

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Gałka

pt.: „Analiza zjawisk cieplnych i przepływowych przy wyładowaniu koronowym”

1. Charakterystyka ogólna rozprawy doktorskiej

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Gałka pt.: „Analiza zjawisk cieplnych i przepływowych przy wyładowaniu koronowym” składa się z 9 rozdziałów, bibliografii, jednego załącznika oraz spisu ilustracji. W sumie około 180 stron tekstu, rysunków i wzorów. Brak jest spisu symboli i skrótów użytych w pracy. Spis taki jest zawsze pomocny dla czytającego oraz świadczy o ujednoliceniu oznaczeń. W recenzowanej pracy symbole i oznaczenia wyjaśniane są w tekście na bieżąco, niestety zdarza się, że ten sam symbol użyty jest do zdefiniowania różnych wielkości.

We wstępie Doktorant przybliży zjawisko generowania strugi powietrza spowodowanego wyładowaniem koronowym, opisując zalety i wady generatorów elektrohydrodynamicznych (EHD) przedstawia motywację podjętych badań. Obserwowany wzrost zainteresowania tą technologią w ostatnich latach oraz szeroki wachlarz możliwych zastosowań aplikacyjnych, od chłodzenia elementów elektronicznych do napędów statków powietrznych potwierdza zasadność wyboru tematyki. W rozdziale 2 dokonano przeglądu literatury odnośnie numerycznego modelowania oraz badań eksperymentalnych przepływów generowanych elektrohydrodynamicznie. W ujęciu tabelarycznym dokonane zostało zestawienie prac poświęconych modelowaniu numerycznemu przepływów EHD opublikowanych w ostatnich latach, z uwzględnieniem modeli, metod i zastosowanych narzędzi numerycznych. Odnośnie przeglądu publikacji poświęconych badaniom eksperymentalnym tego zjawiska Doktorant zwraca uwagę na dostępne informacje na temat pomiaru pola prędkości oraz pola temperatur (wartości współczynnika przejmowania ciepła). W rozdziale 3 dysertacji przedstawiono cel pracy i planowany jej zakres. Cel pracy został zdefiniowany m.in. na podstawie niedostatków badań numerycznych i eksperymentalnych przepływów EHD określonych na podstawie obszernego przeglądu ponad 50 prac poświęconych tej tematyce. Do tych niedostatków, w opinii Doktoranta, należy przede wszystkim brak satysfakcjonującego porównania

wyników numerycznych z pomiarami pola prędkości, głównie w celu walidacji opracowanego modelu numerycznego. Doktorant do budowy modelu numerycznego wybrał środowisko MOOSE (Multiphysics Object Oriented Simulation Environment), które stwarza możliwości implementacji własnych równań transportu przy pomocy programowania zorientowanego obiektowego językiem C++ oraz rozwiązania ich metodą elementów skończonych. Ponadto Doktorant zaprojektował i zbudował własne stanowiska do badań eksperymentalnych, do pomiaru pola prędkości i temperatury. Zakres badań zawiera więc komplementarne podejście teoretyczne, numeryczne i eksperymentalne w badaniu zjawiska cieplnego i przepływowego generowanego zjawiskiem wyładowania koronowego.

W rozdziale 4 w sposób obszerny przedstawiono teorię zjawiska wyładowania koronowego oraz mechanizm generowania przepływu EHD wraz ze szczegółowym opisem matematycznym. Rozdział 5 zawiera opis badanego elektrodynamicznego generatora przepływu, w układzie igła-cylinder. Rozdział ten jest, proporcjonalnie do innych rozdziałów, krótki i mógłby być częścią rozdziału 3, gdzie przedstawiono cel i zakres pracy.

Rozdział 6 poświęcony jest opisowi użytej metody numerycznej do modelowania zjawisk elektrycznych i przepływowych podczas wyładowania koronowego, tj. narzędzia numerycznego (MOOSE Framework), modelu matematycznego i numerycznego. Przedstawiono zastosowane uproszczenia przyjętego jednoskładnikowego modelu matematycznego, warunki brzegowe oraz sposób dyskretyzacji domeny obliczeniowej. Od tych dwóch ostatnich elementów zależy wynik rozwiązania układu równań różniczkowych oraz jego dokładność. W dalszej kolejności przedstawiono wyniki symulacji w postaci rozkładów 2D prędkości i siły elektrohydrodynamicznej, oraz rozkładów 1D w wybranej odległości na wylocie z generatora.

