



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Katedra Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok,
tel. 571 443 089
505 835 170
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 21.11.2021

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela Buczkowskiego *Coupled Fluid-Structure Interaction Numerical Model of the Shock Absorber Valve*

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, Pani Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak, pismo RD(Me)/24/006/20202/2021 z dnia 22 września 2021.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Pan Dr hab. inż. Grzegorz Nowak, Prof. Uczelni.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim. Rozprawa obejmuje 169 stron. Rozprawa składa się z następujących części: zestawienia oznaczeń, wstępu (rozdział 1) w którym został zamieszczony cel i zakres pracy, rozdziałów 2-3 prezentujących aktualny stan wiedzy, rozdziałów 4-8 prezentujących własny materiał badawczy, podsumowania (rozdział 9), zestawienia bibliograficznego, streszczenia w języku polskim i angielskim. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Introduction**, w którym Autor dokonał przeglądu stanu ogólnej wiedzy dotyczącej układów zawieszenia pojazdów samochodowych, a także sformułował cel i zakres pracy.
2. **Technology**. W rozdziale w został zamieszczony syntetyczny opis stanu techniki w zakresie rozwiązań amortyzatorów samochodowych.
3. **Literature review – shock absorber models**. W rozdziale tym Doktorant przedstawił analizę aktualnego stanu badań w zakresie modelowania amortyzatorów samochodowych.
4. **Theory of numerical model ling (FSI)**. W rozdziale tym Doktorant przedstawił ogólne aspekty modelowania zagadnień sprzężonych przepływowych i dynamicznych.
5. **Experimental testing of shock absorbers**. W rozdziale zostały przedstawione stanowiska do badań zaworów roboczych amortyzatorów samochodowych.
6. **Semi-empirical damper model**. W rozdziale zaprezentowano zasadnicze elementy modelu pół-empirycznego dla amortyzatora samochodowego.
7. **Numerical model**. W rozdziale zaprezentowano w sposób szczegółowy własny model numeryczny trzech typów zaworów roboczych amortyzatorów.

Biuro Dziekana

wptynęło dnia 20.11.2021
nr 23/RD/Me/006
nr 2021/2021 zat. 2 egzempl.

B

8. **Numerical results.** W rozdziale zaprezentowano uzyskane wyniki obliczeń numerycznych dla trzech typów zaworów roboczych amortyzatorów.
9. **Summary and conclusions.** W Rozdziale tym Doktorant dokonał syntetycznego podsumowania uzyskanych wyników i wskazał rekomendacje w zakresie praktycznego ich wykorzystania.
10. **Bibliografia** zawierająca wykaz 95 pozycji literatury, obejmująca najnowsze publikacje z renomowanych czasopism międzynarodowych, referaty z międzynarodowych konferencji naukowych, publikacje książkowe, monografie, rozprawy oraz źródeł technicznych. W spisie literatury znalazło się 48 artykułów naukowych z renomowanych czasopism specjalistycznych z listy JCR oraz międzynarodowych czasopism specjalistycznych, 18 pozycji książkowych, monograficznych i rozpraw, 11 referatów naukowych.

II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował zasadniczy zakres rozprawy w Rozdziale 1.2. Zasadniczy cel rozprawy sformułowany został następująco: „The main goal of this work is to create a comprehensive approach to the modelling of the shock absorber valve operation based on numerical methods”. Ponadto Doktorant sformułował uzupełniający cel pracy następująco: “An additional goal is to ensure a rational calculation time from the point of view of industrial application, which was adopted at the maximum level of 12 hours (overnight) for a single case (determination of full characteristics of the valve)”.

Dla tak postawionego celu pracy, Doktorant nakreślił zakres pracy - wskazując konieczność wykonania badań eksperymentalnych oraz analizy numerycznej dla trzech typów zaworów roboczych amortyzatorów: zaworu o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek, zaworu zwrotnego (z jedną płytką oraz sprężyną dociskającą) oraz zaworu kontrolowanego przecieku. Za kluczową podejście w zakresie modelowania tych zaworów przyjęto FSI (Fluid-Structure Interaction) z zastosowaniem schematu dwutorowego.

Tak postawiony cel oraz zakres rozprawy dotyczy aktualnych zagadnień badawczych o otwartym charakterze, jego realizacja stanowi rzeczywiste wyzwanie o charakterze poznawczym oraz metodycznym. Szczególnie istotny jest także walor aplikacyjny tkwiący w tak postawionym celu oraz zakresie pracy doktorskiej, co stanowi ważną okoliczność w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych.

