

prof. dr hab. inż. Wojciech Adamczyk

Politechnika Śląska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Katedra Techniki Ciepłej

Recenzja

Podstawą do opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Stempka „Modelowanie numeryczne zapłonu wymuszonego i samozapłonu w turbulentnych przepływach wielofazowych”

promotor: prof. dr hab. inż. Artur Tyliszczak

było pismo Dziekan Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki prof. dr hab. inż. Małgorzaty Klimek zgodnie z Uchwałą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 32/2021/2022 z dnia 30 czerwca 2022 roku.

Ocena celowości podjętej tematyki

Treść pracy doktorskiej jest zgodna z tytułem i obejmuje badania modelowe (numeryczne) obejmujące proces samozapłonu i zapłonu wymuszonego zachodzącego w turbulentnych przepływach dwufazowych.

Głównym celem rozprawy było opracowanie kompleksowego modelu numerycznego pozwalającego na modelowanie zjawiska zapłonu kropel paliwa w silnie turbulentnych warunkach. Opracowany model został wykorzystany jako wirtualny eksperyment w celu zweryfikowania postawionej przez autora dysertacji tezy, iż *wyniki symulacji zjawiska zapłonu są w podobnym stopniu zależne od cząstkowych modeli przepływu dwufazowego sformułowanych na gruncie przesłanek fizycznych, jak i metod ich numerycznej implementacji oraz metod dyskretyzacji.* Weryfikacja postawionej tezy wymagała od kandydata przeprowadzenia szeregu prac mających na celu dostosowanie otwartego, akademickiego oprogramowania CFD SAILOR do rozwiązania poruszanego w rozprawie doktorskiej problemu.

Politechnika Śląska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Katedra Techniki Ciepłej

ul. Konarskiego 22, pok. 54, 44-100 Gliwice

+48 32 237 23 78 Wojciech.Adamczyk@polsl.pl

Należy na wstępie podkreślić, że Autor w pracy wykazał się bardzo obszerną wiedzą z zakresu matematyki, fizyki, a także ponad przeciętnymi umiejętnościami programistycznymi.

Podjęta przez Autora tematyka jak najbardziej wpisuje się w aktualne trendy ukierunkowane na ograniczenie emisji szkodliwych gazów do atmosfery, gdzie dzięki wykorzystaniu odpowiednich narzędzi obliczeniowych będzie możliwa optymalizacja istniejących oraz nowych jednostek wytwórczych. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego Autor wykazał, iż podjęta tematyka wpisuje się w obecne trendy, gdzie paliwa ciekłe będą w dalszym ciągu nośnikiem energii chemicznej. Autor wskazał także na wysoką potrzebę posiadania dokładnych narzędzi obliczeniowych pozywających na zastąpienie często kosztownych i bardzo ukierunkowanych badań empirycznych, co wpisuje się w działania mające na celu cyfryzację przemysłu. Niemniej jednak, jak podkreśla to Autor pracy, proces ten jest złożony i wymaga szczególnego podejścia. Dostępne narzędzia obliczeniowe wymagają ciągłej poprawy oraz implementacji nie tylko nowych, ale i ulepszania istniejących modeli matematycznych stosowanych do opisu danych zjawisk fizycznych.

Podjęta przez Autora tematyka jest związana z modelowaniem numerycznym samozapłonu, zapłonu wymuszonego i spalania w przepływach dwufazowych. Autor podjął próbę zamodelowania wpływu oddziaływania kropeł paliwa na strukturę płomienia, a w konsekwencji na proces spalania. Zaimplementowanie opracowanych przez Autora modeli matematycznych do procedury obliczeniowej było zadaniem bardzo wymagającym przede wszystkim z uwagi na konieczność połączenia ze sobą podejścia Eulera z modelem Lagrange do śledzenia ruchu cząstek oraz ich oddziaływania na formowane wiry.

Poprzez wykorzystanie opracowanego przez Autora modelu możliwe jest przeprowadzenie wielowariantowych symulacji numerycznych pozwalających na odpowiedni dobór parametrów projektowanego rozwiązania oraz przanalizowanie wpływu wybranych parametrów modeli matematycznych na modelowane zjawiska.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej została wybrana prawidłowo, a całość podjętej pracy uwarunkowana była nie tylko potrzebami naukowo-badawczymi, ale przede wszystkim jej potencjalnymi efektami praktycznymi.

Rozprawę Doktorant zawarł na 122 stronach tekstu zasadniczego. Praca jest bogata w wysokiej jakości formy graficzne, zawiera spis symboli matematycznych, skrótów, tabel, rysunków oraz wymagane przepisami streszczenie w języku polskim i angielskim. Spis literatury zawiera 167 pozycji z czego większość stanowią prace opublikowane po 2016 roku.

Ocena rozprawy

Praca doktorska została podzielona na dwie główne części oraz 10 rozdziałów. W recenzji skoncentruję się na omówieniu metodologii podjętej przez Autora, w celu osiągnięcia zdefiniowanego celu pracy. Uważam, iż zaproponowany przez Autora podział dysertacji jest poprawny, choć rozdziały 1-6 opisujące tematykę badawczą stanowią łącznie ponad połowę pracy. Nie mniej jednak, po przanalizowaniu zawartej w rozdziałach treści uważam, iż stanowią wartościowe źródło wiedzy, gdzie zostały podsumowane najistotniejsze elementy kodu CFD.

