

Lublin, 20.11.2021

Dr hab. inż. Jacek Hunicz
Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Zrównoważonego Transportu i Źródeł Napędu
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Jaworskiego pt.

Numerical simulation of internal combustion engine phenomena with LES combustion model

Podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr. hab. inż. Roberta Sitnika z dnia 20 września 2021 roku.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Jaworskiego pt.: „*Numerical simulation of internal combustion engine phenomena with LES combustion model*” została wydana w formie monografii na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej w 2021 roku. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk.

Praca, została napisana w języku angielskim i zawarta na 129 stronach. Tytuł rozprawy jest dość ogólnie sformułowany, czyli *Symulacja procesów silnikowych z zastosowaniem modelu dużych wirów turbulentnych*. Tytuł oddaje zawartość pracy, gdyż Autor położył nacisk głównie na proces badawczy a nie na obserwowane zjawiska.

Bibliografia składa się ze 116 pozycji naukowych. Większość przywoływanych prac są to publikacje zagraniczne, w dużej mierze autorstwa znanych w świecie naukowców zajmujących się badaniami silników, a w szczególności spalania. Wśród prac, do których odwołuje się autor jest 25 pozycji wydanych w ciągu ostatnich 10 lat, a 8 pozycji wydanych było w ciągu ostatnich 5 lat. Nie uznaję tego za oznakę nieaktualności pracy, ponieważ starsze publikacje są fundamentalne dla rozwoju przedmiotu pracy, czyli modelowania procesów roboczych silników spalinowych, a w szczególności turbulentnego spalania w silnikach. Dobór literatury wskazuje, że Doktorant posiada dobre rozeznanie w temacie pracy. Z drugiej jednak strony, w tak szybko

rozwijającej się dziedzinie jak modelowanie numeryczne złożonych procesów fizykochemicznych można było sięgnąć po więcej najnowszych prac. Liczba prac na ten temat powiększa się bardzo szybko, więc pewne ostatnie osiągnięcia mogły umknąć Autorowi.

2. Ocena wyboru tematyki i rozprawy

Złożoność procesów spalania oraz współzmiennność parametrów regulacyjnych w silnikach powodują, że badania wyłącznie doświadczalne nie dostarczają wszystkich potrzebnych informacji. Dlatego też modelowanie odgrywa znaczącą rolę w rozwoju systemów spalania. Modele mogą być wykorzystywane zarówno jako uzupełnienie badań podstawowych nad obserwowanymi zjawiskami, jak również do optymalizacji konstrukcji, czy opracowania metod sterowania.

Rola modelowania w badaniach procesów roboczych silników spalinowych zwiększa się, a przedstawiona praca wpisuje się w ten nurt. Tematyka rozprawy jest więc aktualna, ale jednocześnie trudna. Zaawansowanym modelowaniem spalania w silnikach zajmuje się wąska grupa specjalistów najwyższej klasy, do której z pewnością zalicza się Doktorant. Również obiekt badań jest nowoczesny, czyli silnik z bezpośrednim wtryskiem benzyny do cylindra spalający ładunek uwarstwiony, co powoduje, że modelowanie jest większym wyzwaniem niż w przypadku mieszaniny jednorodnej.

3. Ocena metod badawczych i zakresu badań

W swoich badaniach Doktorant wykorzystał pakiet symulacyjny AVL FIRE. Do modelowania przepływów turbulentnych zastosowano metodę LES (large eddy simulation), która jest obecnie uznawana za najlepszą do opisu aerodynamiki i spalania w silnikach tłokowych, ze względu na kompromis pomiędzy czasem obliczeń a dokładnością symulacji. Metoda LES opiera się na połączeniu metody uśredniania równań Naviera-Stokesa (RANS) z bezpośrednią analizą numeryczną (DNS). Duże struktury wirowe są rozwiązywane niejawnie poprzez filtrowanie równań Naviera-Stokesa, a przepływ w małej skali jest modelowany modelem podsiatkowym (SGS).

Model LES uzupełniony został przez Doktoranta o własne modyfikacje, co stanowi jego główne osiągnięcie oraz wkład w rozwój narzędzi badawczych. Mianowicie Doktorant zaimplementował w programie symulacyjnym model spalania oparty na metodzie gradientu oraz model opóźnienia samozapłonu.

