

Wpływ diagenety na właściwości zbiornikowe piaskowców górnego karbonu w rejonie między Warszawą a Dęblinem

Aleksandra Kozłowska*

The influence of diagenesis on the reservoir quality of the Upper Carboniferous sandstones in the region between Warsaw and Dęblin (central Poland). Prz. Geol., 51: 777–782.

Summary. Compaction and cementation are the most important processes that significantly reduced porosity of the Carboniferous sandstones. Primary porosity was reduced due to compaction by about 41%, and due to cementation by approximately 36%. The main sandstones cements are: authigenic quartz, authigenic kaolinite and carbonates and locally — fibrous illite. Dissolution is also another significant diagenetic process causing a secondary porosity in the rock. Porosity of about 10% and permeability which ranges between 0 and 1157.3 mD are characteristic for the Upper Carboniferous sandstones. Two types of porosity can be identified: intergranular and intercrystalline primary porosity (up to over 20%), and secondary porosity represented mostly by the intergranular type (up to about 7%) created due to dissolution of potassium feldspars and cements. Basing on the estimation of the reservoir qualities of studied sandstones of the Magnuszew, Lublin, Dęblin, and Terebin formations, it seems that sandstones of the Magnuszew and Dęblin, locally also Lublin formations are the promising for prospecting bitumines. Generally, fluvial sandstones have better reservoir qualities than the sandstones formed in deltaic environments. Good porosity and permeability features shown by most of the Carboniferous sandstones are caused by three factors. These correspond to: precipitation of early cements (overgrowth of authigenic quartz, siderite, rims of Fe-chlorite) which stopped mechanical compaction, development of secondary porosity due to dissolution of grains and cements and authigenic kaolinite prevalence over illite. The main factors which reduced porosity and permeability of some of the sandstones are: mechanical compaction, strong quartz and carbonate cementations and crystallization of fibrous illite.

Key words: Carboniferous, sandstones, diagenesis, compaction, cementation, reservoir potential, porosity, permeability

Celem badań była ocena właściwości zbiornikowych piaskowców górnego karbonu z dziesięciu otworów wiertniczych usytuowanych między Warszawą a Dęblinem (ryc. 1). Zgodnie z podziałem strukturalnym obszaru badań (Żelichowski, 1972; Narkiewicz i in., 1998) otwory: Korabiewice PIG 1, Mszczonów IG 2, Nadarzyn IG 1 i Czachówek 1 znajdują się w bloku warszawskim, natomiast otwory Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2 są położone w północno-zachodniej części rowu lubelskiego. W pracy przyjęto podział litostratygraficzny wprowadzony przez Porzyckiego i Żelichowskiego (Porzycki, 1979), którzy od spągu profilu osadów karbonu wyróżnili formacje: Huczwy, Terebina, Dębłina, lubelską i Magnuszewa. Przedmiotem badań były piaskowce formacji Terebina (22 próbki) stwierdzone tylko w otworach: Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2 oraz piaskowce formacji Dębłina (141 próbek), lubelskiej (51 próbek) i Magnuszewa (176 próbek), które występują we wszystkich badanych otworach wiertniczych. Analizowane piaskowce wraz z towarzyszącymi im mułowcami i ilowcami, podrzędnie zlepieńcami tworzyły się w środowisku rzeczonym i deltowym (Waksmundzka, 1998). Wyniki badań profilu osadów karbonu z brzeżnej części rowu lubelskiego (rejon Wilgi) na tle całego basenu lubelskiego sugerują, że na obszarze tym dominowały warunki lądowe o reżimie rzeczonym (Waksmundzka & Kozłowska, 2000). W rejonie badań strop osadów karbonu występuje na głębokości około 1470 m w otworze Stężycza 2 i obniża się w kierunku północno-zachodnim do głębokości ok. 2300 m w rejonie otworu Wilga IG 1 i do ok. 4300 m w otworach Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2.

Z próbek skał piaskowców wykonano płytki cienkie, które analizowano w mikroskopie polaryzacyjnym. Preparaty barwiono roztworem Evamy'ego w celu wstępnego

określenia rodzaju węglanów oraz badano w katodoluminescencji (CL) i w elektronowej mikrosondzie energetycznej (EDS ISIS). Część próbek piaskowców, z których wykonano płytki cienkie impregnowana była niebieską żywicą w celu ocenienia ich porowatości. Płytki cienkie poddano analizie planimetrycznej metodą punktową. Mikrolitofacje piaskowców wydzielono w oparciu o klasyfikację Dotta zmodyfikowaną przez Pettijona (1972) z dalszymi zmianami Jaworowskiego (1987), rozszerzając podział wak na sublityczne i subarkozowe, podobnie jak w arenitach. Ponadto zbadano odłupki skalne piaskowców w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) obserwując minerały diagenetyczne oraz charakter przestrzeni porowej. W laboratorium Zakładu Poszukiwań Nafty i Gazu w Wołominie wykonano analizy porowatości i przepuszczalności, natomiast w laboratorium Zakładu Geologii i Geochemii Instytutu Górniczego Naftowego i Gazownictwa w Krakowie poza pomiarami porowatości i przepuszczalności przeprowadzono badania porozymetryczne piaskowców.

W pracy określono wpływ głównych procesów diagenetycznych działających w osadach górnego karbonu, takich jak: kompaktacja, cementacja, rozpuszczanie, zastępowanie oraz przeobrażanie, na zabudowanie przestrzeni porowej w piaskowcach.

