

Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych

Storage of hydrogen in geological structures

Piotr Such

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Gospodarka wodorowa staje się jednym z głównych kierunków Europejskiego Zielonego Ładu, który w roku 2050 powinien zapewnić neutralność klimatyczną krajów zrzeszonych w UE. Wodór będzie wytwarzany przez odnawialne źródła energii, jak również separowany i pozyskiwany, np. w koksowniach. Znajdzie zastosowanie w ekologicznym napędzie samochodów (czysty wodór) i jako domieszka do gazu ziemnego w sieciach dystrybucyjnych. Optymalizacja jego wykorzystania w gospodarce wymaga przede wszystkim stworzenia systemu jego magazynowania. Ze względu na konieczne objętości będą to obiekty geologiczne, tj. kawerny solne, wyeksploatowane złoża ropy i gazu albo zawodnione obiekty geologiczne. W Polsce podjęto problem zastosowania technik wodorowych, prowadzone są prace związane ze wszystkimi elementami koniecznej infrastruktury wodorowej. Niniejsza praca koncentruje się na problematyce dotyczącej konieczności magazynowania wodoru. W Polsce mamy do wyboru trzy rodzaje magazynów w obiektach geologicznych. Są to kawerny solne, wyeksploatowane złoża gazu oraz zawodnione struktury porowate. Jeśli chodzi o kawerny solne, współpraca Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego z przemysłem trwa już od roku 1998. Kawerny istnieją i są wykorzystywane jako magazyny metanu. Obecnie można stwierdzić, że już teraz możliwe jest magazynowanie w nich mieszanin gazowo-wodorowych przy pełnej kontroli wszelkich koniecznych parametrów (opracowano algorytmy kontrolujące i monitorujące wszystkie konieczne procesy). W odniesieniu do wyeksploatowanych złóż gazu / struktur zawodnionych przeprowadzono szeroko zakrojone prace studialne dotyczące zakresu badań i modelowań. Znalaziono partnera do ewentualnego konsorcjum – Silesian University of Technology. Konsorcjum jest już w stanie podjąć się wykonania projektu adaptacji wyeksploatowanego złoża na magazyn metanowo-wodorowy lub w zależności od potrzeb – na magazyn wodorowy. Projekt będzie dotyczył wszystkich prac związanych z badaniami skał i płynów złożowych, geomechaniki i mikrobiologii.

Słowa kluczowe: wodór, podziemne magazynowanie, wyeksploatowane złoża gazu, kawerny solne.

ABSTRACT: Hydrogen economy became one of the main directions in EU's Green Deal for making Europe climate neutral in 2050. Hydrogen will be produced with the use of renewable energy sources or it will be obtained from coking plants and chemical companies. It will be applied as ecological fuel for cars and as a mix with methane in gas distribution networks. Works connected with all aspects of hydrogen infrastructure are conducted in Poland. The key problem in creating a hydrogen system is hydrogen storage. They ought to be underground (RES) because of their potential volume. Three types of underground storages are taken into account. There are salt caverns, exploited gas reservoirs and aquifers. Salt caverns were built in Poland and now they are fully operational methane storages. Oli and Gas Institute – National Research Institute has been collaborating with the Polish Oil and Gas Company since 1998. Salt cavern storage exists and is used as methane storages. Now it is possible to use them as methane-hydrogen mixtures storages with full control of all operational parameters (appropriate algorithms are established). Extensive study works were carried out in relation to depleted gas reservoirs/aquifers: from laboratory investigations to numerical modelling. The consortium with Silesian University of Technology was created, capable of carrying out all possible projects in this field. The consortium is already able to undertake the project of adapting the depleted field to a methane-hydrogen storage or, depending on the needs, to a hydrogen storage. All types of investigations of reservoir rocks and reservoir fluids will be taken into consideration.

Key words: hydrogen, underground storage, exploited gas reservoirs, salt caverns.

