

Dr hab. inż. Paweł Flaszyński, prof. IMP PAN
Zakład Aerodynamiki
Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szwalskiego
Polskiej Akademii Nauk
Tel: 58 6995 268
E-mail: pflaszyn@imp.gda.pl

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Pawła Szewczuka

pt.: "Influence of annular space geometry and casing column motion on the drilling fluids displacement in the annuli"

w języku polskim: "Wpływ geometrii przestrzeni pierścieniowej i ruchu kolumny rur na wypieranie się cieczy w odwiercie wydobywczym"

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej oraz zlecenia Prodziekana ds. Nauki prof. dr hab. inż. Krzysztofa Kalińskiego skierowanego pismem z dnia 19.06.2017.

1. Ocena ogólna

Praca dotyczy numerycznej i eksperymentalnej analizy wpływu geometrii przestrzeni pierścieniowej i ruchu kolumny rur na transport czynnika w otworze wiertniczym. Pan mgr inż. Paweł Szewczuk zajął się istotnym zagadnieniem na styku budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki płynów i górnictwa otworowego. Wobec prowadzonych prac poszukiwawczych i eksploatacji złóż ropy i gazu w trudnych warunkach, a jednocześnie coraz większych wymagań dotyczących bezpieczeństwa oraz ochrony środowiska, analizowany problem jest ważny z praktycznego i teoretycznego punktu widzenia. Orurowanie i cementowanie otworów wiertniczych są bardzo ważnymi i odpowiedzialnym etapami w procesie wiercenia otworów, dlatego analiza wpływu parametrów geometrycznych kanału przepływowego w obszarze kolumny rur okładzinowych na efektywne wypieranie cieczy w odwiercie ma duże znaczenie dla efektywności całego procesu.

Zasadniczym celem pracy jest ocena wpływu ruchu kolumny rur oraz zmian geometrii w obszarze pierścieniowym na efektywność przepływu zaczynu uszczelniającego. Praca dotyczy zagadnień związanych z eksploatacją urządzeń wykorzystywanych w procesach wiertniczych, dlatego można ją zakwalifikować do dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Praca jest oryginalna i można stwierdzić, że ze względu na znaczenie aplikacyjne wybranego obszaru badawczego podjęta tematyka pracy doktorskiej została określona

prawidłowo, a złożoność analizowanego przepływu w otworze wiertniczym stanowi interesujące pole badań o potencjale nowości naukowej.

2. Ocena szczegółowa

Rozprawa podzielona jest na 8 rozdziałów, poprzedzonych spisem symboli i skrótów oraz rysunków i tabel, a zakończona bibliografią. Bibliografia zawiera 71 pozycji, w tym 2 prace Doktoranta. Niestety ze względu na niepełny opis bibliograficzny trudno stwierdzić, czy są to artykuły konferencyjne, czy publikacje zamieszczone w czasopismach.

W Rozdziale 1, tytułem wstępu, Doktorant przedstawił rozwój zapotrzebowania źródeł energii w ostatnich latach oraz przewidywane zużycie w okresie następnych 20 lat, wskazując na istotę prac poświęconych technologiom wydobywania paliw ciekłych i gazowych. W dalszej części omówiony jest proces cementowania otworów wiertniczych oraz ryzyka związane z błędami lub nieprawidłowościami występującymi w trakcie tego procesu. Proces jest bardzo złożony, a efektywność wypierania poszczególnych stref płynnych zależy nie tylko od parametrów geometrycznych otworu i właściwości reologicznych wypieranej masy płynnej, ale także stabilności otworu. Jako przykład konsekwencji nieprawidłowo prowadzonego procesu cementowania otworu, Autor podaje zdarzenie jakie miało miejsce w 2010 roku w Zatoce Meksykańskiej u wybrzeży Luizjany powodując katastrofę ekologiczną. Rozdział jest bogato ilustrowany rysunkami zaczerpniętymi z literatury. Niestety niektóre z nich nie mają szerszego opisu lub wyjaśnienia w tekście, przez co są mało czytelne lub zrozumiałe. Przykładem jest rys. 10, gdzie pokazano różne strefy pozostałości płuczki lub zwiercin w strefie cementowanej, ale nie wyjaśniono różnic. Z kolei rys. 12 przedstawia zapis badań prowadzonych w otworze, ale trudno jednoznacznie zidentyfikować charakterystyczne obszary.