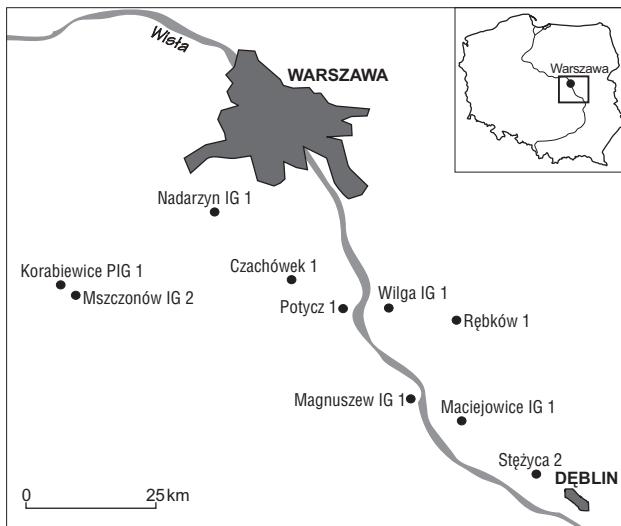
Petrografia i diagenetyza piaskowców

Analizowane piaskowce najczęściej są złożone z materiału detrytycznego półobtoczonego, dobrze wysortowanego, od bardzo drobno- do gruboziarnistego. Reprezentują one arenity i waki subarkozowe, kwarcowe oraz sublityczne. Lokalnie występują arenity i waki lityczne oraz arkozoze. Szkielet ziarnowy piaskowców składa się przeciętnie z 80% kwarcu, 12% skaleni i 8% okruchów skał. W obrębie ziarn kwarcu, kwarc monokrystaliczny przeważa nad polikrystalicznym. Skalenie są reprezentowane głównie przez

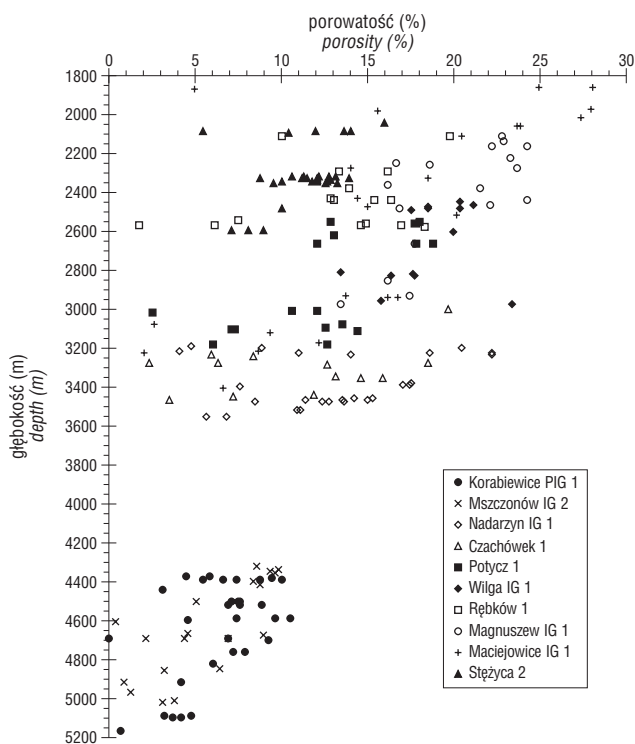
*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

skalenie potasowe, a tylko lokalnie przez plagioklasy. Wśród litoklastów dominują okruchy skał magmowych z przewagą skał wulkanicznych nad głębinowymi, a w mniejszej ilości występują okruchy skał metamorficznych i osadowych. Zawartość łuszczyków (głównie muskowit i biotyt, rzadziej chloryt) w piaskowcach jest zmienna, natomiast minerały ciężkie (cyrkon, tytanit, rutyl, granat, apatyt) należą do nielicznych.

Spoivo, które składa się z matriksu i/lub cementu, ma charakter porowy i/lub kontaktowy w arenitach, a w wakach jest porowo-kontaktowe. W badanych piaskowcach karbońskich matriks składa się z detrytycznych minerałów ilastych lub ich mieszaniny z pyłem kwarcowym,



Ryc.1. Lokalizacja badanych otworów wiertniczych
Fig. 1. Location of studied boreholes



Ryc. 2. Zależność porowatości pomierzonej laboratoryjnie od głębokości wybranych próbek piaskowców

Fig. 2. Laboratory measured porosity versus depth of selected samples of sandstones

