

Prof. dr hab. inż. Stanisław Szwaja
Katedra Maszyn Ciepłych,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki,
Politechnika Częstochowska
Tel. +48 34 32050524, +48 885-840-483
e-mail: stanislaw.szwaja@pcz.pl
web: <http://imc.pcz.pl/en/users/sszwaja>

08/05/2023

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Bachanka p.t. „*Experimental and numerical study on direct-injection sprays formed under flash-boiling conditions*”

1. Podstawa recenzji

Podstawą do opracowania recenzji było pismo RND-IŚGiE/22/2023 z dnia 9-03-2023r. sygnowane przez prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego - Przewodniczącego Rady Naukowej dyscypliny: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Politechnice Warszawskiej, w którym zwraca się z prośbą o wykonanie recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Bachanka pt. *Experimental and numerical study on direct-injection sprays formed under flash-boiling conditions*.

2. Uwagi ogólne

Praca została napisana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Andrzeja Teodorczyka oraz dra inż. Łukasza Kapusty, sprawujących funkcje odpowiednio promotora i promotora pomocniczego w postępowaniu doktorskim. Praca dotyczy zagadnień istotnych z punktu widzenia badań podstawowych nad przebiegiem wtrysku oraz rozpadu strugi cieczy i jej odparowania w warunkach podwyższonej temperatury mogącej prowadzić do wystąpienia zjawiska gwałtownego wrzenia wtryskiwanej cieczy i szybszego odparowywania powstających kropeł.

Praca została napisana w oparciu o przeprowadzone przez doktoranta badania eksperymentalne oraz modelowanie numeryczne zjawisk wypływu cieczy z dysz wtryskiwacza.

Pracę napisano na łącznie 112 stronach, na których występuje streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz rysunków i tabel, szczegółowy wykaz oznaczeń, 6 rozdziałów oraz wykaz literatury. Rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Bachanka

w swojej strukturze zawiera wszystkie niezbędne elementy począwszy od wstępu poprzez przegląd literatury, sformułowanie tezy, opis stanowiska badawczego oraz opis modelu analitycznego, metodykę przeprowadzonych badań oraz wyniki i wnioski. Dzięki tak przygotowanej strukturze pracy można było pozytywnie ocenić proces formułowania celu pracy, jej tezy oraz wnioskowania.

Układ pracy należy uznać za sporządzony poprawnie.

3. Ocena merytoryczna pracy

Ocenie merytorycznej poddano autorski wkład Doktoranta do pracy przedstawionej do oceny.

Doktorant zajął się problematyką zbadania przebiegu wtrysku z uwzględnieniem zjawiska podgrzewania badanej cieczy we wtryskiwaczu do temperatury powyżej punktu wrzenia. Uzasadnienie celowości tych badań zostało przedstawione w rozdziale pierwszym. Kandydat intuicyjnie zauważył, że paliwo wstępnie podgrzane wewnątrz wtryskiwacza do temperatury powyżej punktu wrzenia może znacznie szybciej odparować i tworzyć w stanie gazowym mieszaninę palną z powietrzem, co powinno wpływać na szybkość i zupełność spalania tej mieszaniny prowadząc do podwyższenia sprawności termodynamicznej obiegu cieplnego oraz obniżenia emisji tlenku węgla i niespalonych węglowodorów. To spostrzeżenie jest szczególnie istotne dla wtrysku bezpośredniego, dlatego Doktorant prawidłowo wybrał rodzaj wtryskiwacza i stanowisko badawcze.

W drugim rozdziale mgr inż. Jakub Bachanek przeprowadził wnikliwą analizę dotychczasowego stanu wiedzy koncentrując się głównie na przedyskutowaniu wyników badań tych zjawisk, które były przedmiotem jego pracy badawczej. Omówił teoretyczne podstawy oraz aktualny stan badań zarówno eksperymentalnych, jak i numerycznych dotyczących wtrysku paliwa. Doktorant omówił mechanizmy pierwotnego i wtórnego rozpadu strugi paliwa wypływającego z dyszy wtryskiwacza. Przedstawił liczby kryterialne, służące do analizy występowania tych zjawisk a następnie poddał pod dyskusję wyniki badań nad wtryskiem i rozpadem strugi paliwa podgrzewanego do stanu wrzenia. W rozdziale tym Doktorant wyselekcjonował także wielkości, które uznał za kluczowe do opisu strugi rozpylanego paliwa m.in. kąt rozpylania, zasięg i rozmiar oraz rozkład kropel w chmurze rozpylanego paliwa. Przegląd literatury został podsumowany wnioskiem o relatywnie niewielkiej liczbie prac dotyczących modelowania CFD w zakresie przebiegu wtrysku i rozpadu strugi paliwa.