W rozdziale „Model matematyczny i metodyka badań” Autor poświęcił sporo uwagi na opisanie zastosowanych modeli matematycznych, w tym budowę poszczególnych członów w metodzie LES. Kolejny rozdział obejmuje wyjaśnienie dostępnych i zastosowanych modeli spalania wraz z ich wykorzystaniem przy stosowaniu podejścia LES. Autor jednak poświęca niewiele uwagi zastosowanemu w pracy jednostopniowemu mechanizmowi kinetyki chemicznej kierując czytelnika do pozycji literaturowej [118]. Autor podaje wartości poszczególnych współczynników w członie opisującym szybkość reakcji chemicznej bez powołania się na literaturę.

W rozdziale 5 Autor pracy skupił się na opisie modeli odpowiedzialnych za modelowanie procesu odparowania kropli paliwa. W części poświęconej dynamice spreju brakuje jednoznacznego stwierdzenia, która z wymienionych przez Autora sił jest dominującą. Proszę mnie poprawić, ale przypuszczam, że pominięcie np. sił Saffmana i Magnusa nie będzie miało znaczącego wpływu na obliczaną wartość prędkości cząstek płynu. Następnie Autor przechodzi do opisu procesu odparowania kropli paliwa. Równanie 5.17 to finalna postać równania opisującego zmianę temperatury kropli paliwa w czasie. Wydaje się być uzasadnione, aby Autor przedstawił ogólną postać równania energii oraz sposób, w jaki finalna postać równania 5.17 jest uzyskiwana. Autor wspomina, że w pracy zastawano 3 modele odparowania, proszę mnie skorygować, ale nie

widziałem w jaki sposób równania te są wykorzystywane, oddzielnie czy w postaci hybrydy ze zdefiniowanym warunkiem przejścia pomiędzy poszczególnymi modelami. W rozdziale, może nie zauważyłem, ale brakuje informacji w jaki sposób modelowany jest wpływ rozkładu cząstek na turbulencję. W jaki sposób rzeczywisty rozkład cząstek został uwzględniony w opracowanym modelu? W jaki sposób uwzględniono w rozkładzie zróżnicowaną masę kropeł?

Rozdział szósty poświęcony został na omówienie algorytmów obliczeniowych. Autor w rozdziale 5 przy okazji opisu członów źródłowych wspomina, iż ich szczegółowy opis znajduje się w rozdziale 6, gdzie w rozdziale 6.2.2 znajduje się zgrubny opis sposobu wyznaczania członów źródłowych. Może warto te dwa rozdziały skonsolidować?

Następny rozdział skupia się na weryfikacji poszczególnych modeli (rozdział 7). Może warto by było rozważyć zmianę słowa weryfikacja na weryfikacja i walidacja, ponieważ Autor wspomina również o wykorzystaniu danych pomiarowych do walidacji modelu odparowania. W przypadku porównania danych z symulacji z wynikami eksperymentu mówimy o walidacji, a nie weryfikacji. Autor przywołuje wynik eksperymentu Saharina i in. [6] oraz wspomina, iż do celów „weryfikacji” odwzorowano warunki eksperymentu, nie mniej jednak wydaje się uzasadnione, aby Autor przybliżył więcej informacji na temat wskazanego eksperymentu w pracy tak jak to ma miejsce w rozdziale 9.1. W treści „*Na rysunkach oznaczonych (a) wyniki uzyskano z zastosowaniem Procedury 1 (równanie 5.32), a w przypadku wyników na rysunkach oznaczonych (b) zastosowano Procedurę 2, (równanie 5.33).*” - jakich rysunków dotyczy komentarz? Proszę podać i zweryfikować czy w treści podane są odniesienia do rysunków.

W rozdziale 7.2 pierwszy akapit, Autor powołuje się na badania eksperymentalne, ale nie podaje jakie. Używanie stwierdzenia „skomplikowanej kinetyki chemicznej” wydaje się być zbyt „agresywne”, może wystarczy „mechanizm reakcji”. W tabeli 7.1 zostały zebrane wartości współczynników, nie ma jednak informacji na jakiej podstawie zostały ich wartości wytypowane dla poszczególnych modeli.

W dalszej części dysertacji Autor skupił się na wykonaniu szeregu symulacji turbulentnej czasowej strefy mieszania (TCSZ) wraz z analizą otrzymanych wyników. Seria symulacji ukierunkowana na

badanie samozapłonu została wykonano dla dwóch wartości współczynnika rozkładu oraz wykorzystując opisane w pracy modele odparowania oraz schematy dyskretyzacji. W przedostatnim akapicie rozdziału 8.1.1 Autor opisuje wpływ udziału objętościowego na zastosowany model, podczas gdy wcześniej nie było to omawiane. Zgadzam się, że oddziaływania cząstka cząstka mogą być pomijane, nie mniej jednak przy dużych kroplach oddziaływania te mogą mieć znaczenie nawet przy małym udziale objętościowym. W ostatnim akapicie tego samego rozdziału Autor wspomina *zakres stosowalności praktycznej*, jaki to jest zakres? Kolejne podrozdziały analizują TCSZ w różnych konfiguracjach badanych parametrów, mając na celu weryfikację działania opracowanego globalnego modelu do symulacji spalania kropeł paliwa.