natomiast cement tworzą następujące minerały diagenetyczne: kwarc, minerały ilaste, węglany, siarczany, wodorotlenki żelaza i hematyt oraz piryt (Kozłowska, 2000). Cement kwarcowy występuje w formie obwódek syntakcjonalnych wykształconych na ziarnach kwarcu. Wyróżniono dwie generacje obwódek kwarcu autigenicznego. Najsilniejszy rozwój obwódek kwarcowych stwierdzono w osadach najgłębiej położonych (na głęb. większej od 4300 m) w otworach Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2. Wśród autigenicznych minerałów ilastych dominuje kaolinit, natomiast illit i chloryt występują w mniejszej ilości. Wydzielono dwa typy morfologiczne kaolinitu: robakowaty, wczesnodiagenetyczny, który występuje głównie w górnych częściach profili utworów karbońskich i blokowy, tworzący się w późniejszych etapach diagenety, dominujący na większych głębokościach. Na głębokości większej od 3000 m stwierdzono przerosty kaolinitu z dickitem, w których zawartość dickitu najczęściej waha się w granicach od 5 do 20%. Autigeniczny illit jest wykształcony w postaci krystalitów blaszkowych, rzadziej włóknistych, tworzących się w końcowym etapie diagenety piaskowców. Włóknisty illit występuje powszechnie w osadach na głębokości większej od 3000 m (Korabiewice PIG 1, Mszczonów IG 2, Nadarzyn IG 1, Czachówek 1, Potycz 1, Maciejowice IG 1). Wśród Fe-chlorytów, często tworzących formy rozetkowe, wyróżniono chloryty wczesnodiagenetyczne wykształcone w formie obwódek na ziarnach kwarcu oraz późnodiagenetyczne. Cementy węglanowe są reprezentowane głównie przez syderyt i ankeryt, w mniejszej ilości przez Fe-dolomit i Fe-kalcyt oraz sporadycznie przez dolomit. Wyróżniono dwie generacje syderytu: wczesną, wykształconą w formie bardzo drobnokrystalicznych osobników, często w postaci romboedrów oraz w postaci sferolitów i późną krystalizującą w formie rozproszonych romboedrów lub tworzącą cement podstawowy. Dolomit, Fe-dolomit i ankeryt najczęściej występują w postaci izolowanych euhedralnych kryształów romboedrycznych lub tworzą masywny cement sparowy. Fe-kalcyt, którego obecność stwierdzono tylko w utworach litofacji deltowej (Waksmundzka & Kozłowska, 2000), najczęściej tworzy cement porowy, tylko miejscami podstawowy. Siarczany reprezentowane głównie przez anhydryt oraz w niewielkiej ilości przez baryt należą do podrzędnych odmian cementów. Cementy siarczanowe występują głównie w przystopowej części profilu osadów karbonu (Korabiewice PIG 1, Mszczonów IG 2, Nadarzyn IG 1, Potycz 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1). W przypadku wypełnienia przez cement tylko części przestrzeni porowej piaskowców zachowała się część porowatości pierwotnej. Poza cementacją do ważnych procesów diagenetycznych, których efekty rozpoznano w badanych piaskowcach należą: kompaktacja, rozpuszczanie, zastępowanie i przeobrażanie.

Charakterystyka wybranych cech petrofizycznych

W pracy przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań właściwości fizycznych z 206 próbek piaskowców (formacja Terebina — 8, formacja Dębina — 85, formacja lubelska — 19, formacja Magnuszewa — 94). Ponadto zamieszczono wartości porowatości wyliczone ze 193 płytek cienkich, nasączonych niebieską żywicą. Porowatość całkowita jest podstawową cechą osadu, natomiast przepuszczalność zależy od porowatości efektywnej, kształtu i rozmiaru porów oraz ich połączeń, a także od właściwości roztworów (Tucker, 1994). W ocenie

właściwości zbiornikowych skał ważna jest porowatość efektywna, która zależy od stopnia wewnętrznych połączeń przestrzeni porowej w skale. Wyniki badań porowatości, przepuszczalności i analizy porozymetrycznej są podstawowym materiałem laboratoryjnym służącym do prawidłowego opisu przestrzeni porowej badanej warstwy (Such, 1996).

Porowatość mierzona laboratoryjnie

W analizowanych skałach porowatość efektywna waha się od 0,36 do 28,02%, przeciętnie wynosi 12,5%. Ogólnie wartości jej maleją ze wzrostem głębokości zalegania osadu (ryc. 2). W ośmiu badanych otworach wiertniczych: Nadarzyn IG 1, Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2 przeważają próbki piaskowców o wartościach porowatości powyżej 10%. Największą liczbę próbek skał o najwyższych porowatościach, przeciętnie powyżej 15% stwierdzono w utworach formacji Magnuszewska i Dębina oraz lokalnie lubelskiej otworów: Wilga IG 1, Magnuszew IG 1 i Maciejowice IG 1. Przewagę próbek piaskowców o najniższych wartościach porowatości, przeważnie poniżej 10% odnotowano w całym profilu dwóch otworów wiertniczych: Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2, w których osady karbonu należące do formacji Magnuszewska, lubelskiej i Dębina występują na głębokości większej od 4300 m. Ponadto niską porowatością charakteryzują się piaskowce występujące w dolnych odcinkach formacji Dębina oraz w formacji Terebina otworów: Maciejowice IG 1 (na głęb. większej od 3000 m) i Stężycza 2 (na głęb. większej od 2400 m).

Na podstawie uzyskanych wartości, badane piaskowce formacji Magnuszewska i Dębina oraz lokalnie lubelskiej można zaklasyfikować wg Jenyona (1990) do skał o dobrej porowatości (10–25%) w otworach: Nadarzyn IG 1, Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2, natomiast o słabej (ok. 6%) w otworach: Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2. Również do skał o słabej porowatości (ok. 6%) należą piaskowce formacji Terebina analizowanych otworów wiertniczych, które najczęściej tworzyły się w środowisku deltowym.

Porowatość mierzona w płytkach cienkich

W badanych piaskowcach karbońskich występuje zarówno porowatość pierwotna, zachowana przy niecałkowitym wypełnieniu porów przez cementy, jak i wtórna powstała w wyniku rozpuszczania ziarn i cementów. Najczęściej przeważa porowatość pierwotna, jednakże miejscami znaczną część może stanowić porowatość wtórna. Ponadto w badanych piaskowcach karbońskich powszechna jest mikroporowatość między krystalitami autigenicznych minerałów ilastych (kaolinit, illit, chloryt), lecz ze względu na mikroskopijne rozmiary tych porów nie mają one dużego wpływu na wzrost porowatości całkowitej i na przepuszczalność skały (ryc. 3).