Wstęp

Gospodarka wodorowa staje się jednym z głównych kierunków *Europejskiego Zielonego Ładu*, który w roku 2050 powinien zapewnić neutralność klimatyczną krajów zrzeszonych w UE.

Wodór będzie wytwarzany w odnawialnych źródłach energii (OZE), jak również separowany i pozyskiwany, np. w koksowniach. Wodór w sieciach energetycznych będzie stanowił domieszki do metanu bądź będzie samodzielnym elementem energetycznym. Optymalizacja jego wykorzystania w gospodarce

Autor do korespondencji: P. Such, e-mail: piotr.such@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 10.08.2020 r. Zatwierdzono do druku: 07.11.2020 r.

wymaga przede wszystkim stworzenia systemu jego magazynowania. Ze względu na konieczne objętości (od setek tysięcy metrów sześciennych) będą to obiekty geologiczne, tj. kawerny solne, wyeksploatowane złoża ropy i gazu albo zawodnione obiekty geologiczne. W pracy omówiono dotychczasowe osiągnięcia INiG – PIB w tej dziedzinie oraz nakreślono zakres koniecznych analiz i modelowań w celu stworzenia kompletnej metodyki badania i bezpiecznej eksploatacji tego typu obiektów.

Wodór jako ekorozwiązanie energetyczne

Wodór jako ekologiczne źródło energii zaczyna być uznawany za jeden z głównych elementów dekarbonizacji gospodarek europejskich. Może być mieszany z gazem ziemnym, może być spalany jako czysty wodór (ten rodzaj paliwa jest już stosowany do bezemisyjnego napędu samochodów).

Polska jest jednym z większych producentów wodoru w Europie. Produkuje go głównie przemysł azotowy oraz koksownie. Alternatywą jest wykorzystanie OZE do produkcji energii, a następnie wodoru metodą elektrolizy. OZE można montować np. tuż przy magazynach, co eliminuje problem transportu wodoru. Z przedsiębiorstw azotowych czy koksowni wodór trzeba byłoby dosyłać wodorowymi rurociągami.

Reasumując, źródeł wodoru mamy pod dostatkiem. Gorzej z jego efektywnym wykorzystaniem bez możliwości magazynowania. Wiatraki OZE pracują jedynie wtedy, gdy jest wiatr, z koksowni wodór i metan są uwalniane w dużych dawkach, po separacji i oczyszczeniu mogą być również wykorzystane. W sumie jednym z ważnych elementów systemu wodorowego będzie jego magazynowanie. Ze względu na konieczne objętości magazynów (od setek tysięcy metrów sześciennych) będą to głównie obiekty geologiczne.

Przyszłość wodoru jako nośnika energii w Polsce

W Polsce podjęto w szerokim zakresie problematykę wykorzystania wodoru jako ekologicznego źródła napędu samochodów oraz dodatku do metanu w sieciach gazowniczych. Istnieją również projekty bezemisyjnego otrzymywania wodoru (OZE) i jego magazynowania jako nośnika energii. Są to zarówno plany przemysłowe (PGNiG SA, Tauron), jak też prace badawcze prowadzone na uczelniach i w instytutach badawczych. Trzeba tu wspomnieć o pracach Tarkowskiego (2017, 2019), Lewandowskiej-Śmierchalskiej et al. (2018) oraz Czapowskiego (2019), w których autorzy przedstawili ranking potencjalnych obiektów do magazynowania wodoru.

INiG – PIB włączył się aktywnie w problematykę wodorową, uznając szerokie zastosowanie wodoru za jedno

z perspektywicznych rozwiązań. Są prowadzone prace związane z praktycznie wszystkimi elementami koniecznej infrastruktury wodorowej. Niniejsza praca koncentruje się na problematyce konieczności magazynowania wodoru.