Cel, zakres rzeczowy oraz teza rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy przedstawionej w Rozdziale 2 w zakresie rozwiązań technicznych oraz w Rozdziale 3 w zakresie rozwoju metod modelowania amortyzatorów samochodowych. Niewątpliwie sformułowany cel oraz wskazany zakres rozprawy ze sobą w pełni korespondują, program prac o charakterze modelowania numerycznego oraz badań eksperymentalnych pozwalających na dokonanie walidacji ze sformulowanym celem w pełni korespondują. W układzie pracy, przy tak postawionym celu oraz zakresie - znajdują się wątki o charakterze prac w zakresie zaawansowanych metod modelowania zagadnień sprzężonych przepływowych i dynamicznych oraz badań eksperymentalnych. Rozprawa podejmuje zagadnienia coraz intensywniej rozważane w literaturze naukowej i technicznej, wobec czego uzyskanie znaczących poznawczo oraz metodycznie rezultatów stanowi rzeczywiste wyzwanie. W tym kontekście wskazany cel oraz tezę postawioną w rozprawie uznaję za adekwatne.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty obliczeń numerycznych oraz wyniki badań eksperymentalnych – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy i są adekwatne do jego osiągnięcia.

III. Treść rozprawy

We Wstępie rozprawy Doktorant zamieścił skrótowe omówienie ogólnych aspektów związanych z rozwojem technologicznym oraz metod modelowania amortyzatorów samochodowych. Rozdział wstępny kończy sformułowanie celu i zakresu pracy (do których odniosłem się w punkcie II niniejszej recenzji).

W Rozdziale 2 Doktorant przedstawił systematykę budowy amortyzatorów samochodowych, ich budowę oraz zasadę działania. Omówił szczegółowe rozwiązania zaworów roboczych amortyzatorów, ich działania, typowe charakterystyki ich pracy oraz podejmowane prace rozwojowe. W szczególności omówione zostały zawory tłokowe, zawory denne, zawory o konstrukcji specjalnej sterowane skokiem tłoka bądź częstotliwością wymuszeń, a także zawory kontrolowanego przecieku.

Rozdział 3 rozprawy poświęcony został przeglądowi aktualnego stanu w zakresie rozwoju metod modelowania akumulatorów samochodowych. Dokonany został krytyczny przegląd modeli z podziałem na modele funkcjonalne w podejściu jedno- i wielowymiarowym z uwzględnieniem różnych podejść do formułowania empirycznych równań zamknięcia dla tychże modeli, jak również modele hybrydowe oraz modele oparte na numerycznym rozwiązywaniu równań różniczkowych mechaniki ośrodków ciągłych opisujących zjawiska fizyczne mechaniczne i przepływowe zachodzące w analizowanych amortyzatorach. Wskazano zwłaszcza na konieczność rozwoju metod modelowania numerycznego w zakresie sprzężonych zagadnień przepływowych i mechanicznych z uwagi na ograniczenia w zakresie dokładności predykcji, uniwersalności zastosowań bądź wymaganego kosztu numerycznego.

Rozdział 4 poświęcono zagadnieniom modelowania sprzężonego zjawisk przepływowych i mechanicznych (FSI, Fluid-Structure Interaction). Omówione zostały ogólne aspekty dotyczące modelowania FSI, zwłaszcza w aspekcie podejścia jedno- oraz dwutorowego w zakresie sprzężenia modelowania procesów przepływowych oraz dynamiki konstrukcji. Opisane zostało w sposób ogólny podejście do modelowania numerycznego dynamiki konstrukcji z zastosowaniem metody elementów skończonych. Bardziej szczegółowo omówiono zagadnienia modelowania zjawisk przepływowych, w tym omówiono równanie ruchu Naviera-Stokesa oraz stosowane różne podejścia do modelowania przepływów turbulentnych z zastosowaniem modeli DNS, LES bądź RANS z charakterystyką różnych klasycznych modeli turbulencji.

W Rozdziale 5 zaprezentowano skrótowo stanowiska wykorzystane do badań eksperymentalnych zaworów roboczych amortyzatorów. W pierwszej kolejności omówione zostało stanowisko z zastosowaniem siłownika serwo-hydraulicznego, następnie przedstawiono stanowisko indywidualnie zbudowane do badań własności przepływowych zaworów roboczych amortyzatorów. W końcowej części rozdziału przedstawiono stanowisko do badań własności dynamicznych zaworów roboczych amortyzatorów.