Chronologicznie, w kolejnym, trzecim rozdziale Doktorant przedstawił główne cele i tezę pracy. Za podstawowy cel swojej pracy Kandydat uznał udoskonalenie numerycznego modelu do symulacji przebiegu gwałtownego wrzenia i jego wpływu na przebieg rozpadu strugi paliwa.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił stanowisko badawcze, metodykę i plan badań oraz zamieścił wyniki z przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Na badania eksperymentalne składała się głównie analiza obrazów zarejestrowanych szybko kamerą cyfrową. Doktorant wykonał eksperyment badawczy dla zmiennych, którymi były: ciśnienie wtrysku, ciśnienie w komorze spalania oraz temperatura wtryskiwanej cieczy.

Wyniki tej analizy miały w następnej kolejności posłużyć do kalibracji opracowywanego modelu analitycznego rozwiązywanego metodami numerycznymi CFD.

W rozdziale piątym Doktorant opisał model analityczny wtrysku i rozpylania z udziałem podmodelu gwałtownego wrzenia wtryskiwanej cieczy. Poza standardowo znanymi równaniami ciągłości, zachowania energii oraz pędu w postaci równań Naviera-Stokesa Kandydat uwzględnił w modelowaniu podmodele: dyssypacji turbulencji, odparowania, zjawisk tarcia, model DDM wg teorii Eulera-Lagrange'a do opisu ruchu rozpylanych cząstek oraz podmodel Kelvina-Helmholtza wzbogacony o mechanizm niestabilności Rayleigha-Taylora do opisu rozpadu strugi. Ponadto, do modelu włączono także mechanizm kolizji kropeł wg O'Rourke ze stochastycznym rozkładem Poissona. Model należy uznać za opracowany prawidłowo z należytym, bardzo starannym podejściem teoretyczno-empirycznym. Następnie Doktorant przeprowadził szereg symulacji numerycznych i dokonał porównania uzyskanych wyników z wynikami otrzymanymi z eksperymentu.

W rozdziale szóstym zamieszczono podsumowanie całości prac badawczych. Doktorant stwierdził, że swoimi badaniami przyczynił się do rozwoju metod obliczeniowych zjawiska gwałtownego wrzenia w dyszy wtryskiwacza. Opracował model, który w oparciu o relatywnie łatwo mierzalne dane wejściowe, może służyć do modelowania wpływu paliwa z wtryskiwacza wysokociśnieniowego.

4. Uwagi krytyczne i sugestie

Pomimo ogólnie pozytywnego odbioru pracy zauważono szereg niedociągnięć, nieprecyzyjnych sformułowań i niepełnej informacji o charakterze merytorycznym jak następuje:

- a) rozdział piąty zawiera opis modelu do symulacji wtrysku i rozpylania. Zauważa się brak informacji odnośnie udziału Doktoranta w opracowaniu tego modelu i wyszczególnieniu, które elementy były jego własnym, samodzielnym opracowaniem.
- b) Teza pracy jest bardzo trywialna i oczywista. Można pokusić się o stwierdzenie, że teza ta nie wymaga tak szeroko zakrojonych badań teoretycznych i eksperymentalnych.
- c) Brak informacji, że przedstawiona teza pracy została potwierdzona. Brak jakiegokolwiek odniesienia w tekście do postawionej tezy pracy.
- d) Badania były realizowane przy wykorzystaniu wtryskiwacza do bezpośredniego wtrysku benzyny. Dlaczego do badań użyto n-heptan? Czy były jakiegokolwiek przeciwwskazania do użycia np. izooktanu, który właściwościami fizyko-chemicznymi i palnymi jest bardziej zbliżony do rzeczywistej benzyny aniżeli n-heptan?
- e) Dlaczego badano wtrysk przy podciśnieniu w komorze, a szczególnie dlaczego prowadzono badania dla ciśnienia w komorze na poziomie 0,01 i 0,03 MPa? W tym przypadku występuje niekonsekwencja do sentencji w rozdziale szóstym o wykorzystaniu osiągnięcia Doktoranta w dziedzinie motoryzacji, przez co