W rozdziale 7 pracy doktorant przedstawił opis przeprowadzonych badań eksperymentalnych przepływu strugi powietrza, budowę stanowiska badawczego wraz z użytą aparaturą pomiarową, w tym przede wszystkim termooanemometru. Istotną częścią tego rozdziału jest kalibracja termooanemometru dla niskich prędkości, w tym celu przygotowano specjalne stanowisko pomiarowe. Wynikiem procedury kalibracyjnej jest charakterystyka termooanemometru gwarantująca niepewność pomiaru prędkości w granicach ok. 6%. Szkoda, że nie uwzględniono tej niepewności pomiarowej na wykresach w postaci słupków błędów. W rozdziale tym wyniki pomiarów prędkości porównano z obliczeniami otrzymanymi pakietem MOOSE.

Procedurę pomiaru wartości współczynnika przejmowania ciepła przy chłodzeniu strugą powietrza z generatora EHD opisano w rozdziale 8. Przedstawiono przygotowane w tym celu stanowisko pomiarowe oraz wyniki pomiarów współczynnika przejmowania ciepła dla różnych konfiguracji generatora EHD, napięcia zasilania i odległości pomiędzy elektrodą koronową a kolektorem.

W rozdziale 9 przedstawiono szczegółowe podsumowanie dysertacji wraz z propozycją dalszych badań.

Bibliografia zawiera 190 pozycji literaturowych co oznacza, że Doktorant dużo czytał na ten temat, jednak nie zauważyłem wśród tych pozycji prac Doktoranta. Nie wiadomo dlaczego Doktorant nie zacytował swoich dotychczas opublikowanych prac, m.in. pracy pt. „Velocity profiles of an electrohydrodynamic flow generator: CFD and experiment” autorstwa Doktoranta i jego promotora, opublikowanej w 2019 roku w Journal of Electrostatics, oraz pracy pt. “Numerical simulation of air flow in needle-to-cylinder electrohydrodynamic device” autorstwa Doktoranta i Pani Joanny Wilk opublikowanej w czasopiśmie Progress on Computational Fluid Dynamics w roku 2020. Oba czasopisma są w bazie WoS, w której Doktorant ma jeszcze 4 inne publikacje, odbiegające jednak nieco tematycznie od tego co jest przedstawione w dysertacji. We wspomnianych wyżej artykułach przedstawiono część prezentowanych w dysertacji badań numerycznych i eksperymentalnych dotyczących analizy pola przepływu, co oczywiście nie powinno wykluczać możliwości ich zacytowanie.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Przy recenzowaniu rozprawy doktorskiej ocenie poddano przede wszystkim użyty warsztat badawczy, otrzymane wyniki badań oraz wyciągnięte z nich wnioski. Mniejszą uwagę zwracano na stronę edycyjną pracy oraz styl językowy, choć w mojej opinii nie budzą one zastrzeżeń i są typowe dla tego typu prac.

Przedstawione w pracy komplementarne badania przepływu strugi powietrza generowanej wyładowaniem koronowym oraz wykorzystanie tej strugi do chłodzenia uderzeniowego niewątpliwie przyczynią się do lepszego zrozumienia budowy, działania i zastosowania generatorów EHD. Użyty warsztat badawczy składający się z modelu numerycznego zaimplementowanego w programie MOOSE oraz dwóch własnych stanowisk eksperymentalnych (w zasadzie trzech wliczając stanowisko do kalibracji sondy termooanemometrycznej) należy ocenić bardzo dobrze. Do osiągnięć doktoranta, bez wątpienia należy zliczyć:

- Opracowanie i rozwiązanie jednoskładnikowego modelu numerycznego ustalonego przepływu elektrohydrodynamicznego wywołanego wyładowaniem koronowym, składającego się z układu cząstkowych równań różniczkowych zdefiniowanych dla układu dwuwymiarowego osiowoosymetrycznego.
- Wykonanie symulacji numerycznych dla 16 różnych konfiguracji geometrii i warunków brzegowych (napięcia zasilania) generatora EHD.

- Opracowanie koncepcji stanowiska do badań eksperymentalnych generatora przepływu EHD, jego budowa oraz wykonanie pomiarów pola prędkości i temperatur.
- Porównanie zmierzonego pola prędkości z wynikami symulacji numerycznych.
- Wyznaczenie efektywności chłodzenia uderzeniowego strugą powietrza generowaną wyładowaniem koronowym.

