

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Łukasza BOLEWSKIEGO

pt.:

**„Wpływ parametrów kalibratora otworowego przeciw
pęczniejącym iłom na jakość wykonania otworu wiertniczego”**

Podstawę recenzji stanowi Uchwała Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej.

Pozyskiwanie węglowodorów kopalnych w postaci ciekłej lub gazowej jest w tej chwili warunkiem *sine qua non* istnienia współczesnej cywilizacji. Powszechnie stosowaną metodą wykonywania odwiertów jest ich orurowanie a następnie wypełnienie przestrzeni pomiędzy odwiertem a ścianą zewnętrzną rury cementem, w celu zapobieżenia przenikania węglowodorów pomiędzy warstwami skalnymi. Ma to znaczenie ze względów ekologicznych oraz bezpieczeństwa eksploatacji. Szczególnie trudne jest zapewnienie dobrej jakości uszczelnienia cementowego w warstwach skalnych pęczniejących pod wpływem absorpcji wody z płynów wiertniczych i zmniejszających światło odwiertu. W tym celu stosuje się kalibrację otworu przy pomocy specjalnych narzędzi.

Temu właśnie zagadnieniu poświęcona jest recenzowana dysertacja, w której Autor przedstawia własną koncepcję rozwiązania technicznego kalibratora i następnie na drodze numerycznej dobiera jego postać konstrukcyjną i parametry geometryczne oraz weryfikuje przydatność opracowanego narzędzia na drodze doświadczalnej. Tematyka dysertacji i postawione w niej cele posiadają duże znaczenie aplikacyjne jak również są aktualne i istotne.

Przedstawiona do recenzji praca składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, wstępu, 15 rozdziałów, wykazu literatury oraz 12 załączników. Zasadnicza część pracy liczy 122 strony.

Zakres rozprawy

W krótkim wstępie Autor uzasadnił podjęcie tematyki pracy obniżeniem ryzyka komplikacji operacji i zabiegów otworowych oraz skróceniu czasu realizacji procesu wiercenia, co ma istotne znaczenie pod względem ekonomicznym, ekologicznym i bezpieczeństwa eksploatacji. Uzasadniono to w rozdziale 1 zawierającym opis istniejącego stanu rozwoju techniki i występujących problemów.

Rozdział 2 opisuje bardzo szeroko zjawisko pęcznienia warstw ilastych oraz metod ich wykrywania podczas procesu wiercenia. Sposób przeprowadzania operacji

uszczelniania cementem rur okładzinowych, w tym opis wykorzystywanych do tego celu narzędzi oraz metody weryfikacji geometrii wykonanego otworu i badań jakości cementowania przedstawiono w rozdziale 3. Przedstawiono w nim także klasyfikację jakości zacementowania. Krótki rozdział 4 omawia transport zwiercin przy pomocy płuczki wiertniczej. Powyższe rozdziały mają charakter opisowy i służą zdefiniowaniu problemu technicznego.

Ze względu na zmniejszaniu średnicy otworu wiele producentów osprzętu górniczego przedstawia różne rozwiązania rozwiertaków (*reamer shoe*) przywracających odpowiednią geometrię otworu. Autor dysertacji w rozdziale 5 zestawia stosowane rozwiązania konstrukcyjne a w rozdziale 6 stawiane im wymagania oraz przykładową procedurę zapuszczania zestawu rur okładzinowych.

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania literaturowego oraz doświadczenia zawodowego mgr inż. Łukasz Bolewski definiuje cel pracy oraz stawia tezę (rozdział 7). Celem technicznym pracy jest opracowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego rozwiertaka, nazywanego przez Autora kalibratorem otworowym przeciw pęczniącemu iłom, wykorzystującego przepływ płuczki wiertniczej do rozdrabniania i transportu urabianego materiału. Teza jest logiczną konsekwencją tak sformułowanego celu i zakłada poprawę geometrii otworu i jakości jego zacementowania przy zastosowaniu opracowanego narzędzia. Przedstawiono schemat blokowy przyjętego programu badań, który definiuje jednocześnie strukturę rozprawy.

W rozdziale 8 zaproponowano różne koncepcje geometrii narzędzia, które po przeprowadzeniu krytycznej analizy posłużyły do opracowania wstępnej postaci konstrukcyjnej wirtualnego prototypu, który poddano wstępnym obliczeniom wytrzymałościowym *Metodą Elementów Skończonych*, w celu eliminacji nadmiernego wytwężenia mogącego spowodować doraźne uszkodzenie kalibratora.

