22-05-2015
11⁰⁰

dr hab. inż. Adam KOZAKIEWICZ
adam.kozakiewicz@wat.edu.pl
Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Mechatroniki i Lotnictwa
00-908 Warszawa 49
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

Warszawa 2015-04-27

RECENZJA

rozprawy doktorskiej opracowanej przez mgr inż. Roberta KŁOSOWIAKA

nt.:

ANALIZA PRZEPŁYWU STRUGI OSIOWOSYMETRYCZNEJ WYPŁYWAJĄCEJ DO NIERUCHOMEGO OŚRODKA Z WYKORZYSTANIEM ANALIZ NUMERYCZNYCH ORAZ BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska powstała w Katedrze Techniki Cieplnej na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej pod kierownictwem dr hab. inż. Jarosława BARTOSZEWICZA Profesora PP.

Podstawą opracowania recenzji stanowi pismo Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej prof. dr hab. inż. Franciszka TOMASZEWSKIEGO, z dnia 25.03.2015, podyktowane uchwałą Rady Wydziału z dnia 24.03.2015 r.

2. Omówienie treści rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Roberta KŁOSOWIAKA pt. *„Analiza przepływu strugi osiowosymetrycznej wypływającej do nieruchomego ośrodka z wykorzystaniem analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych”*, została napisana na 126 stronach maszynopisu formatu A4 drukowanego jednostronnie. Składa się z ośmiu zasadniczych rozdziałów poprzedzonych: streszczeniem, wykazem ważniejszych symboli i indeksów, spisem treści, a w zakończeniu: bibliografią liczącą 70 pozycji literaturowych.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Roberta Kłosowiaka jest pracą teoretyczno-eksperymentalną poświęconą badaniu zjawisk procesów transportu pędu, ciepła oraz masy

w wyniku zmian odległości dyszy od dna komory nawrotnej, lub przez zmianę prędkości strugi na wlocie. Głębsze poznanie tych zjawisk ma istotne znaczenie między innymi w pracach nad komorami spalań, kotłów i pieców energetycznych, intensyfikacji zjawisk wymiany ciepła oraz w układach wtryskowych w silnikach spalinowych. Wstępem do badań i budowy modelu obliczeniowego, było wykonanie analizy aktualnego stanu wiedzy dotyczącego modelowania przepływu w komorze nawrotnej, ze szczególnym uwzględnieniem modelowania turbulencji przepływu (rozdział 3). W ramach przygotowania do budowania modelu numerycznego wykonano prace zmierzające do optymalizacji wielkości komórek poprzez wykorzystanie grupy parametrów takich jak skośność, proporcjonalność i prostopadłość (rozdział 4). Pierwszym etapem badań było porównanie wyników pomiarów eksperymentalnych z wynikami modelowania numerycznego. Zostały wykonane obliczenia rozkładu prędkości wylotowych i ciśnienia całkowitego dla modeli turbulencji *RSM*, $k-\omega$, SST, $k-\varepsilon$ oraz *NKE* w trzech przekrojach pomiarowych (rozdział 6). Wyniki obliczeń numerycznych zostały porównane z wynikami uzyskanymi podczas eksperymentu. Wyniki dla badanych prędkości 10 m/s, 30 m/s oraz 50 m/s, są zbieżne dla wytypowanych przekrojów pomiarowych, rozbieżności nie przekraczały 5%. Główna część badań eksperymentalnych (rozdział 7.1 i 7.2) została przeprowadzona ponownie z wykorzystaniem termometru stałotemperaturowego firmy TSI. Pomiary prowadzone były w komorze nawrotnej w przekrojach od 10D do 1D. Dokonano pomiaru profili prędkości oraz ich fluktuacji przy zmiennej prędkości przepływu. Umożliwiło to, otrzymanie składowej poosiowej i promieniowej prędkości i wyznaczenie ich fluktuacji. Maksymalne wartości fluktuacji uzyskano w strefach maksymalnych gradientów prędkości. Kolejny etap dotyczył uwzględniania zmian układu komory. Uzyskano to poprzez zmianę odległości dyszy wylotowej od dna komory nawrotnej włącznie, ze zmianami prędkości. Ten etap badań był realizowany przez Autora metodą numeryczną przy wykorzystaniu pakietu obliczeniowego ANSYS FLUENT ver. 16.0 (rozdział 7.3). Wykorzystanie pakietu obliczeniowego, umożliwiło rozszerzenie zakresu uzyskiwanych parametrów, oprócz rozkładu ciśnienia całkowitego, dodatkowo energii kinetycznej turbulencji, szybkości dyssypacji energii kinetycznej i lepkości turbulentnej. Podjęta w pracy analiza jakościowa (rozdział 7.3), dotyczy rozkładu prędkości osiowej oraz promieniowej, naprężeń stycznych, energii kinetycznej turbulentnej i szybkości dyssypacji z uwzględnieniem wypadkowej prędkości przepływu powietrza. Przeprowadzona analiza dostarcza informacji o gradiencie zmian poszczególnych parametrów, jak również o strefach konwersji energii kinetycznej w energię ciśnienia (punkty stagnacji) i na odwrót. Obszary transformacji energii dobrze zostały uwidocznione na mapach obrazujących wypadkową prędkość przepływu.