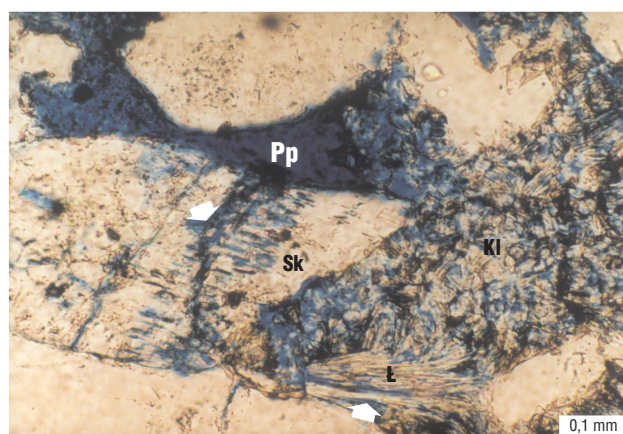
Pomierzona przez autorkę w płytkach cienkich piaskowców, nasączonych niebieską żywicą, porowatość całkowita waha się od 0,3 do 24,8% obj. skały, najczęściej wynosi około 10% obj. Wielkości tych danych, analogicznie jak wartości porowatości efektywnej, maleją wraz ze wzrostem głębokości występowania skał. Na porowatość osadu składa się porowatość pierwotna, która wynosi od 0,3 do 20,6 % obj. i wtórna od 0 do 6,7 % obj. W otworach wiertniczych: Nadarzyn IG 1, Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG

1, Rębków 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2 porowatość pierwotna jest około cztery razy większa od porowatości wtórnej, natomiast w otworach: Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2 oba rodzaje porowatości są porównywalne. Badania wykazały, że porowatość pierwotna maleje ze wzrostem głębokości, natomiast porowatość wtórna lokalnie wzrasta. Przedstawiona ocena porowatości piaskowców karbońskich na podstawie analizy płytek cienkich nasączonych niebieską żywicą jest na ogół zgodna z oceną porowatości efektywnej z badań fizycznych. Jednakże, wielkość porowatości wyliczona z płytki cienkiej jest przeważnie niższa od porowatości efektywnej. Może to wynikać z obecności mikroporów w preparacie, które najczęściej są pomijane w pomiarach ze względu na trudności w dostrzeżeniu ich. Przy takim założeniu można wnioskować, że mikroporowatość w badanych piaskowcach wynosi ok. 3% w otworach Nadarzyn IG 1, Czachówek 1, Potycz 1, Rębków 1 i Stężycza 2, a ok. 8–10% w otworach Wilga IG 1, Magnuszew IG 1 i Maciejowice IG 1.

Cechy przestrzeni porowej

Na podstawie wyników badań porozymetrycznych wyliczono między innymi: współczynnik porowatości dynamicznej (określa objętość porów mogących przewodzić płyny złożowe, nie obejmuje więc submikroporów), ilość porów o wielkości $>1 \mu\text{m}$, wielkość średnicy progowej (wyznacza rozmiary porów w których zaznacza się ciągły przepływ płynów przez próbkę) oraz histerezę (dobry wskaźnik właściwości filtracyjnych).

Wyniki badań przestrzeni porowej w analizowanych próbkach piaskowców wskazują, że najlepsze parametry w aspekcie cech zbiornikowych mają piaskowce formacji Magnuszewska, Dębina oraz lubelskiej z otworów: Czachówek 1, Wilga IG 1, Rębków 1 i Magnuszew IG 1 oraz piaskowce formacji Magnuszewska w otworach: Nadarzyn IG 1, Potycz 1 i Maciejowice IG 1. Charakteryzują się one przeciętnymi wartościami współczynnika porowatości dynamicz-



Ryc. 3. W piaskowcu porowatość pierwotna (Pp) i porowatość wtórna (strzałki) powstała w wyniku rozpuszczania ziarn skaleńca (Sk) i łuszczyku (L); widoczna jest mikroporowatość między krystalitami kaolinitu (Kl). Próbkę impregnowana niebieską żywicą. Otwór Wilga IG 1, głęb. 2821,7 m, bez analizatora
Fig. 3. Primary porosity (Pp) and secondary porosity (arrows) formed by dissolution of feldspar (Sk) and mica (L) grains; microporosity between kaolinite crystals (Kl) in sandstones is visible. Rock impregnated with blue-stained resin. Wilga IG 1 borehole, depth 2821.7 m, one nicol

nej ok. 15%, średnicy progowej ok. 25 μm , histerezy ok. 30% i średnią wartością ilości porów $>1 \mu\text{m}$ osiągającą 70%.

Niższe przeciętne wielkości liczonych parametrów: współczynnika porowatości dynamicznej ok. 10%, średnicy progowej ok. 10 μm , histerezy ok. 45% i średniej wartości ilości porów $>1 \mu\text{m}$ do 60%, odnotowano w piaskowcach formacji Dębina i lubelskiej otworów: Nadarzyn IG 1 oraz formacji Dębina otworów: Potycz 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2.

Najsłabsze cechy przestrzeni porowej: współczynnik porowatości dynamicznej przeciętnie ok. 5%, średnicy progowej przeciętnie ok. 4 μm , histerezy przeciętnie około 55% i średnia wartość ilości porów $>1 \mu\text{m}$ do 25% stwierdzono w piaskowcach z formacji Magnuszewa, lubelskiej i Dębina otworów Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2 oraz z formacji Terebina otworów: Czachówek 1, Potycz 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2.