Drugim zagadnieniem, które należało rozwiązać na drodze symulacji numerycznych, było określenie optymalnego kąta natarcia narzędzia skrawającego przy urabianiu iłu. W tym celu przeprowadzono obliczenia wykorzystujące metodę SPH (*smoothed particle hydrodynamics*). Zastosowano model urabianego materiału Druckera-Pragera.

Do rozwiązania problemu badawczego konieczna była także analiza przepływu płuczki wiertniczej, której dokonano na drodze numerycznej metodą obliczeniowej mechaniki płynów CFD (*computational fluid dynamics*). Płuczkę zdefiniowano jako ciecz nieniutonowską Herschela-Burkley'a. Uzyskano strumienie, prędkości i ciśnienia przepływu.

Rozwiązanie tych zadań posłużyło do modyfikacji postaci konstrukcyjnej, co wymagało ponownienia obliczeń MES. W rezultacie przeprowadzonych badań numerycznych uzyskano prototyp zoptymalizowany pod kątem urabiania i transportu materiału oraz wytrzymałości doraźnej. Wszystkie powyższe symulacje numeryczne opisano w rozdziale 9.

Zbudowany prototyp posłużył do badań porównawczych przeprowadzonych na odwiertach płytkich (rozdział 10), w których wykonano cementację bez użycia

kalibratora, z użyciem kalibratora oraz z użyciem kalibratora w otworze o zmniejszonej średnicy. Opisano środowiska badań i przebieg testów. Wykonano także test kalibratora w odwiercie głębokim (rozdział 11) mający na celu sprawdzenie skuteczności kalibracji.

Wyniki badań porównawczych i test głębinowego zestawiono w kolejnych rozdziałach. W tabelach zamieszczono opis stratygrafii otworu, wyniki badań wybranych warstw oraz porównanie wyników cementowania.

W końcowym 15 rozdziale pracy dokonano podsumowania, w którym zawarto ocenę wyników oraz sformułowano wnioski.

Bibliografia rozprawy liczy 84 pozycje dotyczące opisywanych zagadnień. Większość pozycji stanowią publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym z ostatnich kilkunastu lat.

Całości dopełniają załączniki opisujące badania i zgłoszenie patentowe.

Charakterystyka rozprawy

Praca dotyczy problematyki kalibrowania otworów wiertniczych do pozyskiwania węglowodorów kopalnych w postaci ciekłej lub gazowej, wykonywanych w warstwach iłów pęczniejących pod wpływem płuczki wiertniczej, co w konsekwencji prowadzi do zacieśniania otworu i może spowodować zakleszczanie oprzyrządowania i nieprawidłowe zacementowanie. Stanowi to zagrożenie dla środowiska i bezpieczeństwa eksploatacji. Znacznie zwiększa też kosztochłonność wykonania odwiertów.

Autor dysertacji proponuje nowe rozwiązanie konstrukcyjne rozwiertaka przeciw pęczniejącym iłom, wykorzystującego przepływ płuczki wiertniczej do rozdrabniania i transportu urabianego materiału z wykorzystaniem zjawiska podciśnienia, którego opracowanie wymagało przeprowadzenia złożonych symulacji numerycznych. Rozwiązanie to powinno zapewnić skrócenie czasów wykonywania odwiertów, obniżenie kosztów związanych z obrobieniem płuczki oraz polepszenie efektów cementacji. Dysertacja mgra inż. Łukasza Bolewskiego wychodzi naprzeciw tym potrzebom. Wybór tematu dysertacji jest jak najbardziej właściwy.

Rozwiązanie tego zagadnienia oprócz wiedzy i umiejętności z zakresu budowy i eksploatacji maszyn wymaga także wiedzy z zakresu górnictwa i geologii. W tym celu Autor dokonał szerokiego przeglądu istniejących rozwiązań i po ich krytycznej analizie zdefiniował założenia, które powinny zostać spełnione. To z kolei posłużyło do zaproponowania nowego rozwiązania problemu technicznego. Do nadania ostatecznej postaci konstrukcyjnej konieczne było ustalenie parametrów kalibratora. Dokonano tego stosując zaawansowane symulacje numeryczne: metodą elementów skończonych – kształtowanie wytrzymałościowe, metodą SPH (*smoothed particle hydrodynamics*) – modelowanie urabiania i kształtowanie narzędzia skrawającego oraz metodą obliczeniowej mechaniki płynów CFD – modelowanie przepływów płuczki.