Przedstawiona została próba analizy porównawczej dotycząca dwóch prędkości (10m/s i 30m/s) strumienia oraz trzech względnych odległości mierzonych od wylotu rury wewnętrznej: 25%, 50% i 75% (rozdział 7.4). W przypadku prędkości 10m/s uzyskano istotną różnicę w jakościowym przebiegu profilu prędkości dla każdego położenia rury wewnętrznej. Przedstawione wyniki dotyczące większej prędkości strumienia (30 m/s), dały bardzo podobne przebiegi jakościowe parametrów. Interesującym zagadnieniem, które zostało przedstawione w końcowej część pracy, są wyniki modelowania przepływu nieustalonego w czasie (rozdział 7.6). Wyniki przedstawione w pracy dotyczą trzech wariantów prędkości strumienia 10m/s, 30m/s i 50m/s dla wybranego profilu 6D, który został uznany za reprezentatywny dla badanego zagadnienia. Symulacje zostały wykonane przy użyciu programu ANSYS-CFX. Obliczenia dały wyniki dyssypacji energii kinetycznej turbulencji i struktur wirowych w przepływie nieustalonym. Przedstawione wyniki umożliwiają określenia stref zwiększonej turbulencji wraz z maksymalnymi obszarami dyssypacji energii kinetycznej. Wyznaczono kroki czasowe przy których przy danej prędkości przepływ się

stabilizuje. Zauważalna jest relacja pomiędzy wzrostem prędkości strumienia, a czasem stabilizacji przepływu.

Całość pracy kończy posumowanie, w którym Autor odniósł się do własnych dokonań naukowych formułując wnioski.

Podjęty przez doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, jak i głębi prowadzonych rozważań. Z punktu widzenia określonych celów, przyjęta koncepcja badań, jest w pełni uzasadniona, a zastosowane narzędzia i metody badawcze są do niej adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał badawczy, jak i literaturowy został przez Autora rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta w rozpoznanie zjawisk występujących wewnątrz komory nawrotnej w zakresie zmian parametrów transportu pędu i masy.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawione w pracy wyniki badań uzyskane na drodze symulacji numerycznych za pomocą pakietu ANSYS FKUENT, oraz wyniki pomiarów podstawowych parametrów z zakresu transportu pędu i masy dotyczą oceny intensywności ich zmian w wyniku zmiany geometrii i prędkości strugi.

Badania zostały przeprowadzone w sposób właściwy, z należytą starannością. Problem naukowy został poprawnie wyodrębniony i zdefiniowany w oparciu o krytyczną analizę stanu zagadnienia. Praca jest napisana poprawną polszczyzną, w sposób zrozumiały i przy zachowaniu logicznego podziału na rozdziały, które wynikają z zadań cząstkowych niezbędnych do osiągnięcia założonego celu pracy. Taki układ pracy nie budzi zastrzeżeń. W wykazie literaturowym, znajdującym się w końcowej części pracy, wśród 70 pozycji, znajduje się 9 artykułów, których współautorem jest Autor. Należy uznać to za dobry wynik.

Praca nie jest jednak pozbawiona mankamentów wymagających komentarza ze strony Autora.

Uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne

- str. 7, rys. 1.2 – brak odwołania do źródła pochodzenia rysunku;
- str. 9, rys. 1.3 – brak odwołania do źródła pochodzenia rysunku;
- str. 17, przejście od równania (2.4) do równań (2.5) i (2.6), wymaga podania warunku, który nie został zdefiniowany;
- str. 17, równanie (2.7) powinno odnosić się do przekroju 1 i 2;
- str. 21, równanie (2.21), brak członu dotyczącego strumienia ciepła wytwarzanego wewnątrz obszaru oraz w zapisie brak rozróżnienia na wielkości wektorowe i skalarne;
- str. 21, w opisie równania (2.21) występuje wielkość τ_n (siła powierzchniowa), brak jej w równaniu;
- str. 21, w opisie równania (2.22) nie została zdefiniowana wielkość S;
- str. 24, równanie (2.33), w zapisie brak rozróżnienia na wielkości wektorowe i skalarne;
- str. 27, równanie (3.4), zapis funkcji $c'^{(x,t)}$ winien mieć postać $c'(x,t)$;
- str. 38, Autor w ostatnim akapicie napisał „Z pewnych względów zmiana modelu w trakcie obliczeń nie jest możliwa, a rozbijanie geometrii na kilka obszarów i wykonanie obliczeń modelami opisanymi powyżej znacznie komplikuje pracę".

