

dr hab. Paweł Łukaszewski  
Wydział Geologii  
Uniwersytetu Warszawskiego  
ul. Żwirki i Wigury 93  
02-089 Warszawa

Warszawa, 21.10.2022 r.

**Recenzja**  
rozprawy doktorskiej  
**mgr Mateusza Masłowskiego**

*Wpływ wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową na  
efektywność podsadzenia szczeliny w zabiegach symulacyjnych  
wybranych złóż niekonwencjonalnych*

Zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 21.07.2022 r. (pismo Politechniki Śląskiej RIE-BD.512.39.2022 z dnia 18.08.2022) zlecono mi ocenę pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Masłowskiego nt. „Wpływ wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową na efektywność podsadzenia szczeliny w zabiegach symulacyjnych”. Praca przygotowana została pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Małgorzaty Labus z Politechniki Śląskiej oraz dr hab. inż. Piotra Kaszy, prof. INiG-PIB z Instytutu Nafty i Gazu.

**Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska o objętości 150 stron zawiera streszczenie po polsku i angielsku, 8 rozdziałów tematycznych, spis literatury obejmujący 143 pozycji oraz spis aktów prawnych i normatywnych obejmujących 8 pozycji. Praca jest ilustrowana 85 rysunkami, znajduje się w niej 40 zestawień tabelarycznych oraz 39 wzorów matematycznych. Dodatkowo w załączniku znajduje się jeszcze 16 rysunków. Praca zawiera również spis indeksów stosowanych akronimów oraz spis symboli i jednostek.

W rozdziale 1 „Cel i teza pracy” Doktorant sformułował cel pracy polegający na „ustaleniu wpływu zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową (tzw. zjawiska embedmentu) na efektywność podsadzenia wytworzonej szczeliny w zabiegu

szczelinowania na przykładzie skał reprezentujących dwa krajowe niekonwencjonalne złoża węglowodorów”.

Aby ten cel osiągnąć Doktorant opracował autorską metodykę badań laboratoryjnych uwzględniającą wycisk materiału skalnego pochodzącego z powstałych wgnieceń na powierzchni skały.

Doktorant w pracy sformułował tezę badawczą, że „na podstawie określenia parametrów opisujących zjawisko embedmentu jest możliwa ocena efektywności podsadzenia szczeliny w zabiegach stymulacji złóż niekonwencjonalnych”

Wybór tematyki badawczej rozprawy doktorskiej mgr Mateusza Masłowskiego należy uznać za niezwykle trafny z punktu widzenia naukowego, ale co trzeba tu mocno podkreślić, mający również bardzo duże znaczenie aplikacyjne, dla zaprojektowania i przebiegu zabiegów szczelinowania w niekonwencjonalnych złożach węglowodorów.

Rozdział 2 „Wprowadzenie” składa się z trzech podrozdziałów:

2.1 Studium warunków geologiczno-złożowych i właściwości skał złożowych niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce,

2.2 Przegląd zagadnień związanych z metodyką intensyfikacji wydobycia węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych

2.3 Przegląd zagadnień związanych z analizą zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową oraz jego wpływ na efektywność podsadzenia szczeliny.

Ze względu na dużą objętość tego rozdziału (51 stron) oraz zawartą w nich znacząco różną merytorycznie treść, podrozdziały mogą stanowić niezależne, oddzielne główne rozdziały pracy. Cały rozdział 2, wskazuje na bardzo dobrą znajomość podjętej problematyki przez Doktoranta. Świadczy o tym bogata literatura cytowania oraz bardzo dobre wyjaśnienie przyczyn podjęcia tej tematyki. Rozdział ten w pewnym zakresie wytycza również przyjętą w rozprawie metodykę badawczą.