Adekwatność modelu została zweryfikowana na dwa sposoby: poprzez porównanie z empirycznymi badaniami płomienia palnika oraz badaniami na jednocyldrowym silniku

o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem benzyny.

Do weryfikacji symulacji płomienia palnika wykorzystano dane z pracy Chena i innych, w której przedstawiono dokładne dane dotyczące struktury płomienia. Modelowanie przeprowadzono dla tych samych warunków co badania empiryczne. Do weryfikacji posłużyły profile prędkości, turbulentnej energii kinetycznej oraz udziałów produktów spalania. Porównanie wyników empirycznych i symulacyjnych należy uznać za potwierdzające adekwatność modelu. Przyczyny różnic zostały wyjaśnione, np. jako skutki przyjętych założeń.

Dodatkowo zweryfikowano wzór empiryczny na opóźnienie samozapłonu. Tutaj posłużono się badaniami empirycznymi Tanaki na maszynie pojedynczego sprężu.

Do weryfikacji symulacji procesów wewnątrz cylindra silnika wykorzystano dane pozyskane od firmy AVL, co tłumaczy dlaczego silnik badawczy jest sfotografowany na palecie. Weryfikacji dokonano w jednym punkcie pracy silnika określonym przez prędkość obrotową i średnie ciśnienie indykowane. Analizowano kilka cykli pracy silnika.

Badania silnikowe powinny być zasadniczą częścią pracy, przynajmniej tak wynika z tytułu pracy, a sprawiają wrażenie, że Autor wziął jedyne wyniki empiryczne jakie miał i porównał je z wynikami modelowania. Mało jest również informacji dotyczących warunków brzegowych, jak choćby brakuje temperatury ścianek komory spalania. Nic nie wiadomo na temat budowy strugi paliwa, kątów wtrysku, trwania wtrysku itd. Widać, że Autor skupił się głównie na procesie modelowania, a nie na samych wynikach.

Przedstawione w pracy porównanie przebiegów ciśnienia nie wskazuje na dużą dokładność symulacji. Autor dodatkowo utrudnił ocenę czytelnikowi, ponieważ dla danych empirycznych przedstawił przebieg uśredniony synchronicznie oraz dwa o największej i najmniejszej wartości ciśnienia maksymalnego, a dla danych modelowych przebiegi dla kolejnych 5 cykli pracy. Niestety prezentacji stopnia wypalenia dawki paliwa na podstawie danych empirycznych już zabrakło.

Podsumowując, przyjęty sposób realizacji pracy oraz metody w zakresie modelowania matematycznego należy uznać za prawidłowe. Gorzej prezentuje się natomiast zakres badań, w szczególności silnikowych.

4. Ocena treści i edycji rozprawy

Praca została podzielona na 5 rozdziałów w sposób klasyczny, czyli: wprowadzenie, przegląd literatury, prezentacja modelu spalania opartego na metodzie gradientu, wyniki i wnioski. Jedyna rzecz jakiej brakuje to przedstawienie w jednym rozdziale metodyki badań. Zamiast tego

w różnych miejscach pracy czytelnik dowiaduje się jakie były metody symulacji czy też warunki badań.

Rozdział pierwszy pt.: „*Wprowadzenie*” przedstawia uzasadnienie podjęcia tematu. Metoda LES jest przedstawiona jako nowa i rozwojowa, choć w tej deklaracji Autor odwołuje się do pracy sprzed 20 lat. Następnie przedstawiony jest cel pracy, czyli implementacja i udoskonalenie modelu spalania zaproponowanego przez Mołkova. Dalej w celu pracy jest mowa o zastosowaniu tego modelu spalania do symulacji spalania izooktanu i n-heptanu w silnikach o zapłonie iskrowym i samoczynnym.