- należy domyślać się, że opracowany model zostanie wykorzystany do badania wtrysku w cylindrze silnika samochodowego.
- f) W pracy nie dostrzeżono informacji odnośnie szczegółów stanowiska badawczego oraz przyjętych uproszczeń, z których można by wywnioskować o wierności odwzorowania warunków cieplnych i przepływowych występujących w komorze do tych występujących w rzeczywistym silniku. Domyślnie uznano, że badania eksperymentalne i analizę teoretyczną wtrysku realizowano na stanowisku gdzie wtrysk następował do przestrzeni w polu bezwirowym. Natomiast w cylindrze silnika rzeczywistego dochodzi dodatkowe zawirowanie wpływające głównie na szybkość odparowania paliwa. Na ile takie uproszczenie mogło mieć wpływ na wyniki i wnioski z nich wynikające?
 - g) Doktorant stwierdził, że *spray penetration* (tj. zasięg strugi/chmury) zależy od ciśnienia w komorze i od temperatury paliwa. Zauważa się, że występują różne zależności pomiędzy zasięgiem i temperaturą cieczy (rys. 4.10, 4.11, 4.12). Przykładowo dla ciśnienia w komorze równego 0,1 MPa zależność pomiędzy zasięgiem i temperaturą cieczy jest wyraźnie ujemna tzn. zasięg spada ze wzrostem temperatury paliwa. Natomiast dla ciśnienia w komorze na poziomie 0,01 MPa zasięg rośnie ze wzrostem temperatury paliwa. Można wywnioskować, że zmiana trendu pomiędzy tymi wielkościami zależy od ciśnienia w komorze. Czy zostało to potwierdzone w symulacji komputerowej?
 - h) W modelu wykorzystano podmodel odparowania. W pracy nie dostrzeżono wyników dotyczących przebiegu odparowywania poszczególnych kropeł jak również globalnie szybkości odparowywania strugi paliwa. Takie wyniki dawałyby przesłanki odnośnie celowości stosowania podgrzewu paliwa do punktu wrzenia w instalacji wtryskowej rzeczywistego silnika.
 - i) W pracy dostrzeżono niespójność w definicjach liczby Webera (zależności 2.3, 5.36, 5.37) oznaczonych jako (cyt.) „*We_g, We_l are respectively gas and liquid Weber numbers*”. W tekście pracy brak interpretacji fizycznej tzw. „gazowej” i „ciekłej” liczby Webera.

Uwagi edytorskie i inne:

- j) niezrozumiałym sformułowaniem jest „redukcja rozmiaru”. Zazwyczaj wyraz ten dotyczy ilości substancji a nie wymiaru. W podpisie rys.2.9 w odniesieniu do SMD zamiast *reduction* użyty jest wyraz *decrease*, który precyzyjniej określa zmianę rozmiaru kropli a nie ich liczby.
- k) Rysunki 4.7, 4.8 i kolejne przedstawiające obrazy chmury wtryskiwanej cieczy są pokolorowane, jednakże kolory nie odzwierciedlają rzeczywistych barw chmury wtryskiwanej cieczy. Brak informacji, co one oznaczają.
- l) Znaczniki na wykresach powinny być zróżnicowane pod względem kształtu a nie koloru, wówczas łatwiej można rozróżnić poszczególne punkty od siebie.
- m) W wielu przypadkach brakuje opisów zmiennych pod wzorami. Stąd czytanie wzorów jest uciążliwe, bo każdorazowo trzeba wracać do wykazu znajdującego się na początku pracy.
- n) W równaniu 5.14 indeks „i” prawdopodobnie jest zbędny i może wprowadzać w błąd. Podobna uwaga do równania 5.15.

- o) Na stronie 5 jest „*The Reynolds number Re describes the turbulence of the flow.*”
To nieprawda.

W streszczeniu w języku polskim:

- p) jest „gwałtownego”,
- q) w sformułowaniu „zarówno, jak i ...” na końcu nie stawia się przecinka,
- r) nieznanemu recenzentowi pojęcie „stan przegrzany”,
- s) czasownik „pozwolić” jest niestosowny, zaleca się używać czasownika „umożliwić”,
- t) jest niefortunne sformułowanie „pozwalały określać”,
- u) jest „zasięgi strugi” chyba chodzi o jeden zasięg,
- v) strona v, 4 linia od dołu, wyraz „ono” niepotrzebny,
- w) jest niefortunne sformułowanie „wyniki pokazały”.

W języku nagielskim:

- x) niefortunne sformułowanie m.in. do rysunku 2.3. „*Secondary breakup regimes as a Weber number function*”. Czy wyraz *function* ma tu sens matematyczny?