W podrozdziale 2.1 Doktorant szczegółowo przedstawił stan wiedzy na temat warunków geologiczno-złożowych niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce, w których gaz ziemny jest zamknięty w przestrzeni porowej lub matrycy skalnej. Na podstawie dostępnej literatury Doktorant wskazał obszary występowania najważniejszych formacji potencjalnie zbiornikowych dla węglowodorów w Polsce, pod kątem możliwości powstawania w nich gazu zamkniętego. Doktorant z czterech typów skał potencjalnie zbiornikowych dla złóż niekonwencjonalnych szczegółowo analizował akumulację gazu ziemnego w zwięzłych piaskowcach typu zamkniętego oraz w łupkach gazonośnych. W

rozprawie doktorskiej pominął natomiast akumulacje gazu ziemnego w zwięzłych skałach węglanowych oraz w pokładach węgla kamiennego.

Należy podkreślić, że wybór materiału skalnego do badań z wskazanych dwóch typów skał był prawidłowy i słuszny. Z najbardziej perspektywicznych, krajowych złóż węglowodorów zamkniętych w piaskowcowej skale zbiornikowej, Doktorant do badań wybrał permskie piaskowce czerwonego spągowca strefy poznańsko-kaliskiej, a z łupków gazonośnych skały ilasto-mułowcowe dolnego syluru i górnego ordowiku z basenu bałtyckiego.

W podrozdziale 2.2 Doktorant wystarczająco szczegółowo dokonał przeglądu literatury, w zakresie zagadnień związanych z metodą intensyfikacji wydobycia węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych. Przedstawił charakterystykę zabiegu hydraulicznego szczelinowania, zwracając uwagę, że jego głównym zadaniem jest otwarcie, propagacja szczeliny oraz wypełnienie jej materiałem podsadzkowym, tak aby uzyskać wysoką przewodność szczeliny.

Na podstawie literatury Doktorant przedstawił również zjawiska negatywne wpływające na efektywność podsadzenia szczelin, do których zaliczył między innymi: wgniatanie ziaren podsadzki w skałę (zjawisko embedmentu) oraz wycisk materiału skalnego z wgniecia ziaren podsadzki na powierzchni skały, czyli te zjawiska które stanowią główny temat niniejszej rozprawy doktorskiej.

W podrozdziale 2.3 na podstawie dostępnej literatury światowej i krajowej Doktorant bardzo szczegółowo zaprezentował przegląd zagadnień związanych właśnie z analizą zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową. Doktorant zwrócił uwagę, że w dostępnej literaturze związanej z zjawiskiem embedmentu oprócz teoretycznych rozważań i matematycznych modeli, przedstawiane są również rzeczywiste symulacje tego zjawiska w warunkach laboratoryjnych, zbliżonych do warunków panujących w skale złożowej. Badania w warunkach laboratoryjnych polegały na odwzorowaniu zjawiska embedmentu poprzez umieszczenie pomiędzy dwoma rdzeniami podsadzki, a następnie poddawano je działaniu naprężenia ściskającego w różnych warunkach temperaturowych, przez określony okres czasu.

Doktorant podkreślił, że wraz z pojawianiem się nowych możliwości sprzętowych do obrazowania powierzchni skał, zaczęto stosować nowe metody obrazowania wgniecia powstałych na powierzchni skały, za pomocą mikroskopów optycznych, skaningowych mikroskopów akustycznych oraz profilometrów laserowych.

Należy podkreślić, że Doktorant wystarczająco szczegółowo dokonał przeglądu literatury w zakresie głównego nurtu swojej pracy, dotyczącego wpływu wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową, na efektywność podsadzenia szczeliny w zabiegach symulacyjnych wybranych złóż niekonwencjonalnych. Bardzo wysoko oceniam przygotowane przez Doktoranta zestawienie wyników badań i analiz zjawiska embedmentu dla różnych skał z terytorium USA i Polski, przy różnych technologiach stosowanych do zabiegów hydraulicznego szczelinowania (tab. 2.1). Istotne jest również, że mgr inż. Mateusz Masłowski już od 2014 roku zajmuje się tą tematyką. Przez okres ostatnich 8 lat opublikował 12 artykułów dotyczących zjawiska embedmentu. Są to zarówno prace samodzielne jak i we współautorstwie, należy jednak zwrócić uwagę, że zawsze jest on pierwszym autorem. Świadczy to o bardzo dobrej znajomości podjętej tematyki. Efektem działalności badawczej mgr inż. Mateusza Masłowskiego jest również zgłoszony w 2021 roku we współautorstwie patent nr 237823 dotyczący sposobu wyznaczania wysokości wycisku materiału skalnego dla szczeliny.