Tak opracowane narzędzie posłużyło do badań *in situ* na odwiertach, w celu weryfikacji poprawności zarówno koncepcji, jak i przyjętych parametrów. Uzyskane

wyniki badań wykazały spełnienie przez prototyp narzędzia założeń odnośnie kalibracji otworu oraz usuwania zwiercin. Przy trzech otworach testowych stwierdzenie podwyższenia jakości cementacji jest trudne, szczególnie, że wyniki wierceń nie wskazały na pęcznienie iłó w otworze B1 (str. 100). Nie stwierdzono natomiast zużycia narzędzia, zwiększonych oporów ruchu, uszkodzeń doraźnych, co świadczy o przyjęciu właściwych założeń i rozwiązaniu postawionego zadania badawczego.

Opisany wcześniej zakres pracy jest obszerny i spójny. Widoczne jest kompleksowe podejście do zagadnienia i metodyczne rozwiązywanie poszczególnych zagadnień cząstkowych.

Stwierdzam, że zrealizowany przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej zakres pracy, jego wkład w rozwój wiedzy o kształtowaniu narzędzi poprawiających geometrię otworów wiertniczych w warstwach iłó pęczniących oraz zweryfikowane eksperymentalnie innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne stanowią mają istotne znaczenie.

Podstawowe osiągnięcia Doktoranta w rozprawie

Do podstawowych osiągnięć Autora i oryginalnych aspektów pracy można zaliczyć:

- ❑ dokonanie szerokiego i bardzo systematycznego przeglądu istniejącego stanu wiedzy w zakresie zjawiska pęcznienia iłó, kalibracji otworów, używanego oprzyrządowania oraz stosowanych procedur,
- ❑ dokonanie krytycznej analizy dotychczas stosowanych rozwiązań kalibratorów (*reamer shoe*),
- ❑ przyjęcie założenia wykorzystania przepływu płuczki wiertniczej do rozdrabniania i transportu urabianego materiału z wykorzystaniem zjawiska podciśnienia,
- ❑ budowa oryginalnych modeli MES, SPH i CFD i przeprowadzenie zaawansowanych symulacji numerycznych w celu kształtowania wytrzymałościowego, optymalizacji urabiania oraz przepływu strugi płuczki wiertniczej,
- ❑ wykonanie prototypu wykorzystującego wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych,
- ❑ weryfikacja prototypu w porównawczych badaniach poligonowych na odwiertach płytkich i głębokim,
- ❑ opracowanie nowatorskiego rozwiązania konstrukcyjnego, które zgłoszono do patentu europejskiego.

Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji

- ❑ Nie przedstawiono wyników symulacji przepływu dla rozwiązania przedstawionego na rysunku 47.
- ❑ Nie podano rodzaju zastosowanych elementów skończonych. Czy były to elementy niższego czy też wyższego rzędu?
- ❑ Czy w obliczeniach metodą elementów skończonych przeanalizowano znak dominującej składowej naprężenia?

- Do obliczeń wytrzymałościowych przyjęto jeden zestaw wartości parametrów iłu do modelu Druckera-Pragera. Parametry iłu zmieniają się w szerokim zakresie. Czy nie byłoby celowe wykonanie obliczeń dla różnych parametrów?
- Co oznacza, że procedura *explicit* jest metodą obliczeniową typu otwartego (str. 79)? Określa się raczej, że jest to całkowanie równań ruchu metodą jawną.
- W przeglądzie istniejących rozwiązań (rozdział 5) Autor podaje jako materiał wykonania niektórych rozwiązań buta podaje aluminium. Czy nie jest to zbyt miękki materiał? Podawany jest także kompozyt, ale nie sprecyzowano jaki.

