

Dr hab. Piotr M. Korczyk
Zakład Biosystemów i Miękkiej Materii
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa

Warszawa 3.09.2019

**Recenzja pracy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Marca
pt. „Wpływ geometrii dysz stosowanych w strumieniowych układach chłodzenia
na wymianę ciepła”**

**wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Anny Kucaby-Piętał
oraz dra inż. Roberta Smusza (promotora pomocniczego)
na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechniki Rzeszowskiej**

Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona przez mgra inż. Krzysztofa Marca praca doktorska dotyczy procesu chłodzenia płaskiej płyty przy użyciu strumieniowych układów chłodzenia, składających się z równomiernie rozmieszczonych dysz skierowanych prostopadle do powierzchni chłodzonej. Układy takie znajdują zastosowanie w wielu urządzeniach technicznych między innymi w: elektronice do chłodzenia mikroprocesorów, w lotnictwie do chłodzenia łopatek turbin, a także obudów turbin, w ogniwach fotowoltaicznych. Odpowiednie zastosowanie systemów chłodzenia jest konieczne do zapewnienia prawidłowego funkcjonowania urządzeń generujących duże ilości ciepła o bardzo wysokich parametrach pracy. Optymalne chłodzenia w takich układach związane jest również z redukcją spalin, co jest obecnie szczególnie ważnym aspektem. Innym istotnym zagadnieniem związanym z eksploatacją urządzeń jest zapewnienie takiego chłodzenia, które z jednej strony byłoby efektywne, a z drugiej zapewniałoby minimalizację naprężeń, powodowanych nierównomiernym chłodzeniem, skracających czas eksploatacji urządzeń.

Zagadnienie optymalizacji strumieniowych układów chłodzenia wymaga dogłębnego poznania złożonych zjawisk przepływowych zachodzących w takich układach. Poznanie tych zjawisk pozwoliłoby na zwiększenie efektywności wymiany ciepła między płynem a powierzchnią chłodzoną.

Jak zauważył autor dysertacji, w literaturze naukowej brak jest badań dotyczących takich zagadnień, jak: „przepływu płynu i ciepła w obszarze chłodzonej powierzchni o parametrach pracy wykorzystywanych w turbinach niskiego ciśnienia silników lotniczych; określenia sposobów uzyskania możliwie jednolitych rozkładów temperatury wzdłuż powierzchni chłodzonej w celu eliminacji naprężeń cieplnych; zastosowania strumieniowych układów do chłodzenia powierzchni o nierównomiernym rozkładzie temperatury”.

Te wyżej wymienione otwarte problemy stały się dla doktoranta motywacją do podjęcia badań zaprezentowanych w ramach pracy doktorskiej. Metodyka podjętych badań opiera się na wykorzystaniu symulacji numerycznych oraz analizy ich wyników. Symulacje numeryczne dotyczyły układu równań opisującego transport masy i pędu w obszarze strumieniowego układu chłodzenia w reżimie pracy turbiny niskiego ciśnienia silnika lotniczego.

W ramach pracy doktorant przeanalizował szereg istotnych parametrów geometrycznych strumieniowych układów chłodzenia, takich jak: kształt dysz, odległość dysz od powierzchni chłodzonej, odległość między dyszami. W przypadku badania wpływu zastosowania różnej geometrii dysz rozpatrywano trójwymiarową geometrię układów chłodzenia o czterech rodzajach dysz: cylindrycznych, zbieżnych, rozbieżnych i cylindrycznych wydłużonych.

Rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Marca składa się łącznie ze 137 stron. Główna część pracy została podzielona na osiem rozdziałów.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia cele podjętych badań, zakres prezentowanej pracy, przegląd literatury dotyczącej analizowanych zagadnień oraz motywację podjęcia zaprezentowanej tematyki.

Rozdział drugi poświęcony został sformułowaniu problemu badawczego podjętego w ramach prezentowanej dysertacji.

W rozdziale trzecim Autor opisuje metodykę zastosowaną w pracy. Ponieważ praca wykorzystywała obliczenia numeryczne z wykorzystaniem modeli turbulencji, Autor omawia kwestie związane z modelowaniem przepływu płynu i ciepła w strumieniowych układach chłodzenia. Opisana została również geometria zagadnienia oraz siatka obliczeniowa dla obszaru przepływowego.

Rozdział czwarty zawiera opis serii analiz numerycznych przepływu płynu i ciepła w obszarze przepływowym strumieniowego układu chłodzenia przy założeniu stałej temperatury powierzchni chłodzonej. W pierwszym etapie Autor skupił się na zbadaniu wpływu odległości układu chłodzenia od ścianki. Wykonano analizy sześciu przypadków o różnej odległości i na ich podstawie za wybrano najbardziej optymalną odległość, która używana była w kolejnych analizach. Następnie badanie czterech różnych odległości między dyszami pozwoliło na znalezienie optymalnej wartości dla tej wielkości. W kolejnej części rozprawy zbadano wpływ geometrii dyszy. Analizowano dysze zbieżne, rozbieżne oraz cylindryczne wydłużone.