Magazynowanie wodoru

Jeśli bierzemy pod uwagę systemowe zastosowania wodoru jako składnika w sieci gazowniczej i konieczność zachowania regularnych dostaw tego surowca, to do jego magazynowania muszą zostać wykorzystane struktury geologiczne, jako jedyne zapewniające możliwość magazynowania miliardów metrów sześciennych tego nośnika energii. Magazynowanie wodoru w strukturach geologicznych wiąże się z szeregiem problemów, które ogólnie można opisać jako jakość potencjalnego magazynu (ma on być szczelny, bez zachodzących ewentualnych procesów chemicznych czy biologicznych i nadających się do ciągłej eksploatacji). Ponadto z przyczyn ekonomicznych jego położenie powinno być optymalne pod względem koniecznej do budowy infrastruktury.

Przegląd potencjalnych obiektów do magazynowania wodoru

W Polsce mamy do wyboru trzy rodzaje magazynów w obiektach geologicznych. Są to: kawerny solne, wyeksploatowane złoża gazu oraz zawodnione struktury porowate.

Kawerny solne

Kawerny solne to obiekty powstające w wysadach solnych poprzez wylugowanie z nich soli. Na pierwszy rzut oka mają one same zalety, głównie ze względu na odpowiednią szczelność. Jediną drogą możliwych wypływów wodoru jest odwiert. Ponieważ nie są to obiekty porowate, ich wydajności zatłaczania/oddawania wodoru są bardzo wysokie. Można w nich tworzyć mieszanki wodoru z metanem w dokładnie zaplanowanych proporcjach. Mają one jednak również wady, do których należą: duże koszty ługowania kawern, znaczne zużycie słodkiej wody do ich wypłukiwania oraz konieczność utylizacji powstałych przy ich budowie solanek. To premiuje lokalizacje budowy w pobliżu morza i koncepcję oddawania tam solanek (co jednak budzi duże wątpliwości ekologów). Rozmieszczenie wysadów solnych na terenie kraju jednoznacznie warunkuje miejsca budowy tego typu magazynów, jednak lokalizacje te mogą nie być optymalne w kontekście transportu zmagazynowanego wodoru (mając na uwadze koszty budowy sieci gazociągów i późniejszego przesyłania gazu). Na rysunku 1 zbiornikami w kawernach są obiekty Kosakowo i Mogilno.



Rys. 1. Obecnie istniejące podziemne magazyny gazu (w kavernach i wyeksploatowanych złożach) (Kadej, 2018)

Fig. 1. Currently existing underground storages (in salt caverns and in depleted gas reservoirs) (Kadej, 2018)