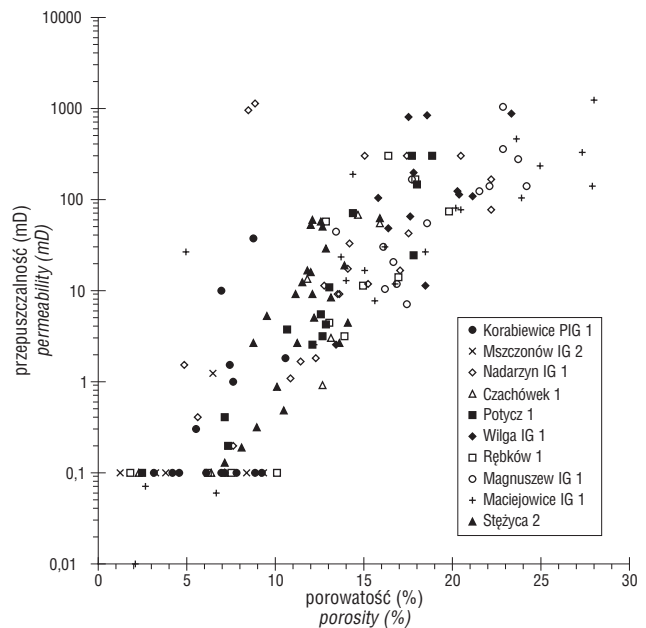
Przepuszczalność

Przepuszczalność w obrębie zbadanych próbek waha się od 0 do 1157,3 mD. Głównym czynnikiem, który kontroluje przepuszczalność w analizowanych piaskowcach jest porowatość (ryc. 4). Ponadto, wielkość tego parametru zazwyczaj maleje ze wzrostem głębokości zalegania osadu. Osady o najlepszej przepuszczalności powyżej 100 mD, należące do formacji Magnuszewa i Dębina oraz lokalnie lubelskiej występują w otworach wiertniczych: Nadarzyn IG 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1 i Maciejowice IG 1. Piaskowce tych samych formacji o przepuszczalności w przedziałach: 10–100 mD i 1–10 mD, stwierdzono w profilach otworów: Nadarzyn IG 1, Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2. Skały o przepuszczalności $<1 \text{ mD}$, należące do wymienionych wcześniej formacji występują w otworach: Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2 oraz w dolnej części formacji Dębina i w formacji Terebina otworów Maciejowice IG 1 i Stężycza 2.

Według klasyfikacji Levorsena (1956) badane piaskowce formacji Magnuszewa, Dębina oraz lokalnie lubelskiej można zaliczyć do skał o bardzo dobrej i dobrej przepuszczalności w otworach: Nadarzyn IG 1, Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1 i Stężycza 2. Osady nieprzepuszczalne należące do tych formacji odnotowano w otworach wiertniczych: Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2 (osady karbonu na głębokości większej od 4300 m) oraz w dolnej części formacji Dębina i w formacji Terebina (osady deltowe) otworów Maciejowice IG 1 i Stężycza 2.

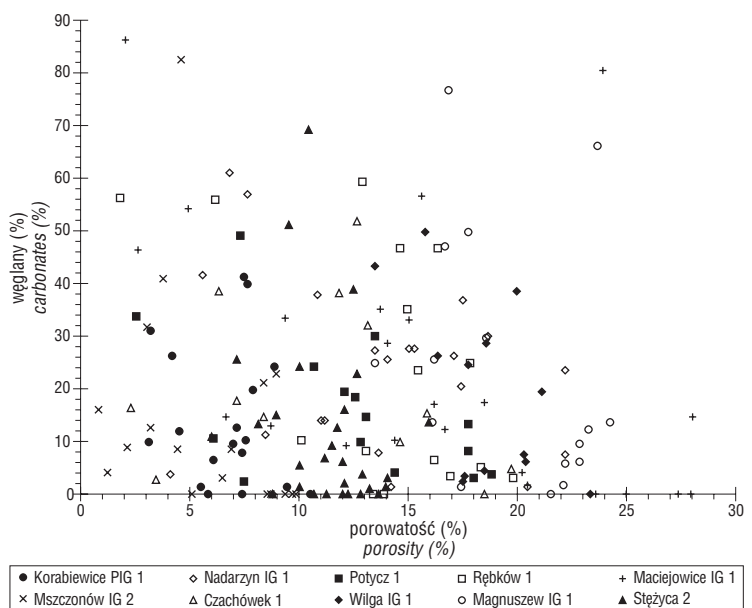
Przedstawione wyniki wskazują, że najlepsze parametry zbiornikowe posiadają piaskowce formacji Magnuszewa, Dębina i lokalnie lubelskiej (przeważają osady rzeczne) występujące na głębokości mniejszej od 3000 m w otworach: Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1 i Maciejowice IG 1, natomiast w otworze Stężycza 2 na głębokości mniejszej od 2400 m. Lokalnie piaskowce o dobrych właściwościach zbiornikowych znajdują się na głębokości od ok. 3100 m w otworze Nadarzyn IG 1 w obrębie formacji Magnuszewa i Dębina. Natomiast piaskowce o niskiej porowa-

tości i przepuszczalności należące do formacji Magnuszewa, lubelskiej i Dębina stwierdzono w otworach Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2, w których osady karbonu leżą na głębokości większej od 4300 m. Poza tym niskie parametry petrofizyczne wykazują piaskowce formacji Terebina oraz miejscami piaskowce z dolnej części formacji Dębina (dominują osady deltowe) badanych otworów wiertniczych. Z oceny właściwości zbiornikowych piaskowców karbonu górnego w zależności od środowiska wynika, że piaskowce rzeczne (formacje Magnuszewa, lubelska, Dębina) mają lepsze właściwości zbiornikowe niż piaskowce deltowe (formacja Terebina, lokalnie formacja Dębina).