Stwierdzono także niedociągnięcia głównie dotyczące terminologii oraz precyzji sformułowań:

- Autor używa nieprawidłowego zwrotu „dynamika wymiarów geometrycznych” (str. 21). Dynamika to dział mechaniki zajmujący się ruchem ciał materialnych pod działaniem sił;
- W języku polskim używa się terminu „skręcanie po posmarowaniu” a nie „skręcane na smarach” (str. 63), terminu „sztywność”, a nie „elastyczność” (str. 79), badania „dyfraktometrem” a nie „na dyfraktometrze” (str. 107).
- Autor używa określenie *but* lub *shoe*, co jest niekonsekwencją.
- Jakie jednostki są zastosowane w tabeli 6?
- Legendy na rysunkach z wyników symulacji (rys. 60, 68) są nieczytelne.
- Brak opisów odnośników na rysunku 47.
- Prędkość oznaczana raz wielką, raz małą literą (str. 50).
- Odwołania do rysunków i rozdziałów pisane wielkimi literami.
- Brak spisu ważniejszych oznaczeń.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny lub nie są niedociągnięciami dużej wagi. Nie obniżają one mojej pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Ocena redakcyjna rozprawy

Dysertacja zredagowana jest poprawnie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Praca charakteryzuje się właściwą strukturą, chociaż zbyt obszerny jest moim zdaniem rozdział 2 poświęcony zjawisku pęcznienia iłów. Dla uproszczenia struktury dysertacji korzystne byłoby połączenie rozdziałów 5 i 6, 10 i 11 oraz 12 i 13. Duże zastrzeżenia budzi niedopuszczalne mieszanie terminologii angielskiej i polskiej np. w tabelach z danymi materiałowymi oraz w opisach rysunków (np. str. 25, 30, 34, 84). Mieszane są jednostki SI z jednostkami imperialnymi (np. str. 24). W percepcji pracy bardzo przeszkadza niestaranność sformatowania tekstu.

Pozostałe uwagi jak np. drobne potknięcia stylistyczne i inne zaznaczyłem w przekazanym mi egzemplarzu pracy i dlatego ich tutaj nie przytaczam.

Wnioski końcowe

Praca dotyczyła określenia wpływów parametrów kalibratora otworowego przeciw pęczniącym łom na jakość wykonania otworu wiertniczego. W tym celu Kandydat opracował oryginalne koncepcje kalibratora posługując się krytyczną analizą istniejącego stanu wiedzy oraz zaawansowanymi metodami symulacji komputerowych takimi jak: MES, SPH i CFD. Zbudowano prototyp i przeprowadzono z jego użyciem badania poligonowe.

Treść zawarta w pracy odpowiada tytułowi pracy, choć jej zakres jest znacznie bardziej obszerny, bo obejmuje także opracowanie koncepcji i zaprojektowanie prototypu. Układ tematyczny pracy jest logiczny. Nie ustrzeżono się jednak pewnych błędów językowych i redakcyjnych, z których kilka przytoczyłem powyżej.

W podsumowaniu niniejszej opinii o recenzowanej rozprawie doktorskiej stwierdzam, że postawiony problem badawczy został rozwiązany, a teza została w sposób wystarczający udowodniona. Podstawowe cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte. Autor samodzielnie rozwiązał zagadnienie opracowania nowej koncepcji kalibratora do łomów pęczniących przeprowadzając zaawansowane obliczenia numeryczne i realizując poligonowe badania doświadczalne. Wymagało to wysokich umiejętności merytorycznych oraz dużego nakładu pracy. Uzyskane wyniki mają wartość poznawczą i bardzo dużą użyteczność. Praca posiada bardzo istotne znaczenie praktyczne oraz duży potencjał wdrożeniowy, o czym świadczy zgłoszenie patentu europejskiego. Wymienione powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy i w dużej mierze mają charakter dyskusyjny.

Praca jest poprawna pod względem merytorycznym, a w przedstawionych analizach Doktorant wykazał duży zasób wiedzy nie tylko z zakresu budowy i eksploatacji maszyn ale także z górnictwa i geologii, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności oryginalnego i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Autor wykazał się dobrą znajomością metod numerycznych w obszarze modelowania wytrzymałościowego i modelowania przepływów. Przedstawiona praca wykazuje dobre przygotowanie pana mgra inż. Łukasza Bolewskiego do samodzielnej pracy naukowej.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca jest oryginalna, wartościowa i przedstawia nowe osiągnięcia badawcze o znacznych walorach poznawczych, a zatem spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim.

Podsumowując podane wyżej oceny uważam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania obowiązującej Ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych stawiane rozprawom na stopień doktora nauk technicznych i dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Łukasza Bolewskiego do publicznej obrony.**

Wrocław, dnia 6 marca 2019r.

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Smolnicki