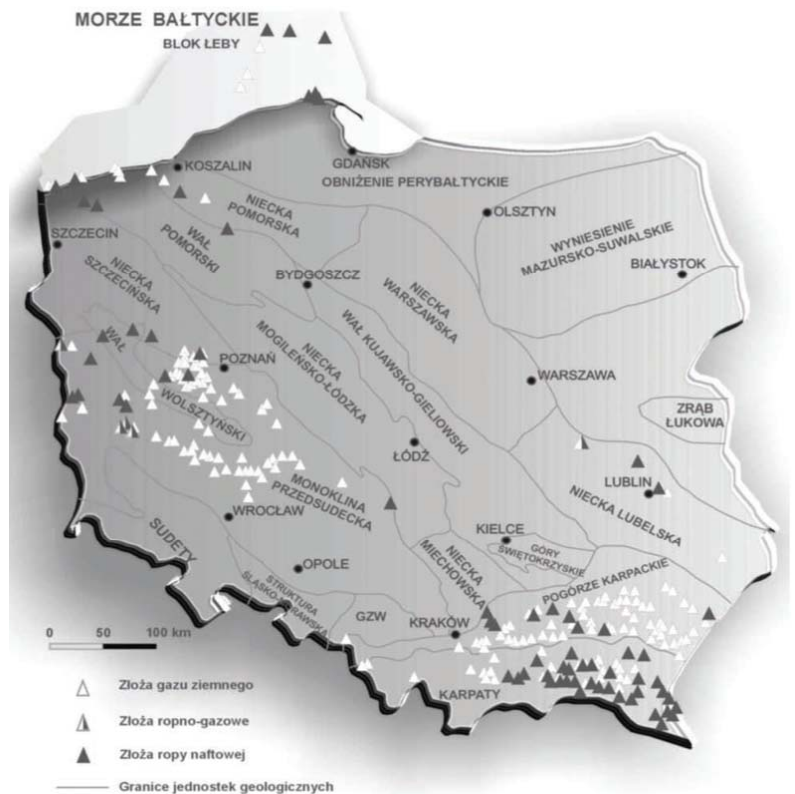
Wyeksploatowane złoża gazu

Do zalet tych obiektów geologicznych można zaliczyć: znane położenie, w znacznej części gotową infrastrukturę napowierzchniową, znaną objętość i ciśnienie początkowe gazu ziemnego. Wiadomo również, że to złożo było szczelne dla metanu. Do wad należy mniejsza elastyczność w wielkości zatłaczania i pobierania gazu. Jeśli magazyn ma być równocześnie mieszalnikiem wodoru z gazem ziemnym to proces mieszania będzie przebiegał na powierzchni.

Jeśli taki obiekt ma być dostosowany do magazynowania wodoru, konieczne jest zweryfikowanie szczelności odwiertów dla wodoru (Holewa i Rachwalski, 2009) oraz odporność skał uszczelniających. Wodór może wchodzić w reakcje z różnymi minerałami, dlatego też trzeba przeprowadzić kompleksowe badania jego wpływu na przestrzeń porową. Dodatkowym elementem są możliwe reakcje mikrobiologiczne związane z obecnością bakterii. Do tego dochodzi analiza sorpcji. W sumie każdy potencjalny magazyn wodoru w wyeksploatowanym złożu gazowym musi zostać poddany kompleksowym badaniom petrofizycznym, petrograficznym, geochemicznym i mikrobiologicznym (Reitenbach et al., 2015; Amid et al., 2016). Rysunek 2 przedstawia nierównomierne rozmieszczenie złóż gazu ziemnego, które w przyszłości mogą stać się potencjalnymi magazynami.

Głęboko zalegające wodonośne struktury porowate

W przypadku tego typu obiektów trzeba przeanalizować wszelkie dostępne dane archiwalne (takie jak: mapy geologiczne, przekroje geologiczne, wyniki badań sejsmicznych oraz wyniki wszystkich badań próbek skalnych jeśli w tym rejonie prowadzone były prace wiertnicze). Jeśli interpretacja wskaże potencjalne struktury geologiczne, należy zaprojektować i wykonać cały konieczny zestaw badań, takich samych jakie wykonywane są przy rozpoznawaniu złóż węglowodorów (tj. sejsmika, wiercenie otworów rozpoznawczych, badania geofizyki otworowej, badania petrofizyczne rdzeni). Ponadto konieczne są badania oddziaływania wodoru ze skałami w obecności wód złożowych, pomiary weryfikujące szczelność struktury, zbudowanie numerycznego modelu geologicznego i dynamicznego (Hageman et al., 2015). Model musi zawierać określenie objętości roboczej, objętości czynnej i wydajności zatłaczania i odbioru gazu. Końcowy etap to budowa infrastruktury powierzchniowej (Lewandowska-Śmierczalska et al., 2018). Ryzykiem cały czas towarzyszącym budowie tego typu magazynu jest możliwość stwierdzenia na każdym jej etapie, że dana struktura nie nadaje się na magazyn (brak szczelności, minerały wchodzące w reakcję z wodorem). Reasumując, jest to najdroższe rozwiązanie, nawet przy pozytywnym wyniku badań.