W rozdziale 3 Doktorant przedstawił metodykę badań dotyczących wpływu zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny w wytypowanych polskich złożach niekonwencjonalnych. Doktorant podkreślił, że dla prawidłowego przeprowadzenia tych badań i analiz wykonał szereg wstępnych badań, które w efekcie umożliwiły opracowanie własnej, autorskiej metodyki przeprowadzania eksperymentów i opracowania wyników. Należy zwrócić uwagę, że Doktorant sam napisał w niniejszej rozprawie doktorskiej, że „zaprezentowane wyniki badań w artykułach Masłowskiego (2020) oraz Masłowskiego i Labus (2021), obejmowały wstępny etap badań, podsumowanych w niniejszej pracy. Zdaniem autora, sposób analizy danych pomiarowych wymagał weryfikacji i dopracowania, co uwzględniono w dalszych rozdziałach pracy”.

Doktorant szczegółowo opisał laboratoryjną symulację zjawiska embedmentu, przeprowadzoną w specjalnej komorze Embedment umieszczonej w prasie hydraulicznej. Szczelinę Doktorant wytworzył sztucznie między dwoma próbkami skalnymi (rdzeniem górnym i dolnym), wypełniając ją podsadzką o wyznaczonej według normy masie dla danej koncentracji powierzchni.

W recenzowanej rozprawie bardzo dużą rolę odgrywa opracowana przez Doktoranta autorska metodyka wyznaczania parametrów charakteryzujących zjawisko embedmentu z uwzględnieniem wycisków materiału skalnego. W celu zobrazowania powierzchni skały przed oraz po eksperymencie Doktorant wykorzystał mikroskop optyczny oraz skaningowy

mikroskopu elektronowy. Doktorant analizował zarówno profile chropowatości pierwotnej powierzchni skały jak i profile powierzchni uszkodzonej przez ziarna podsadzki. Należy podkreślić, że Doktorant słusznie analizował mniejsze obszary na powierzchniach czołowych rdzeni, ze względu na zastosowanie obiektywów o większych powiększeniach. Dla każdego z obszarów Doktorant wyznaczył po trzy odcinki pomiarowe profilu chropowatości oraz po cztery odcinki pomiarowe profilu powierzchni uszkodzonej. Łącznie dla pięciu obszarów wytypowanych dla każdego rdzenia Doktorant analizował 15 odcinków pomiarowych chropowatości powierzchni naturalnej oraz 20 odcinków pomiarowych powierzchni uszkodzonej.

Dla każdego profilu uszkodzonej powierzchni skały, Doktorant opracował metodykę wyznaczania średniej linii profilu pierwotnej powierzchni skały oraz linię uszkodzonej powierzchni skały przez wgniecenia i wyciski materiału skalnego, co umożliwiło wyznaczenie parametrów charakteryzujących zjawisko wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię skały i wycisk materiału skalnego na powierzchni skały.

Doktorant oddzielnie dla wydzielonych wgłębień i wycisków w rdzeniu górnym i dolnym wyznaczył średnią głębokość lub wysokość, średnią szerokość oraz procentowe uszkodzenie powierzchni. Następnie wyznaczył analogiczne średnie parametry, ale już łącznie dla wgłębień i wycisków najpierw oddzielnie dla górnego i dolnego rdzenia, a następnie dla obu rdzeni razem.

Parametry te posłużył dodatkowo Doktorantowi do wyznaczenia najbardziej istotnych parametrów charakteryzujących zjawisko embedmentu i wycisku materiału skalnego pod kątem efektywności podsadzenia szczeliny w zbiegach stymulacyjnych, do których zaliczył:

- całkowitą głębokość wgnieceń ziaren podsadzi wraz z wysokością wycisków materiału skalnego w powierzchnię czołową dolnego i górnego rdzenia łącznie,
- średnią procentowego uszkodzenia powierzchni ściany szczeliny spowodowane przez wgniecenia i wyciski,
- efektywną rozwartość szczeliny,
- procentową efektywność rozwartość szczeliny z podsadzką PEWF
- oraz procentową efektywną powierzchnię ściany szczeliny PEPS.