W podrozdziałach *Other work* oraz *Present contribution* Autor rozgranicza między tym co zostało zrobione do tej pory, a tym co jest wkładem Autora. Czyli metoda proponowana przez Mołkova była dotychczas stosowana do badań spalania mieszanek wodorowo-powietrznych za pomocą obliczeń CFD metodą symulacji dużych wirów turbulentnych (LES) wraz z różnymi modelami podsiatkowymi. Wkład własny Autora polega na implementacji modelu spalania w programie AVL FIRE, uzupełnieniu modelu spalania o model spalania mieszanek uwarstwionych, uzupełnienie modelu o zapłon iskrowy oraz samoczynny. Kolejne elementy wkładu własnego Autora to walidacja modelu poprzez porównanie w wynikami empirycznymi uzyskanymi na palniku, silniku o zapłonie iskrowym oraz walidacja procesu samozapłonu.

Rozdział drugi to przegląd literatury. Na początku Autor uzasadnia rolę modelowania CFD w rozwoju silników spalinowych. Przedstawione są też przykłady zjawisk do których można uzyskać „wgląd” za pomocą modelowania.

Następnie Autor prezentuje przegląd różnych modeli przepływów turbulentnych. Porównane są ze sobą trzy zasadnicze metody obliczeniowe, tzn. zastosowanie dekompozycji Reynoldsa do przybliżonego rozwiązywania równań Naviera-Stokesa, bezpośrednia symulacja numeryczna, czyli rozwiązywanie równań Naviera-Stokesa bez jakichkolwiek uproszczeń, oraz metoda symulacji dużych wirów turbulentnych (LES). Ta ostatnia, jest uznana przez Autora na najlepszą, ponieważ dostarcza dokładnych wyników, a jednocześnie da się ją zastosować przy dzisiejszych mocach obliczeniowych. Została ona oczywiście wykorzystana przez Autora jako narzędzie badawcze. Przedstawiając kierunki rozwoju metod obliczeniowych w zastosowaniach do silników i nie tylko Autor odwołuje się do dawno opublikowanych prac. Warto byłoby zweryfikować, czy coś się nie zmieniło. Następnie dokładnie omówione są modele podsiatkowe, modele spalania itd. W podsumowaniu przeglądu literatury Autor stwierdza, że modele LES są już dobrze zweryfikowane, rodzaj modelu podsiatkowego ma niewielki wpływ na wyniki, udowodniono przydatność metody LES do modelowania zmienności cyklicznej. Dobrze byłoby gdyby w pracy wyraźnie zaznaczono co nowego w tym zakresie wniosły przeprowadzone badania.

W **rozdziale trzecim** Autor przedstawia model spalania GCM (oparty na metodzie gradientu), którego zastosowanie jest głównym osiągnięciem pracy. Posługując się różnymi pracami poprzedników Autor ustala wartości poszczególnych parametrów modelu oraz porównuje wyniki prędkości spalania dla różnych paliw i składów mieszanek paliwowo-powietrznych. Następnie opisany jest model opóźnienia samozapłonu. Model ten jest zweryfikowany dla n-heptanu na podstawie danych empirycznych uzyskanych z wykorzystaniem maszyny pojedynczego sprężu.

W **rozdziale czwartym** Autor przedstawia wyniki badań. Rozdział ten składa się z dwóch zasadniczych części: opisu badań turbulentnego spalania metanu z wykorzystaniem palnika oraz opisu spalania benzyny w silniku z bezpośrednim wtryskiem benzyny. W obu przypadkach Autor wykorzystał wyniki empiryczne innych badaczy.

Oba etapy badań opisane są w podobny sposób, przedstawione są stanowiska badawcze, warunki badań, budowa siatki i wyniki. W przypadku badań na palniku do porównania wyników empirycznych z wynikami symulacji przyjęto kilka wskaźników takich jak stopień wypalenia paliwa, znormalizowana prędkość, czy też turbulentna energia kinetyczna. Badania przeprowadzono dla trzech prędkości przepływu. Prezentacja badań silnikowych obejmuje pola prędkości przepływu, rozkłady współczynnika nadmiaru powietrza, obrazy położenia frontu płomienia. Wyniki te prezentowane są dla różnych cykli pracy silnika, aby zwrócić uwagę na niepowtarzalność cykliczną. Weryfikacja, czyli porównanie ciśnień w cylindrze znajduje się dopiero na końcu, a należałoby od tego zacząć, aby udowodnić że model dostatecznie dokładnie odtwarza rzeczywistość.

