

Prof. dr hab. inż. Piotr Doerffer
IMP PAN
Fiszera 14
80-231 Gdańsk

8.10.2019

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Marca

Wpływ geometrii dysz stosowanych w strumieniowych systemach chłodzenia na wymianę ciepła

Wprowadzenie:

Recenzja pracy doktorskiej została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa prof. Jarosława Sępa z Politechniki Rzeszowskiej.

Praca wykonana jest w Dyscyplinie Mechanika (obecnie inżynieria mechaniczna).

Charakterystyka rozprawy

Praca dotyczy bardzo aktualnego zagadnienia, które znajduje wiele zastosowań praktycznych. Intensyfikacja chłodzenia przy pomocy strug jest wykorzystywana w turbinach do aktywnego sterowania szczelinami nadłopatkowymi jak i do wewnętrznego chłodzenia łopatek turbinowych. Ta metoda znajduje również wiele innych zastosowań w technice.

Rozprawa zawarta jest na 127 stronach i, odnosi się do 72 pozycji literaturowych.

Ocena struktury rozprawy

Dysertacja przedstawiona jest w sposób bardzo przejrzysty i systematyczny. Jest to praca wyłącznie numeryczna, co może budzić pewne zastrzeżenia. Sama metoda numeryczna nie jest przedmiotem rozprawy, doktorant stosuje komercyjny kod numeryczny CFX.

Autor najpierw formułuje zagadnienie rozpatrywane w rozprawie i omawia zarówno równania opisujące model badanego przepływu jak i warunki brzegowe, przy których jest ono rozwiązywane. Cały rozdział 3 poświęcony jest omówieniu metod numerycznych stosowanych do rozwiązywania zagadnień cieplno przepływowych. Rozdział ten omawia również układy chłodzenia rozpatrywane w pracy oraz poświęca wiele miejsca omówieniu dyskretyzacji badanego obszaru przepływowego.

Dalsza część pracy poświęcona jest omówieniu uzyskanych wyników, które stanowią meritum prowadzonych badań. Po pierwsze w rozdziale 4 omówione są skutki chłodzenia płyty o stałej temperaturze przez dysze o różnych geometriach. Doktorant porównał efektywność chłodzenia przy zastosowaniu czterech różnych geometrii dysz. Poza tym badał wpływ odległości dysz od chłodzonej ścianki. Kolejnym badanym aspektem był wpływ odległości pomiędzy dyszami na skuteczność chłodzenia. Takie kompleksowe podejście do

analizy skuteczności chłodzenia spowodowało bardzo dużą liczbę badanych przypadków. Należy tu podkreślić ogrom pracy włożony w prowadzone badania.

Drugim elementem pracy przedstawionym w rozdziale 5 jest wpływ gradientu temperatury wzdłuż chłodzonej płyty. I tu przeprowadzony został wielki cykl badań.

Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami, które mogą być wykorzystane do dalszych badań.

Należy podkreślić, że praca jest napisana w przejrzysty sposób. Jest łatwa w czytaniu i zawiera wiele ciekawych wyników naukowych.

Analiza rozprawy z uwagami dyskusyjnymi.

W opisie zagadnienia na str. 34 powiedziano, że - *wartość parametrów przepływowych takich jak liczba Reynoldsa, mieszczą się w zakresie wartości pracy strumieniowych układów chłodzenia stosowanych w lotnictwie*. To stwierdzenie wydaje się zbyt ogólne. Czy z tego wynikały konkretne warunki pracy dla analizowanych przypadków?

Trójwymiarowy model rozpatrywanego przepływu (Rys.2.1) jest zbyt mało omówiony. Obszar obliczeniowy jest faktycznie prostopadłościennym pudełkiem, na górze którego znajdują się dysze wlotowe. Warunkami brzegowymi na ścianach (Tabela 2.1, str. 41) obszaru obliczeniowego jest stałe ciśnienie i brak gradientu prędkości. Rozumiem, że to jest jakby jednorodny strumień wylotowy o stałym ciśnieniu. Jednakże pomiędzy dyszami, jak na Rys. 2.2 i innych osiowych przekrojach wzdłużnych, pomiędzy dyszami, warunek dla obszaru pod kanałem dolotowym powinna być ścianka. To jest takie osobliwe miejsce gdzie ścianka kanału dolotowego ma wpływ na strukturę przepływu szczególnie dla małych odległości pomiędzy chłodzoną ścianą a dyszami. Ten aspekt został jednak pominięty w dyskusji i chyba dlatego w pracy nie ma ani jednej ilustracji pokazującej strukturę przepływu w płaszczyźnie prostopadłej do osi kanału dystrybucyjnego.

