department of the Interior, Bureau of Mines*.
- Cicha-Szot R., 2018. Współczynnik ścisłości skał i płynów – parametr petrofizyczny, który należy uwzględnić, czy który można pominąć w charakterystyce złóż surowców płynnych? *Nafta-Gaz* 2018, 74(6): 451–456. DOI: 10.18668/NG.2018.06.05.
- Fatt I., 1958. Compressibility of sandstones at low to moderate pressures. *AAPG Bulletin*, 42(8): 1924–1957. DOI: 10.1306/0BDA5B8E-16BD-11D7-8645000102C1865D.
- Hall H.N., 1953. Compressibility of reservoir rocks. *Journal of Petroleum Technology*, 5(1): 17–19. DOI: 10.2118/953309-G.
- Hou X., Zhu Y., Wang Y., Liu Y., 2019. Experimental study of the interplay between pore system and permeability using pore compressibility for high rank coal reservoirs. *Fuel*, 254: 115712. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115712.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W., 2007. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4<sup>th</sup> ed. Wiley, Oxford. ISBN: 978-0-632-05759-7.
- Jalalh A.A., 2006a. Compressibility of porous rocks: Part I. Measurements of Hungarian reservoir rock samples. *Acta Geophysica*, 54(3): 319–332. DOI: 10.2478/s11600-006-0025-8.
- Jalalh A.A., 2006b. Compressibility of porous rocks: Part II. New relationships. *Acta Geophysica*, 54(4): 399–412. DOI: 10.2478/S11600-006-0029-4.
- Koszela-Marek E., 2009. Charakterystyka zmian ścisłości roztworów soli NaCl pod wpływem wysokich ciśnień hydrostatycznych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 33(1): 361–367.
- Lan Y., Moghanloo R.G., Davudov D., 2017. Pore compressibility of shale formations. *SPE Journal*, 22(6): 1778–1789. DOI: 10.2118/185059-PA.

- McPhee C., Reed J., Zubizarreta I., 2015. Core Analysis: A best practice guide. *Development in Petroleum Science 64*, Elsevier. ISBN 978-0-444-63533-4.
- Oliveira G.L. de, De Ceia M.A., Misságia R.M., 2013. Experimental measurements of pore volume compressibility of sandstones and carbonates. *13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF*: 1089–1094. DOI: 10.1190/sbgf2013-225.
- Oliveira G.L.P. de, Ceia M.A., Missagia R.M., Archilha N.L., Figueiredo L., Santos V.H., Neto I.L., 2016. Pore volume compressibilities of sandstones and carbonates from Helium porosimetry measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 137: 185–201. DOI: 10.1016/j.petrol.2015.11.022.
- Schutjens P., Heidung W., 2012. On the pore volume compressibility and its application as a petrophysical parameter. *9<sup>th</sup> Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad*.
- Silva Jr. G.P. da, Franco D.R., Stael G.C., Oliveira Lima M.D.C. de, Martins R.S.A., Moraes França O. de, Azeredo R.B., 2015. Petrophysical studies of north American carbonate rock samples and evaluation of pore-volume compressibility models. *Journal of Applied Geophysics*, 123: 256–266. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.10.018.
- Słota-Valim M., 2017. Predykcja ciśnień porowych w otworach wiertniczych przewiercających dolnopaleozoiczne formacje łupkowe basenu bałtyckiego – północna Polska. *Nafta-Gaz*, 73(4): 219–226. DOI: 10.18668/NG.2017.04.01.
- Weibo S.U.I., Zihan Q.U.A.N., Yanan H.O.U., Cheng H., 2020. Estimating pore volume compressibility by spheroidal pore modeling of digital rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 47(3): 603–612. DOI: 10.1016/S1876-3804(20)60077-5.
- Wong T.F., Baud P., 1999. Mechanical compaction of porous sandstone. *Oil & Gas Science and Technology*, 54(6): 715–727. DOI: 10.2516/ogst:1999061.
- Zhang B., Zhu J., He F., Jiang Y., 2018. Compressibility and fractal dimension analysis in the bituminous coal specimens. *AIP Advances*, 8, 075118: 1-11. DOI: 10.1063/1.5039794.
- Zimmerman R.W., 1986. Compressibility of two-dimensional cavities of various shapes. *Journal of Applied Mechanics*, 53: 500–504. DOI: 10.1115/1.3171802.
- Zimmerman R.W., 1990. Compressibility of sandstones, Elsevier. ISBN: 9780080868875.