W Rozdziale 6 przedstawiony został model pół-empiryczny w ujęciu klasyfikowanym w rozprawie jako model funkcjonalny. Doktorant zwrócił uwagę na to, że model ten został

opracowany przez firmę Tenneco, w związku z czym zostały przedstawione jedynie zasadnicze elementy podejścia w zakresie modelowania przepływów oraz pracy pakietu płytek w zaworze o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek.

Zasadniczą część własnych osiągnięć Doktorant przedstawił w Rozdziałach 7 oraz 8. W Rozdziale 7 przedstawiono w sposób szczegółowy zaproponowane podejście do modelowania sprężonego przepływu przez trzy typy zaworów roboczych oraz zjawisk dynamicznych związanych z pracą elementów sprężystych zaworów. W pierwszej kolejności przedstawiono formułowanie modelu FSI dla zaworu tłokowego o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek. Podjęto zagadnienia przygotowania geometrii analizowanego zaworu oraz określenia siatki numerycznej dla obszaru przepływu oraz obszaru elementów konstrukcyjnych zaworu. Rozpatrzono uwarunkowania symetrii dla geometrii analizowanego zaworu umożliwiające ograniczenie do 1/10 części objętości zaworu. Podjęto zagadnienia walidacji gęstości siatki numerycznej oraz modelowania obszaru przyściennego z zastosowaniem parametru y^+ jako kryterium. W dalszej kolejności podjęta została analiza zastosowania modeli turbulencji (przeanalizowano modele realizabile k- ϵ , RNG k- ϵ , SST k- ω , transition SST oraz przepływ laminarny jako model odniesienia). Na podstawie analizy porównawczej wybrano model realizabile k- ϵ jako dający porównywalne z innymi modelami wartości przy ograniczonym koszcie numerycznym. Doktorant wskazał, że podejście w zakresie formułowania modelu numerycznego dla innych typów zaworów wymaga odmiennego, indywidualnego podejścia. Kolejnym zaworem rozpatrywanym w tym rozdziale jest zawór zwrotny z jedną płytką oraz sprężyną dociskającą. Z uwagi na specyfikę konstrukcji zaworu – modelowaniu numerycznemu podlega obszar odpowiadający ¼ symetrycznej części zaworu. W sposób analogiczny do poprzedniego typu zaworu – dokonano analizy przyjętego obszaru przepływowego oraz elementów strukturalnych zaworu, rozpatrzono zagadnienie uproszczenia w zakresie modelowania sprężyny, dalej rozpatrzono walidację gęstości siatki numerycznej oraz przyjęty krok czasowy w aspekcie sprzężenia modelu przepływu oraz elementów strukturalnych zaworu. W końcowej części rozdziału przedstawiono sformułowanie modelu numerycznego dla zaworu kontrolowanego przecieku. Również w tym przypadku uwarunkowania symetrii pozwoliły na modelowanie numeryczne dla obszar odpowiadającego ¼ symetrycznej części zaworu. W sposób analogiczny do powyżej przyjętej metodyki – dokonano analizy przyjętego obszaru przepływowego oraz elementów strukturalnych zaworu, rozpatrzono zagadnienie uproszczenia w zakresie modelowania płytki sprężystej (z modelowaniem płytki gniazda zaworu jako ośrodka nieodkształcalnego), rozpatrzono walidację gęstości siatki numerycznej oraz przyjęty krok czasowy w aspekcie sprzężenia modelu przepływu oraz elementów strukturalnych zaworu. W końcowej części rozdziału dokonano ogólnego podsumowania odnośnie przyjętej metodyki modelowania w zakresie kroku czasowego, generacji siatki numerycznej z uwzględnieniem przemieszczeń elementów konstrukcyjnych, zastosowanie dopasowywania sił w sprzężeniach iteracji obliczeniowych oraz przepływów w aspekcie zastosowanych warunków brzegowych.

W Rozdziale 8 zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych dla rozpatrywanych trzech typów zaworów, a także wyniki badań eksperymentalnych w oparciu o które zaproponowane modele numeryczne zostały walidowane. Dla zaworu tłokowego o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek rozpatrzono trzy warianty geometryczne warunkujące uzyskanie konstrukcji o mniejszej lub większej sztywności oraz z płytką z kryzą. Uzyskane wyniki w zakresie charakterystyk spadek ciśnienia – strumień objętości porównano z rezultatami badań eksperymentalnych oraz wynikami obliczeniowymi uzyskanymi z modelu pół-empirycznego przedstawionego w Rozdziale 6. Wskazano na zadawalającą dokładność predykcji przy