Pewien niedosyt można odczuć z przedstawionych badań numerycznych, opisu narzędzia numerycznego, modelu i przedstawionych wyników. Brak jest wyników modelowania przepływu przy pomocy użytego środowiska MOOSE dla jakiegoś benchmarkowego testu CFD dla przepływu nieściśliwego powietrza, który potwierdziłby słuszność wyboru tego narzędzia numerycznego i prawidłowość jego użycia.

Realizując część eksperymentalną badań Doktorant wykazał się dużą pomysłowością i kreatywnością, zaproponował wiele ciekawych i oryginalnych rozwiązań, zarówno przy przygotowywaniu stanowisk badawczych jak i realizacji samych pomiarów.

Biorąc pod uwagę tematykę podjętą w pracy, użytą metodologię badawczą, komplementarność badań, otrzymane wyniki oraz przedstawione wnioski, pracę doktorską Pana mgr inż. Rafała Gałka należy ocenić jednoznacznie pozytywnie.

3. Uwagi szczegółowe

Recenzowana rozprawa doktorska ma dość logiczny układ, choć zwykle prowadząc zarówno prace eksperymentalne i numeryczne dla analizowanego zagadnienia, te pierwsze opisuje się wcześniej. Tutaj jednak najpierw przedstawiono wyniki badań numerycznych, a potem wyniki badań eksperymentalnych. Pracę czyta się dobrze, choć brak spisu oznaczeń dla tak obszernej pracy i czasami zbyt długie zdania nieco utrudniają ten proces.

Niemniej jednak, podczas analizowania przedstawionych rezultatów badań nasuwa się kilka uwag i komentarzy, takich jak:

- Czy przeprowadzono wcześniej obliczenia pola przepływu pakietem MOOSE dla innego przykładu testowego, i czy porównano te wyniki z eksperymentem lub wynikami otrzymanymi innym kodem CFD?
- Wyjaśnienia wymaga definicja warunku brzegowego dla tzw. "brzegu otwartego", co znaczy warunek zerowego ciśnienia? Czy warunki brzegowe w programie MOOSE dla równań różniczkowych należy samemu implementować, czy są już jakieś dostępne do wyboru.
- Na rys.6.1 dobrze byłoby zaznaczyć osie współrzędnych, np. cylindrycznych.
- Rozkłady parametrów otrzymanych z symulacji pakietem MOOSE (rys.6.4, 6.5, 6.7, 6.8, 6.9 i 6.10) powinny być prezentowane uwzględniając lustrzane odbicie domeny obliczeniowej

względem osi z (kierunku przepływu strugi). Wówczas lepiej widoczne byłoby całe pole, łącznie z igłą. Innym rozwiązaniem, dla lepszego zrozumienia rysunku, byłoby wyraźne zaznaczenie elektrody koronowej i kolektora.

- Na rys.6.8 nie do końca jest jasne o jaką prędkość chodzi, o moduł (wartości) prędkości czy składową u_z ? Pomocne byłoby również przedstawienie konturów w kolorze czarnym, dla wybranej rozdzielczości.
- Maksymalna wartość prędkości strugi na rysunku 6.8 to, jak wynika z legendy, 37m/s, podczas gdy na rysunkach 6.11-6.14 w odległości 1mm od końca urządzenie prędkość wynosi niecałe 8m/s. Skąd ta rozbieżność i gdzie kończy się urządzenie?
- Przedstawiona w pracy miara efektywności chłodzenia może odnosić się do strugi powietrza dowolnie wygenerowanej i nie zawiera w sobie oceny samego generatora EHD, uwzględnia tylko jego moc. Można chyba to zrobić mając wartość prędkości strugi, jej strumień objętościowy, oraz moc elektryczną generatora. Taką próbę oceny sprawności generatora EHD Doktorant zaproponował w jednej ze swoich wcześniejszych publikacji.
- Czy przy poszukiwaniu korelacji dla liczb Nusselta nie dało się wyznaczyć współczynnika determinacji dla każdego z przedstawionych przypadków?

4.Wnioski końcowe

Pan mgr inż. Rafał Gałek w swojej rozprawie doktorskiej pt.: „Analiza zjawisk cieplnych i przepływowych przy wyładowaniu koronowym” przedstawił komplementarną, numeryczną i eksperymentalną analizę generatora przepływu EHD dla konfiguracji igła-cylinder. Tematyka pracy jest aktualna i ważna, opracowany warsztat badawczy oraz wyniki otrzymane przez doktoranta stanowią ważny element w poszukiwaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych i zastosowań tego typu urządzeń.

Niniejszym z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim określone Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