Mgr Krzysztof NOWAK  
 Specjalista inżyniersko-techniczny w Zakładzie  
 Geologii i Geochemii  
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
 ul. Lubicz 25 A  
 31-503 Kraków  
 E-mail: [nowakk@inig.pl](mailto:nowakk@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU GEOLOGII I GEOCHEMII

- petrofizyczne analizy laboratoryjne: gęstość, porowatość, parametry przestrzeni porowej, analizy przepuszczalności, analiza mikro i makro szczelinowości na płytkach cienkich i fragmentach rdzeni, petrograficzna ocena składu mineralnego, procesów diagenetycznych, analiza rozmieszczenia i geometrii przestrzeni porowej na podstawie płytek cienkich, przepływy fazowe, zwilżalność, ściślność;
- geochemiczne analizy laboratoryjne: ocena składu macieratowego i refleksyjności wityrnytu, piroliza Rock-Eval (oznaczenie zawartości TOC, wolnych węglowodorów, węgla rezydualnego), określenie potencjału węglowodorowego skał macierzystych, analiza elementarna węglowodorów i kerogenu (C,H,N,S, współczynniki H/C i O/C), skład chemiczny i izotopowy gazów, badania gazu wolnego (desorbowanego) i resztkowego, badania ekstrahowalnej substancji organicznej oraz analiza składu grupowego, analiza biomarkerów GC-M5 (frakcja nasycona i aromatyczna, analiza GC-FID frakcji nasyconej), korelacja rop ze skałami macierzystymi;
- modelowanie geologiczne 3D złóż i obszarów poszukiwawczych: interpretacja danych geofizyki wiertniczej (petrofizyczna, geochemiczna, geomechaniczna, szczelinowości), modelowanie strukturalne, fałdowe i parametrów petrofizycznych z wykorzystaniem danych otworowych i sejsmicznych, modelowanie geomechaniczne, obliczanie zasobów na bazie modeli 3D złóż wraz z analizą niepewności;
- sedimentologia dla geologii naftowej: analizy sedimentologiczne rdzeni wiertniczych, analizy środowisk depozycyjnych facji osadowych, stratygrafia sekwencji, analizy sedimentologiczne odstępów powierzchniowych oraz ich integracja z danymi otworowymi (rdzenie, pomiary geofizyki otworowej) i sejsmicznymi, dystrybucja rozkładu facji w basenach sedimentacyjnych, predykcja występowania ciał zbiornikowych i ich orientacja przestrzenna w skali basenu sedimentacyjnego;
- modelowanie 1D/2D/3D systemów naftowych: odtwarzanie ewolucji strukturalnej, termicznej i parametrycznej basenu sedimentacyjnego w skali czasu geologicznego, rekonstrukcja czasu i przebiegu procesów generowania i ekspulsji węglowodorów, modelowanie dróg migracji węglowodorów i miejsc ich akumulacji, ocena zasobów prognostycznych, analiza niepewności, ranking obiektów poszukiwawczych;
- zintegrowana platforma: Petrel, PetroMod, Techlog, Interactive Petrophysics, ProGeo, Petrel Reservoir Geomechanics (Visage).



Kierownik: dr inż. Grzegorz Leśniak    Adres: ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków  
 Telefon: 12 617 76 87    Faks: 12 430 38 85    E-mail: [grzegorz.lesniak@inig.pl](mailto:grzegorz.lesniak@inig.pl)

 INSTYTUT NAFTY I GAZU  
 – Państwowy Instytut Badawczy