We wstępie tego rozdziału Doktorant w sposób wystarczający zaprezentował również metodykę oznaczania składu mineralnego oraz właściwości petrofizycznych skał. Należy

zwrócić uwagę, że wartości dynamicznych stałych sprężystości, Doktorant wyznaczył na podstawie pomiarów czasu przejścia fali podłużnej i poprzecznej przez próbkę skalną, w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania w temperaturze i ciśnieniu odpowiadającym warunkom złożowym w specjalnej komorze firmy Vinci Technologies. Na podstawie wartości dynamicznego modułu Young'a i dynamicznego współczynnika Poissona, Doktorant wyznaczył również wskaźnik kruchości Brittleness (BRIT), który wykorzystał do wstępnego doboru technologii wykonania zabiegu hydraulicznego szczelinowania, a w szczególności do doboru płynu szczelinującego oraz materiału podsadzkowego dla badanych formacji złożowych.

W rozdziale 4 „*Laboratoryjna symulacja zjawiska embedmentu*”, Doktorant bardzo szczegółowo przedstawił wyniki badań dotyczących zjawiska wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową. Materiał badawczy stanowiły próbki piaskowca czerwonego spągowca pochodzące z rdzeni otworu wiertniczego z głębokości 3800 m z strefy poznańsko-kaliskiej oraz próbki łupka pochodzące również z rdzeni otworu wiertniczego z głębokości 3685 m w strefie Kartuzy-Szemud. Na podstawie głębokości występowania analizowanych formacji skalnych, Doktorant określił poprawnie warunki geologiczno-złożowe zastosowane w badaniach laboratoryjnych.

Doktorant przedstawił w sposób wystarczający właściwości petrograficzne i petrofizyczne analizowanych skał. Skały te różnią się zarówno składem mineralnym jak i przepuszczalnością i porowatością efektywną. Natomiast wartości dynamicznych stałych sprężystości oraz wskaźnika kruchości dla badanych skał różnią się nieznacznie. Doktorant podkreślił, że uzyskane wartości dynamicznych stałych sprężystości są zbliżone do odpowiednich wartości otrzymanych z pomiarów geofizyki otworowej dla tych skał.

Należy podkreślić, że Doktorant poprawnie dokonał wyboru technologii szczelinowania (płynu szczelinującego i materiału podsadzkowego) na podstawie wskaźnika kruchości i właściwości mechanicznych skały.

W głównej części tego rozdziału (4.6) Doktorant przedstawił bardzo szczegółowo wyniki 4 testów laboratoryjnych zjawiska embedmentu dla dwóch skał złożowych w stanie suchym oraz po nasyceniu płynem szczelinującym. Pomimo tak małej liczby badań Doktorant bardzo dokładnie analizował uzyskane wyniki wyznaczając parametry charakteryzujące wgniatanie ziaren podsadzki w ściany szczeliny i wyciski materiału skalnego. Dla każdego rdzenia Doktorant analizował po 5 obszarów o całkowitej powierzchni od 38 do 45 mm<sup>2</sup>, co stanowiło od 7,5 do 8,9% powierzchni całego rdzenia. Należy podkreślić, że Doktorant



analizował nawet ponad 100 wgłębień oraz ponad 230 wycisków na obu rdzeniach dla jednego testu laboratoryjnego.

Cały ten podrozdział opisujący wyniki jest bardzo dobrze ilustrowany zarówno fotografiami powierzchni czołowych próbek z wytypowanymi do analizy obszarami, jak również szczegółowymi i co bardzo ważne czytelnymi zestawieniami tabelarycznymi.