Rozdział piąty zawiera wyniki analiz strumieniowego układu chłodzenia z uwzględnieniem zmiennego strumienia ciepła na powierzchni chłodzonej. Przy ustalonej odległości od powierzchni chłodzonej i przy ustalonej odległości między dyszami analizowano różne geometrie dysz. Podobnie jak poprzednio analizowano dysze cylindryczne, zbieżne, rozbieżne oraz cylindryczne wydłużone. W badaniach uwzględniono zarówno rosnące, jak i malejące wartości strumienia ciepła.

W rozdziale szóstym Autor przedstawia porównanie otrzymanych wyników, na którego podstawie możliwy jest dobór najkorzystniejszego układu chłodzenia w celu zwiększenia jego efektywności oraz redukcji naprężeń cieplnych powierzchni chłodzonej.

Zwieńczeniem badań jest rozdział siódmy, w którym opisano opracowany sposób doboru najkorzystniejszego układu dysz chłodzących.

W rozdziale ósmym, który jest ostatnim rozdziałem rozprawy, Autor przedstawia wnioski końcowe oraz wskazuje kierunki następnych badań.

Praca napisana jest zwięzłym językiem i bardzo starannie zedytowana. Zawiera 69 rysunków. Ponadto praca zawiera 72 przypisy.

Uwagi

- W obliczeniach numerycznych prezentowanych w pracy przyjęto założenie o nieściślności przepływu płynu. Brakuje jednak przekonującej argumentacji za przyjęciem takiego uproszczenia. Autor bada przepływ powietrza i zaniedbanie jego ściślności powinno być opatrzone odpowiednią dyskusją.

- Do scharakteryzowania efektywności chłodzenia przez strumieniowy układ, Autor używa liczby Nusselta. Pomimo że jest to główny parametr używany w pracy i pojawiający się wielokrotnie, Autor nie poświęcił zbyt wielkiej uwagi na jego dokładny opis i interpretację. Przy opisie liczby Nusselta na stronach 17-18 pojawia się wiele niejasności jak na przykład:
 - Temperatura T_j definiowana jest raz jako temperatura płynu (w jakim punkcie?) a po raz kolejny jako temperatura dyszy. Czy te wartości są tożsame?
 - Współczynnik przewodzenia ciepła we wzorze (1.1) oznaczony jest jako k , podczas gdy w przytoczonym poniżej tego wzoru objaśnieniu pojawia się z dodatkowym indeksem – k_A . Jaka jest rola tego indeksu?
 - Dlaczego jako charakterystyczny wymiar liniowy we wzorze (1.1) na liczbę Nusselta pojawia się średnica dyszy D ? Jak interpretuje się wartości liczby Nusselta w przypadku dwóch układów o tych samych współczynnikach przejmowania ciepła, ale o różnych rozmiarach dyszy?
- Nie jest jasne również, jak liczba Nusselta była obliczana na podstawie otrzymanych wyników z obliczeń numerycznych. Czy współczynnik przejmowania ciepła był liczony na podstawie profilu temperatury?
- Niejasna jest również definicja średniej wartości liczby Nusselta (wzór (3.2)). Średnia otrzymana jest przez scałkowanie liczby Nusselta zależnej od współrzędnej x . Jednak zależność liczby Nusselta od współrzędnej x nie jest wcześniej zdefiniowana.
- Do obliczeń numerycznych Autor używa oprogramowania Ansys CFX. W rozprawie brakuje jednak uzasadnienia wyboru tego narzędzia.
- Oprócz pól prędkości, obrazujących obliczenia numeryczne analizowanych przypadków, Autor mógłby pokazać również pola temperatury płynu, co pozwoliłoby na lepszą wizualizację mechanizmu chłodzenia.

Podsumowanie

Powyższe uwagi stanowią wskazówki dla lepszego przygotowania kolejnych publikacji i nie wpływają na wysoką ocenę merytoryczną pracy. Praca przedstawiona przez mgra inż.

Krzysztofa Marca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu optymalizacji strumieniowego układu chłodzenia. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną w temacie wymiany ciepła w układach przepływowych oraz wiedzą w zakresie zastosowania metod numerycznych do rozwiązywania problemów technicznych. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach prezentowanej pracy zostały opublikowane w sześciu publikacjach naukowych. Na uwagę zasługuje fakt, że rezultatem badań jest wynalazek przyznany przez Urząd Patentowy.

Biorąc pod uwagę wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Marca, stwierdzam, że oceniana praca doktorska spełnia kryteria stawiane kandydatom ubiegającym się o stopień naukowy doktora, 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. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami).

W związku z przedstawioną wyżej pozytywną oceną całej pracy doktorskiej wnoszę do Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie mgra inż. Krzysztofa Marca do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