Szereg niedociągnięć, w tym te wymienione od punktu j) do punktu x) uznano, że powstały w wyniku niezamierzonego działania a częstokroć zbyt ambitnego podejścia do tematu w miejscu, gdzie nie było to szczególnie wymagane. Doktorant nie musi ustosunkowywać się do tych uwag, chyba, że jest odmiennego zdania. Natomiast, rekomenduje się, aby Doktorant ustosunkował się do uwag merytorycznych od a) do i).

Mocne strony pracy

Do mocnych stron pracy należy zaliczyć:

- a) rozwiązanie numeryczne modelu i analiza doboru optymalnej siatki obliczeniowej,
- b) implementacja modelu do środowiska CFD AVL FIRE™,
- c) umiejętność analizy i interpretacji obrazów,
- d) umiejętność interpretacji wyników i wyjaśnienia niezgodności modelowania z eksperymentem. Szczególnie przekonujące było wyjaśnienie rozbieżności w strukturze rozpylonej cieczy w przypadku dużego przegrzania.
- e) Opracowanie zależności wpływu wielkości wejściowych na parametry chmury paliwa,
- f) staranność w wykonaniu wykresów i przetwarzaniu obrazów,
- g) bardzo dobrze opracowany przegląd stanu wiedzy.

5. Wniosek o wyróżnienie pracy

Na podstawie dostarczonego materiału oraz dostępnego w bazie Scopus i Web of Science dorobku publikacyjnego mgr inż. Jakuba Bachanka wnoszę o wyróżnienie jego pracy, aczkolwiek ostateczną decyzję w sprawie wyróżnienia chciałbym odłożyć do

chwili udzielenia odpowiedzi przez Doktoranta na pierwszą uwagę oznaczoną jako a) i dotyczącą jego udziału w opracowaniu modelu opisanego w rozdziale 5.

Uzasadnienie

Praca doktorska została napisana z bardzo dużą starannością pod względem merytorycznym i stanowi nowatorski wkład w rozwój teorii wtrysku ciśnieniowego, która to teoria obejmuje szereg zjawisk i zagadnień trudnych do zbadania zarówno od strony eksperymentalnej, jak również od strony analizowania za pomocą metod numerycznych w tym szczególnie metodami CFD.

Elementem nowości naukowej stanowiącej oryginalny i nowatorski wkład Doktoranta jest opracowanie podmodelu opisującego podgrzew i zjawisko gwałtownego wrzenia cieczy oraz rozwiązanie całościowego modelu wtrysku i tworzenia chmury cieczy i przeprowadzenie analizy w zależności od wybranych parametrów wejściowych, którymi były: ciśnienie wtrysku, temperatura cieczy oraz stopień przegrzewu zależny od ciśnienia w komorze. Doktorant potrafił wiarygodnie zinterpretować otrzymane wyniki, w wyniku czego opracowany model mógł być zaimplementowany w komercyjnym programie do analizy przebiegu wtrysku.

6. Wniosek końcowy

Wskazane w recenzji krytyczne uwagi szczegółowe nie zmieniają mojej oceny, która jest oceną pozytywną. Recenzowana praca doktorska mgra inż. Jakuba Bachanka jest samodzielnym, oryginalnym dziełem w zakresie opracowania modelu wtrysku paliwa i znacząco wpływa na rozwój metod CFD do analizy tego typu zjawisk.

Doktorant wykazał się wystarczającymi umiejętnościami w zakresie sformułowania problemu, potrafił prawidłowo dobrać metodykę i stanowisko badawcze oraz przeprowadzić analizę numeryczną badanych przez siebie zjawisk. Moim zdaniem Doktorant posiada umiejętności do samodzielnego prowadzenia eksperymentu naukowego jak również wnioskowania analitycznego i empirycznego.

Pomijając przedstawione uwagi i niedociągnięcia uważam, że praca doktorska pana mgra inż. Jakuba Bachanka stanowi jego autorski wkład w rozwój danej dyscypliny naukowej.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Bachanka spełnia warunki zawarte w artykule 187 w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” to znaczy jest monografią w formie pisemnej, prezentującą ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, przedstawiającą oryginalne rozwiązanie problemu naukowego ze znajomością warsztatu naukowego niezbędnego do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Niniejszym wnoszę o dopuszczenie tej rozprawy pod publiczną dyskusję i procedowanie kolejnych etapów w zakresie ubiegania się Doktoranta o stopień naukowy doktora.

Stanisław Szczęsny