Prezentując otrzymane wyniki Doktorant zwrócił uwagę, że całkowita głębokość wgnieceń wraz z wysokością wycisków w skale piaskowcowej nasyconej płynem, była o 64% wyższa od wartości uzyskanej dla skały suchej, a w przypadku skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym całkowita głębokość wgnieceń wraz z wysokością wycisków była aż o 184% wyższa do wartości uzyskanej dla skały suchej.

W celu dokonania dodatkowej oceny wpływu zjawiska wgniecenia ziaren podsadzki i wycisku materiału skalnego na zmiany powierzchni szczeliny, Doktorant przedstawił bardzo cenną i istotną analizę morfologii powierzchni skały. Należy zatem podkreślić, że oprócz analizy ilościowej zaprezentował on również bardzo interesującą analizę jakościową zjawiska embedmentu. Doktorant zaobserwował, że po wykonaniu testów dla suchej skały piaskowcowej wgniecenia były słabo widoczne i tworzyły się głównie w miejscach większego nagromadzenia spoiwa, a nasycenie skały piaskowcowej płynem szczelinującym spowodowało uplastycznienie skały, ale nie wpłynęło już znacząco na wzrost wielkości wgnieceń.

W przypadku skały łupkowej Doktorant zaobserwował dużo bardziej widoczne zmiany w morfologii powierzchni skały, a uszkodzenia powierzchni polegały na powstaniu spękań i łusek z wyciśnięcia i oderwania materiału skalnego. Za bardzo ważny rezultat pracy doktorskiej uważam, opracowane przez Doktoranta 2 szkice, przedstawiające mechanizm tworzenia się łusek podczas wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnię, w zależności od ułożenia laminacji w skale, w stosunku do powierzchni wytworzonej szczeliny. Doktorant zwrócił uwagę, że w przypadku gdy powierzchnie laminacji są prostopadłe do powierzchni wytworzonej szczeliny, uplastyczniony materiał skalny wyciskany był równomiernie wokół ziaren podsadzki. Natomiast w przypadku gdy powierzchnie laminacji są nachylone w stosunku do powierzchni wytworzonej szczeliny materiał skalny wyciskany był tylko w jednym kierunku wzdłuż laminacji.

W rozdziale 5 Doktorant przedstawił bardzo istotny i cenny element pracy doktorskiej, dotyczący analizy wpływu zjawiska embedmentu na efektywność podsadzenia szczeliny. Doktorant wyznaczył, zarówno parametry charakteryzujące przepływ węglowodorów przez

podszadzoną propantem szczelinę do odwiertu jak również parametry charakteryzujące obszar dostępny dla przepływu węglowodorów ze skały do wytworzonej szczeliny. Do najbardziej istotnych parametrów należą: efektywna rozwartość szczeliny z podsadzka oraz procentowa efektywna powierzchnia ściany szczeliny z warstwą podsadzki. Przeprowadzone przez Doktoranta badania wykazały, że efektywna rozwartość szczeliny dla obu skał nasyconych płynami szczelinującymi była nieznacznie niższa od wartości uzyskanych dla skał suchych. Natomiast efektywna powierzchnia ściany szczeliny PEPS dla suchej oraz nasyconej płynem szczelinującym skały piaskowcowej była zbliżona. Podczas gdy dla skały łupkowej nasyconej płynem szczelinującym efektywna powierzchnia ściany szczeliny PEPS była mniejsza od wartości wyznaczonej dla suchej skały.

Za równie istotny element pracy doktorskiej uważam wykonanie teoretycznych analiz wpływu zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego na efektywność podsadzenia szczelin o różnej rozwartości. W tym celu Doktorant przedstawił teoretyczną symulację tego zjawiska dla trzech dodatkowych koncentracji powierzchni, odpowiadających od jednej do kilku warstw ziaren podsadzki. Doktorant na podstawie przeprowadzonej analizy teoretycznej wykazał, że największy procentowy spadek maksymalnej rozwartości szczeliny otrzymano dla obu typów skał po nasyczeniu płynem szczelinującym przy najmniejszej koncentracji powierzchniowej podsadzki.