Rys. 2. Złoża gazu i ropy w Polsce (źródło: www.pgi.gov.pl)

Fig. 2. Gas and oil reservoirs in Poland (after: www.pgi.gov.pl)

Rewolucja czy ewolucja

Tytuł tego akapitu jest prowokacyjny, gdyż praktycznie nie ma takiej alternatywy. Rewolucja oznaczałaby przejście na czysty wodór. To z kolei wymagałoby nowej sieci dystrybucyjnej. Natomiast:

- jest możliwe zastosowanie domieszki wodoru do gazu ziemnego w takim stężeniu, by istniała możliwość użycia tej samej sieci dystrybucyjnej;
- mieszanie wodoru z gazem ziemnym może już dzisiaj odbywać się w kawernach solnych, ten problem został już rozwiązany;
- ponieważ objętość robocza istniejących kawern jest niedostateczna, konieczne będzie wykorzystanie również wyeksploatowanych złóż gazu. Można rozpocząć pilotażowy projekt adaptacji takiego złoża na magazyn mieszanki wodorowo-gazowej;
- kolejny projekt może dotyczyć już możliwości podziemnego magazynowania czystego wodoru.

Rola i pozycja Pionu Poszukiwań INiG – PIB w problemach związanych z magazynowaniem wodoru

Kawerny solne

W tym temacie współpraca przemysłu z Zakładem Inżynierii Złożowej INiG – PIB trwa już od roku 1998. Jej rezultaty zostały zaprezentowane w trzech pracach monograficznych (Szpunar i Budak, 1999, 2002, 2005) i dotyczą one m.in.:

- stworzenia modelu opisującego zachowanie komory w górotworze solnym;
- napisania algorytmu symulacji pracy komory;
- napisania algorytmu oceniającego możliwości powstawania hydratów w kawernie solnej;
- stworzenia programu numerycznego umożliwiającego określenie wielkości konwergencji kawerny solnej;
- określenia granicznych parametrów eksploatacyjnych tego rodzaju magazynu.

Te prace zostały uzupełnione w 2020 roku opracowaniem programu obliczającego stężenie wodoru przy jego mieszanii z gazem ziemnym (Szpunar i Budak, 2020). Reasumując, można stwierdzić, że już teraz jest możliwe magazynowanie mieszanin gazowo-wodorowych przy pełnej kontroli wszelkich koniecznych parametrów.

Wyeksploatowane złoża gazu / głęboko zalegające poziomy wodonośne

W tym wariancie sprawa się nieco komplikuje. O ile kawerny solne mogą bez specjalnych badań magazynować mieszkankę gaz-wodór, o tyle w przypadku wyeksploatowanych

złóż gazu (lub istniejących magazynów gazu w takich strukturach) konieczny jest cały kompleks badań (Such i Leśniak, 2014; Andersson i Gronkvist, 2019).

Po pierwsze, złożo szczelne dla metanu nie musi być szczelne dla wodoru, który ze względu na wielkość cząsteczki jest bardziej przenikalny. Badaniem trzeba objąć zarówno skały złożowe, jak i uszczelniające (Such et al., 2015; Sowizdżał et al., 2017).

Po drugie, należy przebadać wpływ wodoru w obecności wód złożowych na skały zbiornikowe i uszczelniające (Nermoen et al., 2016; Voake et al., 2019). Będą to procesy rozpuszczania matrycy skalnej, spoiwa czy krystalizacja minerałów wtórnych.

Po trzecie, trzeba przeprowadzić badania mikrobiologiczne ze względu na obecność bakterii i ich potencjalny wpływ na skład gazu. W tym przypadku również możliwe są różne procesy powodujące zmniejszenie się ilości wodoru w zbiorniku (od rozpuszczania matrycy skalnej do powstawania siarkowodoru) (Vance i Thrasher, 2005; Pikuta et al., 2007; Gregory et al., 2019).

Po czwarte, należy oszacować wielkość możliwej sorpcji w skałach. Chodzi tu o ocenę ilości gazu zaadsorbowanego w minerałach ilastych (spoiwo zarówno w skałach zbiornikowych, jak i uszczelniających) (Amid et al., 2016; Truche et al., 2018).