Proszę o szerszy komentarz dotyczący drugiej części zdania, bo jest to sprawa dyskusyjna.

- str. 51, Autor z jednej strony pisze, że zbyt duże zagęszczenie siatki pogarsza jakość siatki, z drugiej strony zagęszczanie siatki („stworzenie tak wielu elementów") odwzorowuje niemal idealnie model 3D. Proszę o komentarz dotyczący tej sprzeczności.
- str. 54, w tabeli 5 skośność równa zero jest wartością idealną, a na rys.4.6 idealna piramida ma skośność równą jeden. Czy zapisy są poprawne?
- str. 64 i 65, wykresy (rys.6.1 ÷ rys.6.3) przedstawiające wyniki są zbyt małe z punktu potrzeby określenia, która wartość jest większa lub mniejsza. Przykładowo na rysunku 6.3 wyniki dla modelu RSM i k-ε mocno są zbieżne nawet w osi strugi. Należy żałować, że nie zostały podane względne wartości liczbowe dotyczące rozbieżności pomiędzy wynikami.
- str. 73/74, rys. 7.4 – brak analizy uzyskanych wyników i odwołań do nich;
- str. 75, rys. 7.6 – podpis pod rysunkiem określa, że wyniki dotyczą „ ... *prędkości i fluktuacji dla 10D*". W analizie wyników w tekście, przedstawionych na rysunku mowa jest o przekrojach 10D, 6D i 2D (np. str. 76 – „*Rysunek 7.6f przedstawia fluktuację składowej promieniowej prędkości dla 2D*"). Proszę o komentarz dotyczący tej sprzeczności. Ten sposób opisu bardzo utrudnia analizę tych wyników.
- str. 81, rys. 7.11 – opis wyników brzmi, „że uwidacznia się charakterystyczny obszar oderwania strumienia od krawędzi spływu", przy tej wielkości rysunków i jakości jest trudno zauważalny;
- str. 106, rys. 7.36 – brak analizy uzyskanych wyników i odwołań do nich;
- str. 109, ostatni akapit, w opisie wyników przedstawionych na rysunkach 7.41 oraz 7.42 odwołanie jest do rozkładu składowej poosiowej i promieniowej prędkości gdy wykresy przedstawiają jedynie składową poosiową;
- w rozdziale ósmym zatytułowanym „Podsumowanie i wnioski", znalazło się wiele wniosków dotyczących związanych z celem pracy. Proszę o wybranie jednego najważniejszego osiągnięcia swojej pracy i zdefiniowanie go szerzej.

Przedstawione powyżej uwagi, nie mają jednak istotnego wpływu na obciążenie wartości merytorycznej recenzowanej pracy, ani też nie umniejszają osiągnięć Autora.

4. Wniosek Końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Roberta Kłosowiaka pt. „*Analiza przepływu strugi osiowosymetrycznej wypływającej do nieruchomego ośrodka z wykorzystaniem analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych*" stanowi samodzielne rozwiązanie problemu naukowego, mającego możliwość utylitarnego zastosowania w technice. Założony cel pracy został osiągnięty, a postawiona teza naukowa dowiedziona przy zastosowaniu metod badawczych. Uzyskane wyniki symulacji numerycznej, potwierdzają wyniki uzyskane podczas eksperymentu. Wyniki symulacji numerycznych stanowią rozwiązanie trudnego problemu przepływowego z zakresu procesów transportu pędu, ciepła i masy w zakresie zmian odległości dyszy od dna komory nawrotnej lub przez zmianę prędkości strugi na wlocie.

Recenzowana rozprawa dowodzi, iż mgr inż. Robert Kłosowiak posiada umiejętność samodzielnego zaplanowania i przeprowadzenia eksperymentu, krytycznego spojrzenia na uzyskane wyniki obliczeń i pomiarów, poszerzył w znacznym stopniu swą wiedzę w zakresie zakresu procesów transportu pędu, ciepła i masy oraz metod rozwiązywania złożonych

zagadnień cieplno-przepływowych, a także opanował technikę pisania prac naukowych. Wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacji Maszyn jest wystarczający do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Kłosowiaka spełnia wymagania zawarte w art.13 ustawy z dnia 14 marca 2003 (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z póź. Zm. Dz. U. z 2005 r. nr164 poz. 1365 o stopniach naukowych i tytule naukowym w zakresie sztuki i mieści się w dyscyplinie Budowa i Eksploatacji Maszyn. Wnoszę więc do Rady Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.