Oceniając niniejszą pracę należy podkreślić, że Doktorant zaproponował również nową klasyfikację efektywności podsadzenia szczeliny. Na podstawie wartości procentowej efektywności rozwartości szczeliny PEWF i procentowej efektywnej powierzchni ściany szczeliny PEPS Doktorant wydzielił pięć klas odporności skały i podsadzki na zjawisko embedmentu: od bardzo niskiej do bardzo wysokiej. Według zaproponowanej klasyfikacji sucha jak i nasycona płynem szczelinującym skała piaskowcowa oraz sucha skała łupkowa posiada wysoką oporność na zjawisko embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego (klasa 4), a nasycona płynem szczelinującym skała łupkowa posiada średnią oporność na zjawisko embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego (klasa 3).

W rozdziale 6 Doktorant przedstawił dodatkowo statystyczną ocenę uzyskanych wyników. Doktorant oszacował statystyczną istotność uzyskanych wyników, wyznaczając błąd maksymalny dla analizowanych parametrów oraz sprawdził za pomocą testu równości średnich, czy wyniki pomiarów wykonanych na różnych obszarach powierzchni czołowej rdzenia należą do tej samej populacji. Przeprowadzone przez Doktoranta analiza statystyczna wykazała, że parametry zjawiska wgniatania ziaren podsadzki w skałę i wycisku materiału



skalnego posiadały błąd oszacowania w przedziale od 8 do 14 %, a pomiary wykonane w różnych obszarach rdzeni w większości przypadków nie odbiegają znacząco od siebie w znaczeniu zastosowanej miary statystycznej.

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił bardzo ciekawą i interesującą dyskusję wyników. Rozdział ten jest moim zdaniem prawidłowo skonstruowany i przedstawia zwięzłą analizę zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego dla badanych skał.

Zaprezentowane przez Doktoranta wyniki badań dla suchej skały piaskowcowej wykazały, że sztucznie wytworzona szczelina charakteryzująca się całkowitym wgnieceniem ziaren podsadzki i wyciskiem materiału skalnego równym 0,10 mm, zmniejsza o 4,4 % maksymalną efektywność rozwarcia szczeliny, co powoduje że procentowa efektywna rozwarłość szczeliny PEWF jest bardzo wysoka i wynosi 96 %. Nasylenie płynem szczelinującym skały piaskowcowej powoduje zwiększenie całkowitego wgniecenia ziaren podsadzki i wycisku materiału skalnego do 0,16 mm, ale nadal powoduje że procentowa efektywna rozwarłość szczeliny PEWF jest bardzo wysoka i wynosi 93 %.

Dla suchej skały łupkowej Doktorant uzyskał generalnie porównywalne wyniki do otrzymanych dla suchej skały piaskowcowej. Sztucznie wytworzona szczelina w suchej skale łupkowej charakteryzowała się takim samym całkowitym wgnieceniem ziaren podsadzki i wyciskiem materiału skalnego równym 0,10 mm, a procentowa efektywna rozwarłość szczeliny PEWF jest także bardzo wysoka i wynosi 96 %. Po nasyleniu skały łupkowej płynem szczelinującym sztucznie wytworzona szczelina charakteryzowała się dużo większym całkowitym wgnieceniem ziaren podsadzki i wyciskiem materiału skalnego równym 0,29 mm. Przyczynia się to do zmniejszenia o 12% maksymalnej efektywności rozwarcia szczeliny, ale w dalszym ciągu powoduje że procentowa efektywna rozwarłość szczeliny PEWF jest bardzo wysoka i wynosi 88%.

Pracę kończy rozdział 8 „Podsumowanie i wnioski”, które moim zdaniem jest prawidłowo sformułowany i zawiera 13 ogólnych wniosków.

### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Masłowskiego ma charakter doświadczalny. Jest dojrzałym studium poświęconym zjawisku wgniatania ziaren materiału podsadzkowego w skałę złożową na efektywność podsadzenia szczeliny w zabiegach symulacyjnych wybranych złóż niekonwencjonalnych. Autor w sposób właściwy zaplanował

i wykonał badania, wykazując się doskonałym opanowaniem warsztatu badawczego. Mimo posiadania dużej ilości wyników, wynikających z szeroko zakrojonych prac charakteryzujących zjawiska embedmentu, przygotował jasno, czytelnie i przejrzystie skonstruowaną rozprawę doktorską.