Ryc. 4. Zależność przepuszczalności od porowatości w wybranych próbkach piaskowców (wartości przepuszczalności w skali logarytmicznej)

Fig. 4. Permeability versus porosity of selected samples of sandstones (permeability in logarithmic scale)



Ryc. 5. Zależność porowatości od zawartości cementu węglanowego w piaskowcach

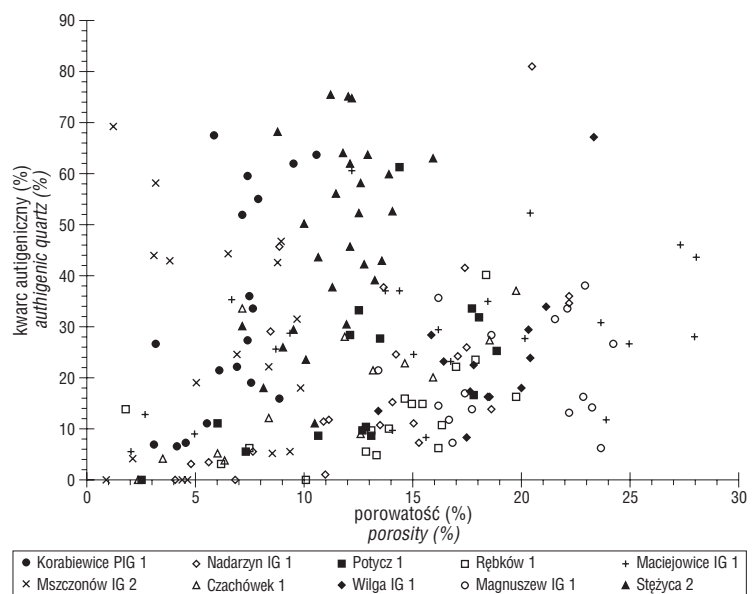
Fig. 5. Porosity versus carbonate cements in sandstones

Diagenезa a właściwości zbiornikowe

Na redukcję porowatości piaskowców mają wpływ głównie dwa procesy diagenetyczne: kompaktacja i cementacja. Stopień zmniejszenia przestrzeni porowej piaskowca spowodowany kompaktacją mechaniczną zależy od składu mineralnego szkieletu ziarnowego skały, natomiast spowodowany cementacją związany jest z formą wykształcenia i zawartością cementów. Cementacja powszechnie powoduje obniżenie porowatości w skale, jednakże obecność wczesnego cementu ortochemicznego może ograniczyć redukcję porowatości. W analizowanych piaskowcach obserwowano występowanie wczesnych cementów chlorytowych, syderytowych i kwarcowych, które tworząc obwódki na ziarnach usztywniły szkielet ziarnowy piaskowca i w przypadku niecałkowitego wypełnienia przestrzeni międzyziarnowej przyczyniły się do zachowania w skale części porowatości pierwotnej. Wykonane wykresy zależności porowatości od zawartości cementów: węglanowego, kwarcowego i kaolinitowego pokazały, że wpływ cementów na porowatość nie jest jednakowy. Z wymienionych cementów jedynie wzrost ilości cementu węglanowego powoduje wyraźny spadek porowatości (ryc. 5). W przypadku cementu kwarcowego zależność ta przedstawia się odwrotnie — porowatość jest większa przy większej zawartości kwarcu autigenicznego (ryc. 6). Potwierdza to wcześniejsze sugestie, że wczesne obwódki regeneracyjne kwarcu, przy niecałkowitym wypełnieniu przestrzeni porowej, usztywniały skałę, zachowując jej pierwotną porowatość. Wykres zależności między zawartością kaolinitu autigenicznego a porowatością wskazuje, że wzrost tej zawartości nie ma jednolitego wpływu na redukcję porowatości (ryc. 7). Jednak, w większości badanych osadów porowatość piaskowców wzrasta ze wzrostem ilości cementu kaolinitowego. Rycina 8, sporządzona wg. Houseknechta (1987), przedstawia wpływ kompaktacji i cementacji na redukcję porowatości w analizowanych osadach. W obszarze badań kompaktacja i cementacja prawie w jednakowym stopniu wpłynęły na obniżenie porowatości w piaskowcach. Kompaktacja spowodowała zmniejszenie porowatości przeciętnie o 41%, a cementacja przeciętnie o 36%. Przewaga kompaktacji nad cementacją zaznacza się w osadach z otworów: Potycz 1, Magnuszew IG 1 i Stężycza 2, natomiast odwrotne zjawisko obserwujemy w Nadarzynie IG 1. W pozostałych analizowanych otworach wiertniczych kompaktacja i cementacja wpłynęły na redukcję porowatości piaskowców w podobnym stopniu, z nieznaczną przewagą efektów pierwszego procesu. Analiza wpływu efektów kompaktacji i cementacji na redukcję porowatości piaskowców w obrębie formacji wykazała wyraźny wzrost cementacji i znacznie mniejszy kompaktacji w kierunku spągu osadów karbonu czyli od formacji Magnuszewska poprzez lubelską i Dęblina do formacji Terebina. W piaskowcach formacji Magnuszewska kompaktacja — 45% najczęściej przeważa nad cementacją — 27% (Mszczonów IG 2, Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1), lokalnie efekty obu procesów