zastosowaniu zaproponowanego modelu numerycznego. Dokonano analizy pola ciśnień statycznych oraz prędkości oleju w obszarze przepływowym, a także pól naprężeń von Misesa oraz odkształceń płytek roboczych zaworu. Doktorant rozpatrzył ważny aspekt dotyczący pojawiającej się histerezy w fazie pracy kompresji oleju. Rozpatrzył on cztery wersje geometrii zaworu z zastosowaniem różnej ilości płytek oraz ich grubości., przy czym wersja podstawowa odpowiadał geometrii dla której eksperymentalnie zidentyfikowano zjawisko histerezy charakterystyki zaworu. W analizie przyjmowano także różne wartości współczynnika tarcia dla płytek. Analiza uzyskanych rezultatów doprowadziła Doktoranta do kluczowego wniosku, że zjawiskiem odpowiadającym za powstanie histerezy jest tracie zestawu płytek roboczych. Należy podkreślić wagę uzyskanego rezultatu w aspekcie dyskusji w literaturze naukowej dotyczącej identyfikacji przyczyn powstania histerezy w pracy tego typu zaworów. Doktorant zademonstrował, że zastosowanie modelowania sprężonych zagadnień FSI pozwala na znacznie bardziej wnikliwą oraz efektywną analizę fizyczną zjawisk, niż w oparciu o wyłącznie badania eksperymentalne bądź zastosowanie modeli uproszczonych. W przypadku zaworu zwrotnego z jedną płytką oraz sprężyną dociskającą Doktorant przedstawił wyniki badań eksperymentalnych dla napięcia sprężyny zaworu 30 N oraz 70 N. Zamieszczone wyniki obliczeń wskazują na ograniczenia w zakresie dokładności predykcji z zastosowaniem modelu pół-empirycznego oraz zaproponowanego modelu numerycznego w ujęciu FSI. Za przyczynę powstałych rozbieżności Doktorant wskazał niesymetryczną pracę elementów sprężystych w zaworze, czego nie uwzględnił zaproponowany model numeryczny. Aby udowodnić tę hipotezę, Doktorant przeprowadził dodatkowe badania eksperymentalne z zastosowaniem papieru (laminatu) ciśnienioczułego dla obydwu sprężyn o napięciu 30 N oraz 70 N. Potwierdziły one postawioną hipotezę. Z uwagi na powstały problem, w dalszej analizie wzięto pod uwagę rezultaty uzyskane dla sprężyny o napięciu 70 N, dla której uzyskano w obliczeniach lepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Dla tego przypadku rozważono pięć różnych parametrów pracy zaworu (częstotliwość, amplituda przepływu, skok i prędkość ruchu drąga). Przeanalizowane zostały rezultaty obliczeń numerycznych w postaci zależności spadku ciśnienia od znormalizowanego skoku płytki zaworu (odpowiadającego jednocześnie znormalizowanemu czasowi przepływu). Dla analizowanego przypadku przedstawiono także rozkłady ciśnień i prędkości oleju. W przypadku zaworu kontrolowanego przecieku przeanalizowano łącznie 12 wariantów geometrycznych (średnica kryzy, grubość płytki ograniczającej, grubość płytki roboczej). W tym przypadku wykonane analizy obejmowały porównania charakterystyk ciśnienie-strumień objętości, a także rozkłady ciśnień statycznych oraz prędkości oleju. Porównane zostały dwa przypadki geometryczne z wynikami badań eksperymentalnych wskazujące na dużą zgodność – zwłaszcza uwzględniającą odmienny charakter pracy zaworu z zastosowaniem różnych grubości płytki ograniczającej. Wskazane czasy obliczeń dla wszystkich rozpatrywanych zaworów mieszczą się w pełni w ramach zakładanego czasu 12 godzin i wynoszą zwykle do 5 godzin. Oznacza to, że zasadniczy cel pracy został osiągnięty.

W Rozdziale 9 Doktorant dokonał podsumowania zawartych w rozprawie prac analitycznych oraz uzyskanych rezultatów. W szczególności dokonał syntetycznego podsumowania rezultatów obliczeń numerycznych wskazując na dobrą ich zgodność z wynikami badań eksperymentalnych. Istotnym elementem podsumowania jest także dyskusja w zakresie możliwości implementacji opracowanych metod modelowania FSI w praktyce przemysłowej, a także wskazanie potrzeb rozwojowych tychże metod.

IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy kluczowych zagadnień z punktu widzenia aktualnych problemów badawczych w obszarze amortyzatorów samochodowych. W rozprawie zaproponowano oryginalne ujęcie zagadnienia modelowania sprzężonych zagadnień przepływowych i dynamiki konstrukcji – pozwalających na uzyskanie zaawansowanego oraz dokładnego narzędzia do predykcji działania zaworów roboczych amortyzatorów samochodowych. Opracowane podejście w zakresie modelowania numerycznego pozwoliło na dokonanie racjonalnej analizy zjawisk fizycznych zachodzących w zaworach roboczych amortyzatorów samochodowych. W szczególności, pozwoliły na wyjaśnienie aspektów fizycznych zjawiska histerezy pracy zaworu tłokowego o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek, a także wskazanie na brak symetrii osiowej pracy elementów sprzężystych zaworu zwrotnego z jedną płytką oraz sprężyną dociskającą. Zagadnienia te możliwe były do przeanalizowania dzięki zastosowanemu zaawansowanemu modelowaniu FSI. Przedmiotowa rozprawa wnosi zatem ważny wkład nie tylko metodyczny, lecz także poznawczy. Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty mogą znaleźć zastosowanie w obszarze wykraczającym poza zakres amortyzatorów samochodowych, w tym przykładowo w wielu różnych dziedzinach techniki cieplnej i energetyki, np. przy modelowaniu pracy zaworów roboczych sprzężarek.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie szczegółowej metodyki zaawansowanej metody modelowania sprzężonych zagadnień przepływowych oraz dynamiki konstrukcji dla trzech typów zaworów roboczych amortyzatorów samochodowych, tj.: zaworu o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek, zaworu zwrotnego (z jedną płytką oraz sprężyną dociskającą) oraz zaworu kontrolowanego przecieku;
- wyjaśnienie aspektów fizycznych powstania histerezy pracy zaworu tłokowego o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek, a także wskazanie na brak symetrii osiowej pracy elementów sprzężystych zaworu zwrotnego z jedną płytką oraz sprężyną dociskającą.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą wkład poznawczy w dziedzinie techniki samochodowej, a biorąc pod uwagę możliwości zastosowania opracowanej metody modelowania zaworów roboczych – także szerzej w technice cieplnej i energetyce. Zagadnienia te mieszczą się w obszarze dotyczącym dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

V. Wartości użytkowe rozprawy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie bardzo duży walor aplikacyjny, wynikający wprost z jej tematyki, charakteru oraz zakresu rzeczowego. Podejmowane prace prowadzone są w aspekcie możliwości ich aplikacji we współpracy z firmą Tenneco, wynikają one zatem bezpośrednio z potrzeb partnerów przemysłowych. Zastosowanie podejścia FSI pozwala na racjonalny rozwój metod predykcji pracy zaworów amortyzatorów samochodowych, co stwarza możliwości rozwojowe tych urządzeń. Podejmowane prace Doktorant podjął w sposób oryginalny, twórczy oraz z zastosowaniem zaawansowanych nowoczesnych narzędzi metodycznych. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie

doktorskiej zaprezentowano dojrzały warsztat pracy badawczej w obszarze nauk technicznych, w tym zwłaszcza w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne ujęcie podejmowanego zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie materiał wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają raczej charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny. Zamieszczam je w kolejności właściwej dla układu rozprawy.