Sformułowany we wstępie cel badawczy rozprawy doktorskiej został przez mgr inż. Mateusza Masłowskiego osiągnięty poprzez:

- wybranie i wyznaczenie właściwości petrograficznych i petrofizycznych dla skał reprezentujących dwa różne krajowe złoża niekonwencjonalne,
- określenie warunków geologiczno-złożowych, niezbędnych do wykonania laboratoryjnych symulacji wgniatania ziaren podsadzki w skałę,
- zaproponowanie technologii stymulacji dedykowanej dla wybranych dwóch krajowych skał niekonwencjonalnych wraz z wyznaczeniem właściwości płynów szczelinujących oraz materiału podsadzkowego,
- opracowanie metodyki przygotowania próbek, obrazowania powierzchni skały oraz badania i analizy uzyskanych wyników pomiarów.
- wykonanie symulacji zjawiska embedmentu w warunkach laboratoryjnych, zbliżonych do warunków złożowych,
- wyznaczenie parametrów charakteryzujących zjawisko embedmentu,
- analizę zmian morfologii powierzchni skały,
- analizę efektywności podsadzenia szczeliny propanem.

Oceniając recenzowaną pracę, należy podkreślić, że osiągnięciem Doktoranta jest cała praca, a za najważniejsze naukowe i praktyczne osiągnięcie należy uznać laboratoryjne symulacje zjawiska embedmentu wraz z analizą i interpretacją uzyskanych wyników dla dwóch skał złożowych, zarówno w stanie suchym jak i po nasyceniu płynem szczelinującym. Na podstawie obserwacji mikroskopowych uszkodzonych powierzchni rdzeni Doktorant wyznaczył parametry obrazujące efektywność podsadzenia szczeliny, wynikającą ze spadku rozwartości szczeliny oraz uszkodzenia skały przez ziarna podsadzki w okolicach ścian szczeliny.

Opracowana przez Doktoranta autorska metoda analizy zjawiska embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego stanowi znaczący wkład w rozwój metodyki badań tego zjawiska.

Należy podkreślić, że praca zawiera szereg nowych elementów stanowiących oryginalny, dorobek Doktoranta, do których należy zliczyć:

- opracowanie autorskiej metodyki badań laboratoryjnych zjawiska embedmentu i analizy uzyskanych wyników z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego pochodzącego z powstałych wgnieceń na powierzchni skały,
- autorski schemat powstawania szczelin i spękań podczas szczelinowania złóż niekonwencjonalnych,
- autorski schemat klasyfikacji odporności skały i podsadzki na niekorzystne zjawisko embedmentu,
- zaproponowanie statystycznej oceny uzyskanych wyników chropowatości pierwotnej powierzchni skały oraz parametrów charakteryzujących zjawisko embedmentu,
- autorskie szkice przedstawiające mechanizm tworzenia się łusek, podczas wgniatania ziaren podsadzki w powierzchnie skały łupkowej.

Zaprezentowana przez mgr inż. Mateusza Masłowskiego kompleksowa, ilościowa i jakościowa ocena procesu embedmentu z uwzględnieniem wycisku materiału skalnego stanowi znaczący wkład w rozwój tego zjawiska. Wyznaczone przez Doktoranta parametry charakteryzujące to zjawisko mogą nie tylko być pomocne przy weryfikacji rzeczywistej przewodności szczeliny, ale również ocenić rzeczywisty potencjał szczeliny w transferze węglowodorów ze złoża do odwiertu. Uzyskane przez Doktoranta wyniki mogą zatem znaleźć bardzo duże zastosowanie przy realizacji zabiegów hydraulicznego szczelinowania. Z tego też względu praca w dużym zakresie ma charakter aplikacyjny.