W rozdziale czwartym dobrze by było wprowadzić podział na podrozdziały przedstawiające stanowiska badawcze, metodyki badań empirycznych i modelowych, a na końcu wyniki. Wtedy rozdział stałby się bardziej przejrzysty. Rozdział 4.2 rozpoczyna się od tekstu mówiącego, że „model will be extended”, czyli rozumiem, że rozszerzona będzie jego funkcjonalność. Dalej w tekście nie ma o tym mowy.

W treści rozdziału czwartego jest opis mówiący o modelowaniu wtrysku, ale nie można znaleźć informacji o parametrach wtrysku paliwa. Z rys. 45 wynika, że w trysk paliwa następował na początku suwu dolotu.

Opis zmienności cyklicznej przepływów, rozkładu paliwa i spalania został zawarty w zaledwie kilku zdaniach, a przecież część tezy odnosi się do zmienności cyklicznej. Brakuje analizy przyczynowo-skutkowej zmienności cyklicznej.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie pracy. Autor przypomina w nim co zrobił w ramach pracy oraz podaje najważniejsze wyniki. Autor zwraca też uwagę na niedoskonałości modelu i trudności związane z interpretacją wyników, to w pewnym stopniu tłumaczy niekiedy ubogą

dyskusję wyników.

Podsumowując ocenę treści rozprawy należy stwierdzić, że układ jest poprawny. Autor dobrze posługuje się językiem angielskim, więc pracę dobrze się czyta. Wypowiedzi są logicznie skonstruowane i nie ma problemu ze zrozumieniem. Dobór słów oraz nomenklatura techniczna są prawidłowe. Autor nie uniknął błędów gramatycznych, lecz ich liczba jest mała. Niektóre zdania wydają się przeładowane wyrazami i można by było je skrócić bez uszczerbku dla przekazywanych treści.

Materiał graficzny jest czytelny, choć niestety Autor nie zastosował jednolitego stylu wykresów, dotyczy to ramek, linii siatki itd. Nie zawsze efekty skanowania/kopiowania są najlepsze. Przykładem może być rys. 42, w którym Autor przedstawia własne wyniki, ale został wklejony z wcześniejszej pracy autora.

Praca zawiera dużo wzorów matematycznych, których edycja oraz strona formalna są poprawne. W wykazie oznaczeń brakuje wielu symboli i skrótowców, np. jednego z ważniejszych w tej pracy – GCM.

5. Ocena dorobku naukowego Doktoranta

W pracy Doktorant umieścił spis swoich publikacji, podzielony na publikacje w czasopismach oraz publikacje pokonferencyjne. Lista obejmuje 21 pozycji. Doszukałem się jednej pracy tzw. wysoko punktowanej w czasopiśmie Numerical Heat Transfer. Spośród ważniejszych osiągnięć można również wymienić SAE Technical Paper. Wszystkie prace Doktoranta są spójne tematycznie i dotyczą modelowania matematycznego procesów silnikowych lub badań empirycznych. Wszystkie czasopisma, w których publikował Doktorant (znajdujące się na liście czasopism punktowanych) są przypisane do dyscypliny inżynieria mechaniczna.

6. Ocena końcowa

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim było zastosowanie modelu spalania opartego na metodzie gradientu do symulacji spalania turbulentnego w silniku metodami LES. Poziom rozprawy pozwala stwierdzić, że Doktorant posiada dużą wiedzę w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że Doktorant jest wysokiej klasy specjalistą w dziedzinie modelowania matematycznego zagadnień mechaniki płynów i spalania, szczególnie w zastosowaniach do silników spalinowych. Potwierdza to nie tylko przedstawiona rozprawa doktorska, ale również dorobek publikacyjny.

W związku z powyższym rozprawa mgr. inż. Piotra Jaworskiego pt. „*Numerical simulation of internal combustion engine phenomena with LES combustion model*” spełnia warunki określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2017 r. poz. 1789) w zw. z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 r. poz. 1669 z późn. zm). Rozprawa stanowi podstawę do dopuszczenia mgr. inż. Piotra Jaworskiego do publicznej obrony oraz nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Meade Hanin