Rozdział 2 zawiera analizę stanu wiedzy w zakresie wypierania cieczy w otworze wiertniczym oraz możliwości numerycznego modelowania tego zjawiska. Doktorant wymienia kolejne etapy zastosowania różnych modeli płynu, charakteryzuje wpływ ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego kolumny rurowej oraz wpływ jej niecentrycznego ułożenia. Doktorant wskazuje także, na badany przez innych autorów wpływ jakości powierzchni otworu. Ten fragment ilustrują rys. 34 i 35, które wobec braku wyjaśnień niestety nie niosą ze sobą dodatkowych informacji.

Podsumowując pierwszą część rozdziału Doktorant wymienia szereg parametrów istotnych dla poprawnego i efektywnego procesu cementowania. W drugiej części rozdziału przedstawiony został model matematyczny. Jednak brakuje komentarza czy przedstawiony model jest wykorzystywany do obliczeń programem Fluent i prezentowanych wyników w dalszej części pracy. Ponadto, Doktorant w części zatytułowanej „Two-phase flow control

equations” podany jest układ równań podczas, gdy analiza jest prowadzona dla przepływu jednofazowego cieczy o różnych własnościach. Układ równań jest zapisany w układzie cylindrycznym dla przepływu jedno- i dwufazowego z informacją, że przepływ może być rozważany jako przepływ jednowymiarowy. Określenie to nie jest poprawne, ponieważ równania zawierają pochodne we wszystkich kierunkach, a równanie zachowania masy (2.8) jest zapisane dla przypadku trójwymiarowego. Biorąc pod uwagę, że praca koncentruje się wokół analizy przepływu płynu nienewtonowskiego w kanale pierścieniowym, należałoby spodziewać się więcej informacji dotyczących dostępnych lub stosowanych modeli. Doktorant wspomina w pracy o możliwości występowania przepływu laminarnego lub turbulentnego (rys. 30). Niedosyt pozostawia brak zdefiniowanej liczby Reynoldsa lub Hedstroma, przydatnych do określenia wartości krytycznych.

Rozdział 3 zawiera tezy i cel pracy oraz zakres prowadzonych badań. Teza pracy jest sformułowana: „ruch posuwisto-zwrotny poprawia efektywność wypierania cieczy”. Doktorant bada także wpływ redukcji przekroju przepływu poprzez lokalne zmiany geometrii na efektywność procesu. Należy podkreślić, że badania prowadzone są nie tylko przy pomocy metod numerycznych, ale także wykonano pomiary na zbudowanym stanowisku w laboratorium Wydziału Mechanicznego. Praca jest dodatkowo wzbogacona o zamieszczone wyniki pomiarów udostępnionych przez PGNiG S.A.

Rozdział 4 zawiera wyniki obliczeń przepływu trójwymiarowego dla przypadków z ekscentrycznym kanałem pierścieniowym lub częściowym zablokowaniem przekroju przepływu. Analizie poddano 10 konfiguracji: centryczny kanał pierścieniowy, 3 przypadki z różnym stopniem ekscentryczności, 3 przypadki kanałów z przewężeniem jako efekt przylegania zwiercin oraz 3 przypadki reprezentujące blokowanie przekroju przepływu na części obwodu. Wybrane konfiguracje charakteryzują określone sytuacje jakie mogą mieć miejsce podczas wiercenia otworu, a które istotnie wpływają na bezpieczeństwo i skuteczność procesu cementowania.