1. W Rozdziale 4.2 zagadnienia modelowania dynamiki konstrukcji zostały przedstawione w postaci bardzo ogólnej wskazując tylko, że są one opisane przez układ równań różniczkowych (niesprecyzowany). Warto byłoby doprecyzować także, czy w modelowaniu bierze się pod uwagę również wymianę ciepła – o możliwości takiej wspomniano tylko w bardzo ogólny sposób.
2. W Rozdziale 4.3 omówiono w sposób ogólny równanie ruchu wykorzystywane w oprogramowaniu do obliczeń CFD. Warto byłoby także podjąć wyjaśnienie roli członów źródłowych w równaniu (4). Warto byłoby także wyjaśnić aspekty konieczności bądź możliwości wykorzystania również równania zachowania energii, zwłaszcza w aspekcie uwzględnienia w modelowaniu zagadnień wymiany ciepła, które zostały pominięte w modelowaniu zjawisk przepływowych w analizowanych przypadkach amortyzatorów.
3. W Rozdziale 5 zamieszczono ogólny opis trzech stanowisk badawczych. Zamieszczony materiał byłby bardziej czytelny oraz użyteczny przy lekturze, gdyby zostały zamieszczone informacje dotyczące zastosowanych przetworników pomiarowych, niepewności pomiarowej oraz planu i metodyki prowadzonych badań eksperymentalnych.
4. W Rozdziale 6 zamieszczono ramowy opis modelu pół-empirycznego. Niewątpliwie pracę wzbogaciłaby dokładniejsza prezentacja tego modelu, pozwalająca na głębszą analizę porównawczą tego modelu z wynikami badań eksperymentalnych. Pomocna byłaby w tym celu prezentacja kompletu równań modelowych wraz ze wskazaniem wielkości przyjętych jako zmienne niezależne, a także prezentacja przyjętej postaci równań zamknięcia dla modelu opartych na danych eksperymentalnych (bez podawania wartości współczynników, które wedle informacji zawartej w rozprawie - stanowią własność partnera przemysłowego). Warto byłoby także wskazać, czy Doktorant miał udział w opracowaniu bądź rozwoju modelu zaprezentowanego w Rozdziale 6.
5. W Rozdziale 7.1 podjęto zagadnienie walidacji siatki numerycznej dla analizowanego zaworu o konstrukcji stosu zaciśniętych płytek w ten sposób, że dla najdrobniejszej siatki przyjęto referencyjny poziom ciśnienia. Prezentacja byłaby czytelniejsza, gdyby został w sposób czytelniejszy zdefiniowany przyjęty poziom referencyjny ciśnienia. Warto byłoby także rozważyć, czy nie byłaby korzystniejsza ocena niezbędnej gęstości siatki na podstawie wyników wydatku objętościowego.
6. W Rozdziale 7.1 dokonano oceny doboru modelu turbulencji na podstawie uzyskiwanego spadku ciśnienia w zaworze. Wybrany został model turbulencji realizable $k-\varepsilon$ jako dający porównywalne z innymi modelami wartości przy ograniczonym koszcie numerycznym. Takie podejście jest niewątpliwie racjonalne. Ostateczną rekomendację w tym zakresie

można jednakże oprzeć na eksperymentalnej identyfikacji pól prędkości wykonanej np. z zastosowaniem metody PIV - praktykowanej w badaniach amortyzatorów, o czym wspomniano w przeglądzie stanu wiedzy w Rozdziale 3.

7. W Rozdziale 7 dokonano porównań wyników badań eksperymentalnych z wynikami obliczeń modelu numerycznego FIS oraz modelu pół-empirycznego. Warto byłoby przy tych porównaniach uwzględnić fakt, że model pół-empiryczny mógłby mieć znacznie poprawioną dokładność predykcji, gdyby zastosowano w nim równania zamknięcia właściwe dla rozważanych w pracy geometrii układów zaworów roboczych.
8. W Tabeli 8 należałoby uzupełnić dane dotyczące rozważanych w Rozdziale 8.4 przypadków 13, 14 oraz 15.

VI. 2. Uwagi porządkowe

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie bardzo wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwalam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

- W kilku miejscach rozprawy pojawia się pomyłkowe odwołanie do nieistniejącego Rozdziału 0 (str. 49, 63, 150, 152)
- Zestawienie literatury – dla pozycji [72] należałoby uzupełnić dokładniejsze dane bibliograficzne.

VII. Uwagi końcowe

Praca jest starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono w niej wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi sprzężonymi zagadnieniami przepływowymi i mechanicznymi zachodzącymi w układach zaworów roboczych amortyzatorów samochodowych. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy. Szczególnie wartościowym aspektem rozprawy jest zamieszczona w rozprawie krytyczna analiza prezentowanych własnych osiągnięć, co świadczy o bardzo dojrzałym warsztacie naukowym Doktoranta i podnosi wkład prezentowanych badań do dyscypliny naukowej.

W rozprawie zamieszczono informację, że realizowane prace badawcze zostały dofinansowane ze środków projektu uczelnianego 11/DW/2017/01/1.

VIII. Wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla mechaniki ośrodków ciągłych, w tym mechaniki płynów. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak poziomowi oryginalności osiągnięć poznawczych oraz

metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty aplikacyjne, gdyż opracowane rozwiązanie możliwe jest do implementacji w technice samochodowej i umożliwia dalszy rozwój metod modelowania, jak również postęp techniczny w zakresie nowoczesnych rozwiązań amortyzatorów samochodowych. W moim przekonaniu Doktorant opanował warsztat pracy badawczej w dziedzinie nauk technicznych. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Daniela Buczkowskiego spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Mechaniczna.

Drs Roman S