W INiG – PIB przeprowadzono szeroko zakrojone prace studialne dotyczące zakresu badań i modelowań. Znalezione partnera do ewentualnego konsorcjum – Silesian University of Technology. Konsorcjum jest już w stanie podjąć się wykonania projektu adaptacji wyeksploatowanego złoża na magazyn metanowo-wodorowy lub w zależności od potrzeb – na magazyn wodorowy. Projekt będzie dotyczył wszystkich prac związanych z badaniami skał i płynów złożowych, geomechaniki i mikrobiologii.

W ramach projektu badawczego istnieje możliwość wykonania następujących badań i analiz:

- składu petrograficznego skał;
- porowatości, przepuszczalności oraz ściśliwości (przy różnych ciśnieniach złożowych);
- wypierania wody złożowej przez gaz (wodór);
- przepuszczalności dla płynów złożowych w symulowanych warunkach złożowych;
- ciśnień kapilarnych;
- symulacji wielokrotnego przepływu przez skałę zbiornikową płynów złożowych i ich wpływu na przepuszczalność i porowatość;
- laboratoryjnych badań geochemicznych wpływu wodoru na skały uszczelniające i zbiornikowe;
- geochemicznego modelowania kinetyki reakcji woda-skała-wodór przeprowadzonego w celu określenia potencjalnych zmian środowiska.

Końcowym etapem będzie wykonanie numerycznego modelu potencjalnego magazynu.

Wnioski

1. Wodór staje się jednym z głównych czynników pozwalających na redukcję emisji CO₂, mieszanka wodoru z metanem w sieciach dystrybucyjnych może być stosowana już dzisiaj.
2. Kluczowym elementem sieci metanowo-wodorowej będzie zespół magazynów gazu pozwalający na ciągłą i elastyczną dystrybucję za pomocą istniejącej sieci gazociągów. Ze względu na konieczne objętości robocze będą to magazyny w obiektach geologicznych: kawernach solnych, wyeksploatowanych złożach węglowodorów lub w poziomach wodonośnych.
3. Rachunek ekonomiczny musi uwzględniać takie czynniki jak położenie względem sieci gazociągów czy użycie istniejącej infrastruktury w wyeksploatowanych złożach.
4. Wykorzystanie porowatych obiektów w horyzontach wodonośnych, ze względu na ogromne koszty stworzenia modelu i zagospodarowania takiego obiektu przy znacznym ryzyku, że nie spełni on wymaganych (szczególnie dla wodoru) kryteriów szczelności, będzie możliwe tam, gdzie nie ma innych możliwości magazynowania wodoru.
5. Wykorzystanie OZE i elektrolizy pozwoli na produkcję wodoru bardzo blisko potencjalnych magazynów, co powinno obniżyć koszty przesyłu i wykorzystać istniejącą po wyeksplorowanym złożu infrastrukturę.