Wyniki obliczeń numerycznych zawartych w pracy stanowią jej istotny element, dlatego nasuwa się pytanie dlaczego wykorzystana metoda, model przepływu oraz warunki brzegowe zostały opisane tak skromnie. Doktorant wspomina o wpływie zagęszczenie siatki na uzyskiwane wyniki, ale trudno jest jednoznacznie stwierdzić jaki jest jej wpływ. Na rys. 47 pokazano przykładowy wpływ siatki na „błąd”, ale brak jest definicji tego błędu. Poza tym zamieszczone odniesienie do pozycji w spisie literatury wskazuje na odniesienie do innych wyników obliczeń, nie prezentowanych przez Doktoranta. Doktorant podkreśla, że w niektórych przypadkach konieczna była redukcja kroku czasowego, jednak w pracy brakuje informacji jaką wartość kroku lub liczbę Couranta stosowano.

W tabeli 3 (str. 52) podano 7 różnych cieczy, których właściwości reologiczne zostały wyznaczone przy pomocy reometru rotacyjnego Brookfield. Obliczenia wykonano dla płynu VII, gdzie woda była czynnikiem wypierającym. Niestety nie ma informacji jaki model płynu nienewtonowskiego wykorzystano i jakie zmierzone wielkości wstawiono do modelu. Paragraf zatytułowany „Boundary conditions” nie zawiera warunków brzegowych. Brakuje informacji jakie natężenie przepływu jest rozważane, lub jakie prędkości założono w przekroju wlotowym, albo czy analizowano przepływ przy określonym spadku ciśnienia. Warto byłoby dodać także liczbę Reynoldsa, aby określić charakter analizowanego przepływu.

Interesujące wyniki pokazano na rys. 54-56 wskazując na wpływ narastającej ekscentryczności kanału pierścieniowego. Jednak nie wyjaśniono lub nie podjęto próby dyskusji co może być przyczyną istnienia stref zawierających ciecz wypieraną, które pozostały w wybranych strefach przestrzeni przepływowej. Kolejne pytanie dotyczące wpływu zmian geometrii nasuwa się przy okazji analizy prędkości w wybranym przekroju (rys. 57), co jest przyczyną istnienia większego obszaru o obniżonej prędkości w przypadku 50% niż w przypadku 75%.

Wpływ redukcji przekroju o 25%, 50% i 75% pokazano na rys. 58-60. Doktorant stwierdza, że przewężenie kanału ma mały wpływ na efektywność wypierania cieczy, co potwierdza wykres na rys. 66. Do pełnego obrazu warto byłoby podać definicję analizowanej efektywności, a także wyjaśnić jak interpretować uzyskane wartości w odniesieniu do przedstawionych obrazów na rys. 53-65. Wizualizacja przepływu w zakresie 2 sekund wskazuje na istnienie intensywnej strefy mieszania za obszarem kontrakcji, co może wynikać ze wzrostu prędkości w przewężeniu. Brakuje informacji czy masowe natężenie w analizowanych przypadkach jest jednakowe, czy może zachowana jest różnica ciśnień na wlocie i wylocie z badanego obszaru. Podobne pytania można postawić w odniesieniu do wyników, gdzie analizowany jest wpływ blokowania części przekroju i czy model płynu może mieć istotne znaczenie dla uzyskanych wyników. Wartości prędkości przedstawione na rys. 65 sugerują, że założono warunek natężenia przepływu na wlocie, ale czy w takim razie uzyskane prędkości przepływu są realne, albo jak duży jest spadek ciśnienia w tym obszarze.

W rozdziale 5 opisano stanowisko pomiarowe oraz zamieszczono wyniki prac eksperymentalnych uzupełnionych dodatkowymi symulacjami numerycznymi. Projekt, budowa stanowiska oraz wykonanie pomiarów stanowi istotny wkład Doktoranta umożliwiający stworzenie bazy danych wykorzystywanych do walidacji modelu numerycznego. Badania laboratoryjne umożliwiają analizę ekscentryczności kanału oraz wpływ ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego wewnętrznego pierścienia. Efektywność wypierania cieczy była wyznaczana w oparciu o pomiar przewodności elektrycznej