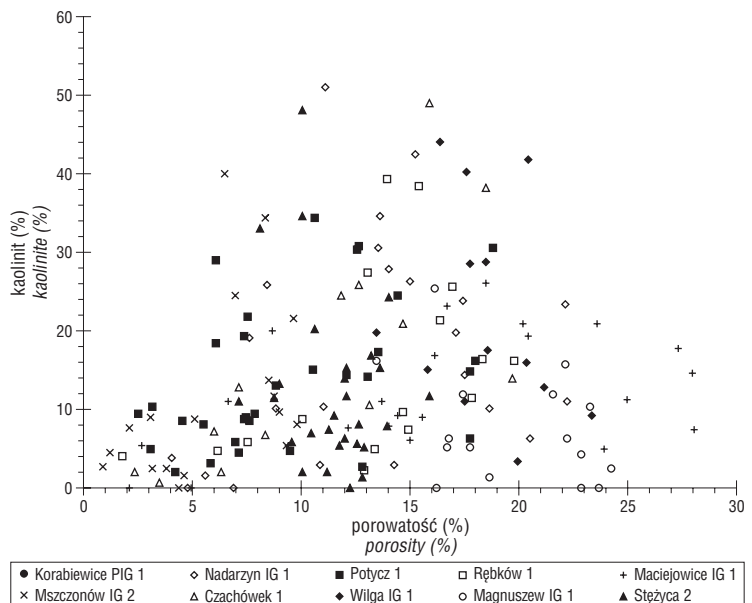
są porównywalne i wynoszą przeciętnie ok. 35% (Korabiewice PIG 1, Nadarzyn IG 1, Maciejowice IG 1). Już w utworach formacji lubelskiej obserwujemy wzrost oddziaływania efektów cementacji na piaskowce w porównaniu z kompaktacją. W piaskowcach formacji Dęblina kompaktacja zmniejszyła ich porowatość przeciętnie o 45%, a cementacja przeciętnie o 35% (Mszczonów IG 2, Czachówek 1, Potycz 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1, Maciejowice IG 1, Stężycza 2), jednakże lokalnie obserwowano odwrotną zależność (Nadarzyn IG 1, Wilga IG 1). Największy wpływ efektów kompaktacji (ok. 50%) i cementacji (ok. 40%) na redukcję porowatości piaskowców stwierdzono w osadach formacji Terebina (Maciejowice IG 1, Stężycza 2).

Oprócz kompaktacji i cementacji, do ważnych procesów diagenetycznych wywierających wpływ na porowatość piaskowców należy również rozpuszczanie, którego efek-



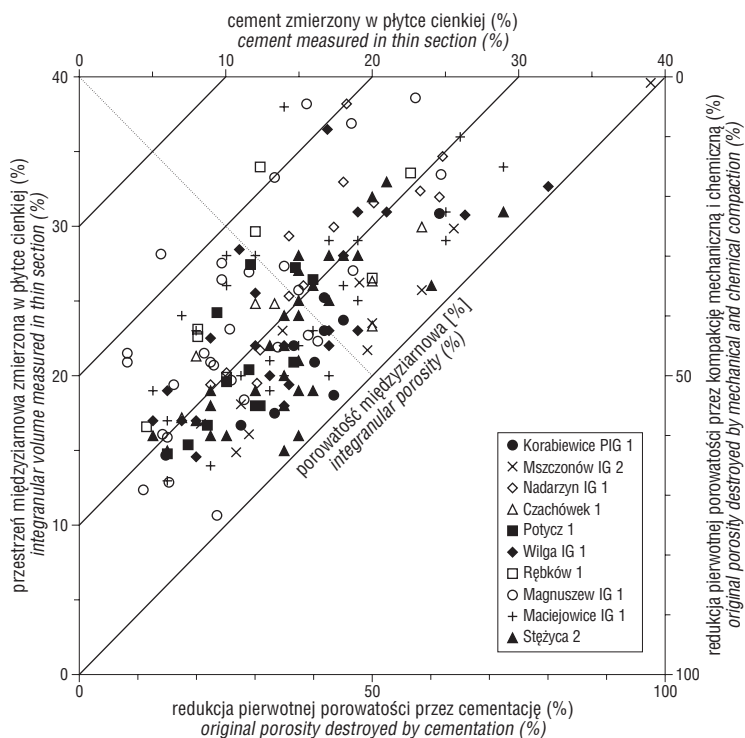
Ryc. 6. Zależność porowatości od zawartości cementu kwarcowego w piaskowcach

Fig. 6. Porosity versus quartz cements in sandstones



Ryc. 7. Zależność porowatości od zawartości kaolinitu w piaskowcach

Fig. 7. Porosity versus kaolinite in sandstones



Ryc. 8. Diagram obrazujący wpływ kompaktacji i cementacji na porowatość pierwotną piaskowców (wg Houseknechta, 1987)

Fig. 8. Diagram showing the effect of compaction and cementation on primary porosity of sandstones (after Houseknecht, 1987)

tem jest powstanie wtórnej porowatości w skale. Proces rozpuszczania obejmował głównie ziarna skaleni potasowych i obwódki kwarcu autigenicznego, w mniejszym stopniu ziarna litoklastów czy kwarcu oraz cementy węglanowe i siarczanowe.

Z pozostałych procesów diagenetycznych zastępowanie (którego skutki są obserwowane w piaskowcach zawierających węglany, rzadziej anhydryt) mogło zmniejszyć porowatość skały, natomiast wpływ procesów przeobrażeń na porowatość i przepuszczalność osadu jest skomplikowany. Illit włóknisty powstający na miejsce kaolinitu na pewno zmniejszył przepuszczalność skały, natomiast tworzenie się kaolinitu kosztem skaleni mogło zwiększyć porowatość i przepuszczalność.