Warunki wymiany ciepła na chłodzonej płycie nie są jasno wytłumaczone. Z jednej strony w tytule rozdziału 4 mowa jest o płycie o stałej temperaturze, a dalej w tekście jest powiedziane, że przyjęto stałą wartość strumienia ciepła o wartości $q_w=5000 \text{ W/m}^2$. Albo przyjmujemy warunek stałej temperatury albo stałego strumienia ciepła, na coś trzeba się zdecydować. Wydaje mi się, że biorąc pod uwagę rozdział 5 to warunkiem brzegowym jest stały strumień ciepła. W konsekwencji temperatura ścianki nie jest stała.

Badanie rozkładu liczby Nusselta dla $Y/D=6$ oraz 8 wykazuje wyraźne zwiększenie intensywności wymiany ciepła dla ostatnich dysz. Zostało to zauważone przez doktoranta ale nie wyjaśnione. Ciekawe, że dla mniejszych i większej wartości Y/D ten efekt nie występuje. Ciekawe, że dla badania efektu rozstawienia dysz wybrano odległość $Y/D=8$, przy której widoczny był efekt zwiększenia wymiany ciepła na końcu kanału zasilającego. Ten efekt jest potwierdzony dla wszystkich badanych odległości pomiędzy dyszami. Nie zostało nadal wyjaśnione dlaczego on występuje, ani nie zweryfikowano czy przy mniejszej odległości dyszy od ścianki ten efekt zaniknąłby.

W rozdziale 4.3 przedstawiono straty przepływu w badanych typach dysz wylotowych. Bardzo ciekawe jest, że dysze zbieżne generują pięciokrotnie mniejsze straty niż dysze rozbieżne. To jest tak znaczący efekt, że natychmiast narzuca się pytanie dlaczego tak się dzieje. Doktorant jednak poza stwierdzeniem tego faktu nie podjął się wyjaśnienia jego przyczyn.

W rozdziale 5 w tytule znajduje się „płyta o zmiennej temperaturze” i tym razem jako warunek brzegowy nie zastosowano rozkładu temperatury na płycie tylko zmienny strumień ciepła wzdłuż długości płyty. Wydaje się, że autor niepotrzebnie mówi o temperaturze płyty, która w rozdziale 4 jak i w rozdziale 5 jest zmienna i nie stanowi warunku brzegowego na płycie.

Trochę brakuje w pracy uzasadnienia stosowania zmiennego strumienia ciepła wzdłuż kanału dystrybucyjnego. W systemach ACC kanały te są rozlokowane pierścieniowo wokół cylindra turbiny. Zmiana strumienia ciepła występuje w kierunku osiowym turbiny, a nie w kierunku obwodowym. Spodziewałbym się raczej zmiany strumienia ciepła poprzecznie do kanału dystrybucyjnego. Myślę, że brak tutaj wyjaśnienia pod kątem jakiej aplikacji wykonane zostały te badania.

W rozdziale 5 rozpatrywano przypadki dla jednej odległości kanału dystrybucyjnego od ścianki $Y/D=8$ oraz dla jednej odległości pomiędzy dyszami $S/D=10$. Jest to więc przypadek który w Rozdziale 4 wykazuje przyrost liczby Nusselta wzdłuż długości płyty Rys.4.11. Szkoda, że na Rys.5.2 nie naniesiono krzywej dla stałego strumienia ciepła. Widać jednak, że przyrost strumienia ciepła ma wyraźny wpływ na gradient przyrostu liczby Nusselta, jakościowo w podobny sposób jak to miało miejsce przy stałym strumieniu.

Interesujący jest fakt, że zmniejszanie strumienia ciepła ma na tyle silny wpływ na rozkład Nu , że następuje odwrócenie tendencji, powodując spadek wartości wzdłuż długości ściany. Taka tendencja została zaobserwowana dla wszystkich badanych kształtów dysz.

W pracy przebadano kilkadziesiąt przypadków, co pozwoliło na wyciągnięcie istotnych wniosków. Wyniki badań pozwoliły na wybór najefektywniejszej konfiguracji chłodzenia. Najwyższe średnie liczby Nusselta uzyskuje się dla odległości dysz od chłodzonej ścianki równej 8 średnicom dyszy. Najefektywniejszy rozstaw dysz natomiast wynosi 10 średnic dyszy. Dla wszystkich badanych przypadków najprostsze dysze cylindryczne okazały się być najskuteczniejsze.

Posumowanie

Przedstawiona praca zawiera istotny wkład w rozwój metod intensyfikacji wymiany ciepła. Jest to tematyka szczególnie istotna dla rozwoju różnych dziedzin techniki i ma oczywiście swoje miejsce w technologiach lotniczych.

Jestem przekonany, że praca doktorska spełnia kryteria stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. Nr 65, poz 595 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