przepływającej cieczy w wybranych położeniach wzdłuż kanału. Natężenie przepływu było mierzone przy pomocy elektromagnetycznego przepływomierza, którego błąd pomiarowy przedstawiono na wykresie 75. Niestety w pracy brakuje informacji o analizowanym zakresie prędkości, czy natężeniu przepływu. Nie podano także wymiarów kanału pierścieniowego, co umożliwiłoby oszacowanie liczby Reynoldsa. W pierwszych etapach badań analizowano przepływ w koncentrycznym kanale pierścieniowym. Przykładowe zdjęcia w trakcie procesu wypierania cieczy w pionowej kolumnie zamieszczono na rys. 86. Przedstawione obrazy wskazują na mieszanie się obu płynów w trakcie fazy wypierania. Autor podaje, że powierzchnia rozdziału jest wyraźna i prostopadła do osi kanału. Takie stwierdzenie wymagałoby doprecyzowania lub wyraźnego zaznaczenia na fotografiach tej strefy. Przeprowadzony zakres badań umożliwia ocenę jaki jest wpływ na kąta nachylenia kolumny lub doboru płynów efektywność wypierania cieczy w zależności od prędkości obrotowej. Jak wykazano, możliwa jest poprawa poprzez zastosowanie ruchu posuwisto-zwrotnego. Nasuwa się pytanie z czego wynika wybór częstotliwości (0.2-0.4 Hz) i jaka jest amplituda tego ruchu. W dalszej części rozdziału Doktorant zamieścił wyniki prezentujące wpływ przemieszczenia osi pierścienia wewnętrznego i zewnętrznego, przewężenia kanału oraz jego częściowej blokady. Wpływ ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego był badany tylko w pierwszym przypadku. Doktorant wskazuje na znaczną poprawę efektywności wypierania cieczy przy wymuszeniu ruchu kolumny, podając lokalny przyrost nawet o 23.5%. Jednak trudno jest zidentyfikować ten efekt w oparciu o dane zawarte w Tab. 5 (str. 77). Rozdział ilustrują także wyniki obliczeń przepływu trójwymiarowego przedstawione w postaci rozkładu udziału cieczy wypieranej lub wypierającej w danej objętości. Na stronie 79 pojawia się stwierdzenie „Creation of so called finger flow (Figure 95) and spiral flow (Figure 96) have been recreated in experimental conditions”. Dlaczego w pracy nie zamieszczono żadnego obrazu przedstawiającego ruch spiralny, a jedynie wyniki obliczeń? Doktorant stwierdza, że widać jak istotny jest wpływ właściwości reologicznych na proces wypierania cieczy. Rzeczywiście rys. 97 i 98 wskazują na istotne różnice, jednak bez odpowiedzi pozostaje pytanie jaki model płynu zastosowano i czy rozwiązanie w badanym zakresie jest niezależne od parametrów numerycznych modelu. Innym stwierdzeniem wymagającym dyskusji jest „Comparison of experimental and simulation results shows necessity for further CFD model optimisation. It should be noted that the trend from simulation results has been confirmed by laboratory tests outcome in all instances”. Nasuwa się pytanie, które wykresy, rysunki lub wartości umożliwiają jednoznaczne porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów. Przedstawione wyniki obliczeń umożliwiają jakościową ocenę przepływu, ale trudno jednoznacznie wnioskować o zaletach lub wadach stosowanego modelu.

W rozdziale 6 Doktorant przedstawił udostępnione przez PGNiG S.A. wyniki badań otworu wiertniczego. Prezentacja wyników jest poprzedzona krótką charakterystyką metod inspekcji wykonywanych otworów. Przykładową rozkład średnicy otworu wzdłuż jego osi pokazano na rys. 105, gdzie wyraźnie widoczne są obszary o silnych zmianach, które mogą istotnie wpływać na proces cementowania. Doktorant przywołuje w tym miejscu wcześniej analizowane przypadki przewężenia kanału pierścieniowego lub jego częściowej blokady i ich możliwy wpływ na proces cementowania. Dostępne wyniki badań są interesujące, jednak ich opis pozostawia szereg niejasności wynikających ze skrótowo zamieszczonego opisu. Istotnym dla końcowych analiz są wykresy na rys. 106 i 107, ale brak skali zamieszczonych barw utrudnia ich interpretację. Ponadto, Doktorant zwraca szczególną uwagę na wybrany fragment rys. 107 odwołując się do analiz przedstawionych w rozdziałach 4 i 5, wskazując na przepływ spiralny jako prawdopodobną przyczynę silnie nierównomiernego rozkładu cementu. Niestety, bez odpowiedzi pozostaje pytanie skąd taki wniosek. Wydaje się, że można byłoby wykorzystać dostępne wyniki obliczeń i porównać rozkład udziału obu płynów w objętości (wartości chwilowe i uśrednione w czasie) oraz naprężeń stycznych umożliwiające analizę efektów przyściennych.