Recenzowana rozprawa doktorska jest napisana zrozumiale, poprawnie pod względem gramatycznym i stylistycznym, z użyciem prawidłowej terminologii, w sposób, który nie budzi zastrzeżeń. W przypadku przygotowywania rozprawy doktorskiej do druku należy jednak skorygować liczne literówki oraz uwzględnić uwagi przedstawione w niniejszej recenzji.

### **Uwagi szczegółowe i dyskusyjne**

Po zapoznaniu się z treścią pracy nasuwają się pewne pytania:

- Dlaczego Doktorant do badań wybrał tylko 2 typy litologiczne: skały piaskowcowe i skały łupkowe?
- Dlaczego Doktorant pominął skały węglanowe i węgiel kamienny?

- Dlaczego Doktorant wyciął próbki równoległe do warstwowania?
- Czy wnioski przedstawione w rozprawie można bezpośrednio przełożyć na próbki wycięte prostopadłe do laminacji dla analizowanych skał?
- Czy wnioski przedstawione w rozprawie doktorskiej można bezpośrednio przełożyć na inne złoża węglowodorów w piaskowcach strefy wielkopolsko-śląskiej lub basenu bałtyckiego oraz na inne złoża gazu ziemnego w skałach ilasto-mułowcowych basenu lubelsko-podlaskiego?

W pracy doktorskiej dostrzegłem nieliczne niedociągnięcia i błędy, które należy wyeliminować przygotowując pracę do publikacji:

- ujednolicić terminologię: fala P i S czy fala podłużna i poprzeczna w rozdziałach 3.4 i 4.2,
- poprawić nazwy parametrów, symbole i jednostki na stronie 58 i 59: dynamiczny moduł sprężystości postaciowej  $K_d$  wyrażony w GPa oraz dynamiczny moduł sprężystości objętościowej  $\mu_d$  wyrażony również w GPa.
- skorygować błędne wartości gęstości objętościowej w tabeli 4.2 na stronie 82 – prawidłowe wartości są np.  $2610 \text{ kg/m}^3$ ,
- poprawić nazwy parametrów w tabeli 4.2 na stronie 82: dynamiczny moduł Young'a, dynamiczny współczynnik Poissona, dynamiczny moduł sprężystości postaciowej i dynamiczny moduł sprężystości objętościowej,
- poprawić rodzaj cieczy zgodnie z rysunkiem 2.14 – wskaźnik kruchości – 30% – piana lub sieciowany na rysunku 4.4,
- skorygować błędną wartość liczbową efektywnej rozwartości szczeliny z podsadzką dla skały piaskowcowej nasyconej płynem szczelinującym w tekście na stronie 114,
- uzupełnić brak odwołań w tekście do rysunków zamieszczonych w załączniku.

Uwagi te nie umniejszają w żaden sposób wartości pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

### **Wniosek końcowy**

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Masłowskiego, w mojej opinii, jest bardzo wartościową pracą naukową. Autor wykazał dobrą i szeroką znajomość przedmiotu badań oraz wykazał się umiejętnością w prowadzeniu samodzielnych badań naukowych.

W wyniku przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Masłowskiego stwierdzam, że:

- rozprawa znacznie poszerza i systematyzuje dotychczasowy stan wiedzy na temat określenia wpływu wgniatania ziaren materiału podsadzkowego z uwzględnieniem wycisków materiału skalnego na efektywność podsadzenia szczeliny w zabiegach stymulacyjnych,
- zawiera szereg nowych elementów stanowiących oryginalny dorobek Autora,
- Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością przedmiotowego zagadnienia, odpowiednim poziomem wiedzy teoretycznej, umiejętnością prowadzenia prac badawczych, wnikliwością i starannością ich interpretacji oraz kreatywnością w prowadzeniu analiz i poszukiwaniu rozwiązań.

Biorąc to wszystko pod uwagę należy stwierdzić, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Masłowskiego spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r, o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U nr 65 poz.595 z późniejszymi zmianami). Stwierdzenie to upoważnia mnie do przedstawienia Wysokiej Radzie Dyscypliny wniosku o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Masłowskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Paweł Łukasiewicz  