Wnioski

1. Piaskowce karbonu górnego charakteryzują się porowatością, która najczęściej wynosi ok. 10% i przepuszczalnością, która waha się w granicach od 0 do 1157,3 mD. Wyróżniono dwa rodzaje porowatości: porowatość pierwotną (maksymalnie ponad 20%) o charakterze międzyziarnowym i międzykrystalicznym oraz wtórną (maksymalnie ok. 7%) śródziarnową utworzoną wskutek rozpuszczania skaleni potasowych i cementów.

2. Wyniki badań porowatości i przepuszczalności oraz cech przestrzeni porowej wskazują na dobre właściwości zbiornikowe badanych piaskowców. Najlepsze parametry mają piaskowce występujące na głębokości mniejszej od 3000 m w otworach: Czachówek 1, Potycz 1, Wilga IG 1, Rębków 1, Magnuszew IG 1 i Maciejowice IG 1, a do głębokości 2400 m w otworze Stężycza 2 i do 3500 m w otworze Nadarzyn IG 1. Charakteryzują się one przeciętną porowatością w przedziale 10–20%, a przepuszczalnością ich najczęściej waha się między 10 a 300 mD. Najlepsze

parametry cech petrofizycznych piaskowców stwierdzono w otworach: Korabiewice PIG 1 i Mszczonów IG 2, które występują na głębokości większej od 4300 m oraz dolnych częściach profili utworów karbonu w otworach Maciejowice IG 1 (na głęb. większej od 3000 m) i Stężycza 2 (na głęb. większej od 2400 m). Porowatość ich wynosi poniżej 10% i najczęściej są one nieprzepuszczalne.

3. Oceniając właściwości zbiornikowe analizowanych skał w obrębie formacji Magnuszewa, lubelskiej, Dębina i Terebina wydaje się, że najbardziej perspektywiczne dla poszukiwań złóż węglowodorów są piaskowce z formacji Magnuszewa i Dębina, lokalnie również z formacji lubelskiej. Porównując piaskowce tworzące się w środowisku rzeczonym i deltowym można stwierdzić, że znacznie lepsze właściwości kolektorskie wykazują piaskowce litofacji rzecznej.

4. Najważniejsze procesy diagenetyczne, które wpłynęły na porowatość badanych piaskowców karbońskich to kompaktacja i cementacja. Kompaktacja zredukowała przeciętnie ok. 41% porowatości pierwotnej, natomiast cementacja przeciętnie ok. 36%. Do ważnych procesów należy również rozpuszczanie, którego efektem było powstanie wtórnej porowatości w skale.

5. Dobra porowatość i przepuszczalność większości piaskowców karbońskich jest spowodowana: wytrącaniem się wczesnych cementów (obwódki kwarcu autigenicznego, syderyt oraz obwódki Fe-chlorytu), które hamowały kompaktację mechaniczną, tworzeniem się wtórnej porowatości w wyniku procesów rozpuszczania ziarn i cementów oraz przewagą autigenicznego kaolinitu nad illitem. Głównymi czynnikami, które zmniejszyły porowatość i przepuszczalność niektórych piaskowców są: kompaktacja mechaniczna, silna cementacja kwarcem i węglanami oraz krystalizacja włóknistego illitu.

Literatura

- HOUSEKNECHT D. W. 1987 — Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones. AAPG Bull., 71: 633–642.
- JAWOROWSKI K. 1987 — Kanon petrograficzny najczystszych skał osadowych. Prz. Geol., 35: 205–209.
- JENYON M. K. 1990 — Oil and Gas Traps. Aspects of their seismic stratigraphy, morphology and development. John Wiley and Sons.
- KOZŁOWSKA A. 2000 — Diagenetic minerals in the Carboniferous sandstones in the Lublin Graben. PTM Pr. Spec., 17: 192–194.
- LEVORSEN A. I. 1956 — Geology of petroleum. Freeman and Comp. San Francisco.
- NARKIEWICZ M., POPRAWA P., LIPIEC M., MATYJA H. & MILACZEWSKI L. 1998 — Pozycja paleogeograficzna i tektoniczna a rozwój subsydencji dewońsko-karbońskiej obszaru pomorskiego i radomsko-lubelskiego. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 31–46.
- PETTIJOHN F. J., POTTER P. E. & SIEVER R. 1972 — Sand and sandstone. New York, Springer-Verlag.
- SUCH P. 1996 — Model fizyczny przestrzeni filtracji basenu czerwonego spagowca. Pr. IGNiG, 88: 1–82.
- TUCKER M. E., 1994 — Sedimentary petrology, an introduction to the origin of sedimentary rocks. Blackwell Sc. Publ. Oxford.
- WAKSMUNDZKA M. I. 1998 — Architektura depozycyjna basenu karbońskiego Lubelszczyzny. Pr. Państw. Inst. Geol., 165: 89–100.
- WAKSMUNDZKA M. I. & KOZŁOWSKA A. 2000 — Wpływ wykształcenia facjalnego i diagenety piaskowców górnego karbonu na ich właściwości zbiornikowe w północno-zachodniej i centralnej części rowu lubelskiego. CAG Państw. Inst. Geol., nr arch. 58/2002.
- ŻELICHOWSKI A. M. 1972 — Rozwój budowy geologicznej obszaru między Górami Świętokrzyskimi i Bugiem. Biul. Inst. Geol., 263: 7–97.