Literatura

- Amid A., Mignard D., Wilkinson M., 2016: Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41: 5549–5558.
- Andersson J., Gronkvist S., 2019. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23): 11901–11919. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.063.
- Czapowski G., 2019. Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górno-permu (cechsztyń) w Polsce – ocena geologiczna. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 477: 21–54. DOI: 10.7306/bpig.47.
- Gregory S.P., Barnett M.J., Field L.P., Milodowski A.E., 2019. Subsurface microbial hydrogen cycling: natural occurrence and implications for industry. *Microorganisms* 7(2): 53.
- Hagemann B., Rasoulzadeh M., Panfilov M., 2015. Mathematical modeling of unstable transport in underground hydrogen storage. *Environ. Earth Sci.* 73: 6891–6898. DOI: 10.1007/s12665-015-4414-7.
- Holewa J., Rachwalski J., 2009. Kontrola szczelności podziemnych struktur przeznaczonych do magazynowania paliw gazowych metodą znacznikową i powierzchniowego monitoringu gazu glebowego. *Nafta-Gaz*, 5: 410–414.
- Kadej L., 2018. Zapasy gazu czyli magazyny energii. <<https://wysockienapiecie.pl/14685-zapasy-gazu-czyli-magazyny-energii/>> (dostęp: wrzesień 2020).
- Lewandowska-Śmierchalska J., Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2018. Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9): 4401–4414.
- Nermoen A., Korsnes R.I., Aursjø O., Madland M.V., Kjorslevik T.A.C., Østensen G., 2016. How stress and temperature conditions affect rock-fluid chemistry and mechanical deformation. *Frontiers in Physics*, 4: 1–19. DOI: 10.3389/fphy.2016.00002.
- Pikuta E.V., Hoover R.B., Tang J., 2007. Microbial extremophiles at the limits of life. *Crit. Rev. Microbiol.*, 33(3): 183–209.
- Reitenbach V., Ganzer L., Albrecht D., Hagemann B., 2015. Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. *Env. Earth Sci.*, 73: 6927–6937. DOI: 10.1007/s12665-015-4176-2.
- Sowizdział K., Such P., Leśniak G., Słota-Valim M., 2017. Ocena wpływu właściwości petrofizycznych skał łupkowych na ich efektywność uszczelniania poziomów zbiornikowych i akumulacji złożowych. *Nafta-Gaz*, 10: 730–738. DOI 10.18668/ng.2017.10.02.
- Such P., Dudek L., Mroczkowska-Szerszeń M., Cicha-Szot R., 2015. The influence of reservoir conditions on filtration parameters of shale rocks. *Nafta-Gaz*, 11: 827–832. DOI: 10.18668/NG2015.11.03.
- Such P., Leśniak G., 2014. Integration of petrophysical and petrographic data for prediction of reservoir parameters in deep-lying layers in Polish Rotliegend basin. *SCA 2014-084*, 1/7.
- Szpunar T., Budak P., 1999. Zagadnienie likwidacji hydratów w kawernowych magazynach gazu. *Prace Instytutu Nafty i Gazu*, 99.
- Szpunar T., Budak P., 2002. Konwergencja podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej oraz graniczne parametry eksploatacyjne komory magazynowej. *Prace Instytutu Nafty i Gazu*, 114.
- Szpunar T., Budak P., 2005. Konwergencja podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej w trójosiowym stanie naprężeń i odkształceń. *Prace Instytutu Nafty i Gazu*, 128.
- Szpunar T., Budak P., 2020. Zmiany parametrów mieszaniny gazu ziemnego z wodorem w trakcie eksploatacji komory magazynowej w kawernie solnej. *Nafta-Gaz*, 11: 799–806, DOI: 10.18668/NG.2020.11.05.
- Tarkowski R., 2017. Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru. *Przegląd Geologiczny*, 65(5): 282–291.
- Tarkowski R., 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 105(C): 86–94. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.051.
- Truche L., Joubert G., Dargent M., Martz P., Cathelineau M., Rigaudier T., 2018. Clay minerals trap hydrogen in the Earth's crust: Evidence from the Cigar Lake uranium deposit, Athabasca. *Earth Planet Sci. Lett.*, 493: 186–197. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.04.038.
- Vance I., Thrasher D.R. 2005: Reservoir souring: mechanisms and prevention. [W:] Ollivier B., Magot M. (eds.). *Petroleum Microbiology*. ASM Press: 123–142. DOI: 10.1128/9781555817589.ch7.
- Voake T., Nermoen A., Ravnås C., Korsnes R.I., Fabricius I.L., 2019. Influence of temperature cycling and pore fluid on tensile strength of chalk. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2): 277–288. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.12.004.
- Złóża gazu i ropy w Polsce. <<https://www.pgi.gov.pl/>>.



Dr hab. Piotr SUCH, prof. INiG – PIB
Zastępca Dyrektora ds. Poszukiwań Złóż
Węglowodorów
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: piotr.such@inig.pl