Rozdział 9 zawiera wyniki symulacji numerycznych przeprowadzonych dla turbulენტnej strugi dwufazowej. Rozdział ten stanowi prezentację działania opracowanych i zaimplementowanych przez Autora modeli obliczeniowych, skupiając się na zjawisku samozapłonu oraz stabilizacji płomienia. Seria obliczeń została wykonana przy zastosowaniu dwóch schematów dyskretyzacji analizowanych przez Autora, tj. TVD oraz WENO. Należy tutaj podkreślić, że mimo bardzo dużej liczby przeprowadzonych testów opis wyników badań jest bardzo syntetyczny i zawiera niezbędne dane do walidacji modelu numerycznego na poziomie omawianym w dysertacji. Rozdział ten stanowi źródło wartościowych danych dla badaczy zajmujących się podobną tematyką. W rozdziale tym brakuje mi jednak wskazania dokładności badań eksperymentalnych, czy też tego, co pozwoliłoby na zdefiniowanie obszaru błędów. Informacja taka jest niezwykle pomocna w sytuacji, gdy analizowany jest wpływ niepewności modelu numerycznego na błędy pochodzące z niepewnych danych eksperymentalnych, chyba że dane eksperymentalne nie są obciążone błędem. Należy tutaj pamiętać, że każde dane eksperymentalne są obciążone błędem i nie zawsze źródłem różnic pomiędzy modelem a danymi eksperymentalnymi są błędy pochodzące z modelu matematycznego czy numerycznego.

Rozdział 10 stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej, Autor zwrócił w nim szczególną uwagę na metodologię prowadzonych badań oraz uzyskane wyniki analiz numerycznych. Podkreślone zostało kompleksowe podejście do analizy procesu spalania spreju. Podsumowano wpływ analizowanych modeli, poszczególnych parametrów na samozapłon, odparowanie oraz stabilność

plomienia. Autor zaproponował także dalszy kierunek badań mający na celu poprawę dokładności opracowanych i zaimplementowanych modeli obliczeniowych, tym samym zwiększając zakres stosowalności rozwijanego kodu akademickiego.

Zawartych w powyższym opisie uwag nie należy odczytywać jako zarzutów, gdyż warto podkreślić, że rozprawę doktorską czyta się bardzo dobrze, napisana jest dobrym stylem. Czasem można spotkać skrót myślowy, które wynikają zapewne z biegłej znajomości realizowanej przez Kandydata tematyki. Uwagi nie umniejszają wartości pracy doktorskiej, a recenzowana praca wnosi wiele elementów nowości naukowej. Opisane przez Autora modele oraz ich implementacja potwierdzają szeroką wiedzę kandydata. Na szczególne podkreślenie zasługuje biegłość Autora w omawianej tematyce, dodatkowo Doktorant pewnie porusza się w obszarze symulacji numerycznych. Należy tutaj podkreślić, iż wykorzystanie akademickiego oprogramowania wymagało od Kandydata ogromnego nakładu pracy, gdzie efekty widoczne są w poszczególnych rozdziałach opisujących działanie modeli. Sformułowany cel naukowy został przez Kandydata osiągnięty. Mimo drobnych uwag o charakterze dyskusyjnym pracę oceniam bardzo wysoko.

Oryginalność i główne walory rozprawy

Kandydat zrealizowała bardzo szeroki zakres badań numerycznych co pozwoliło na walidację opracowanych modeli obliczeniowych dla różnych parametrów.

Zakres zrealizowanej pracy stanowi oryginalny dorobek Kandydata, który bez wątpienia jest wartościowy pod względem naukowym i praktycznym.

Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest bardzo interesujący i z pewnością wart dalszej popularyzacji poprzez publikacje oraz konferencje naukowe. **Należy tutaj podkreślić, że Kandydat jest już współautorem kilku publikacji naukowych w wysoko punktowanych czasopismach z listy JCR, co jest niewątpliwym sukcesem.**

Wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej, biorąc pod uwagę przedstawione wcześniej uwagi i spostrzeżenia **stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Jakuba Stempka rozprawa pt. „Modelowanie numeryczne zapłonu wymuszonego i samozapłonu w turbulentnych przepływach wielofazowych” spełnia w całości określone wytyczne z Rozporządzenie Ministra Nauki I Szkolnictwa Wyższego.**

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie naukowej, w której prowadzony jest przewód doktorski, dowodzi także jego umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych.

Wobec powyższych faktów wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej o dopuszczenie pracy doktorskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Dodatkowo wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Z wyrazami szacunku

Prof. dr hab. inż. Wojciech Adamczyk