Praca jest zakończona podsumowaniem i wskazówkami dotyczącymi przyszłych prac oraz proponowanych zmian wykorzystywanego stanowiska badawczego. Doktorant w podsumowaniu podkreśla wpływ analizowanych parametrów geometrycznych, gęstości płynów i natężenia przepływu na proces cementowania. Wskazuje także na pozytywny wpływ ruchu posuwisto-zwrotnego rur na efektywność procesu. Wnioski zostały przedstawione w sposób ogólny, a ich wartość znacznie wzrosłaby gdyby w oparciu o dostępne wyniki prac numerycznych i eksperymentalnych wskazano efekty ilościowe.

Praca doktorska została napisana w języku angielskim. Praca jest bogato ilustrowana rysunkami i fotografiami. Doktorant zamieścił 107 rysunków na stu stronicowej pracy, co dobrze wizualizuje analizowane zagadnienie. Niektóre z nich wymagałyby dodatkowego wyjaśnienia w celu zrozumienia zawartych informacji. Ogólnie można stwierdzić, że praca jest napisana poprawnie, chociaż nie uniknięto pewnych pomyłek, literówek lub sformułowań wymagających korekty, np.:

- rys. 11 – pokazany diagram procesu korozji, ale brak szerszego wyjaśnienia w tekście,
- rys. 12 – nie wyjaśnione fragmenty wykresu, skrótowo opisany, ale istotny dla dalszej części pracy,
- rys. 30 – czym różnią się oba rysunki, z czego wynika opis „laminar” lub „turbulent”,
- rys. 34 i 35 – brak wyjaśnienia,
- wzory 2.18 i 2.20 są błędne,

- rys. 47 – jaka jest jednostka „mesh size” i jak interpretować tą wartość?
- rys. 76 i 77 – nie wyjaśniono jaka jest funkcja przedstawionych elementów i co oznacza „machined with satisfactory accuracy”,
- rys. 82 – jaką informację niesie ze sobą ten „rysunek”, brak opisu kolumn i jednostek,
- rys. 92 – odwrócona kolejność rysunków względem pokazanych na rys. 91 i 93,
- rys. 104 – wydaje się, że taki format danych lepiej jest przedstawić na wykresie,
- rys. 109 – brak odniesienia w tekście.

3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Doktorant podjął w rozprawie ważny problem dotyczący analizy wpływu geometrii przestrzeni pierścieniowej i ruchu kolumny rur okładzinowych na transport czynnika w otworze wiertniczym.

Doktorant wykonał prace eksperymentalne na zbudowanym stanowisku w laboratorium Wydziału Mechanicznego oraz wykazał umiejętność wykonywania obliczeń przepływu niestacjonarnego w ośrodku wypełnionym cieczą nienewtonowską.

Wyniki analiz wskazują na pozytywny wpływ ruchu obrotowego i posuwisto-zwrotnego wewnętrznych ścian kanału pierścieniowego na przepływ w badanym kanale, co może mieć duże znaczenie dla poprawy efektywności procesu cementowania otworów wiertniczych. Uzyskane wyniki obliczeń mają duży potencjał poznawczy i stanowią potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a uwagi krytyczne zawarte w recenzji nie pomniejszają wartości przedstawionej pracy doktorskiej.

Uważam, że praca doktorska mgr inż. Pawła Szewczuka pt. „Influence of annular space geometry and casing column motion on the drilling fluids displacement in the annuli” odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Pawel Flapin