

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Gila
pt. „Wpływ parametrów geometrycznych generatora strugi syntetycznej na
efektywność chłodzenia w aspekcie zastosowań w urządzeniach technicznych”

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest generator strugi syntetycznej z jednootworową dyszą. Przeprowadzone zostały badania wpływu parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych generatora strugi na jego sprawność. Wyznaczone zostały rozkłady prędkości w pobliżu i w większej odległości od generatora strugi. Przedstawione zostały wyniki badań chłodzenia powierzchni płaskiej strugą syntetyczną oraz swobodną. Porównano również efektywność chłodzenia radiatora za pomocą strugi syntetycznej i wentylatora stosowanego w chłodzeniu komputera.

Tematyka rozprawy ma duże znaczenie poznawcze jak i praktyczne. Zjawisko generowania strugi syntetycznej jak i zastosowanie jej do chłodzenia uderzeniowego ciał stałych nie są dostatecznie rozpoznane i mogą stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej.

1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Gila o objętości 161 stron składa się z dziesięciu rozdziałów, spisu oznaczeń, spisu literatury cytowanej zawierającego 137 pozycji literaturowych oraz dwóch krótkich streszczeń w języku polskim i angielskim.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi wstęp, w którym Kandydat charakteryzuje zasadę działania urządzenia wytwarzającego strugę syntetyczną, składającego się z trzech elementów: elementu drgającego, komory oraz dyszy.

Do komory jest cyklicznie zasysane powietrze, które następnie wypływa z komory generując w pewnej odległości od dyszy wir pierścieniowy. Cyklicznie powstające wiry pierścieniowe zasysają dodatkowo powietrze z otoczenia i tworzą strugę syntetyczną. Generator strugi nie jest zasilany strumieniem powietrza z zewnątrz. Podobną strugę, zwaną także strumieniem akustycznym, generuje również wentylowana kolumna głośnikowa.

Strugi syntetyczne wykorzystywane są w technice między innymi do chłodzenia ciał stałych strugą gazu.

Ponadto w rozdziale 1 przeprowadzony został przegląd literatury, charakteryzujący aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki pracy, a także sformułowane zostały tezy i cel rozprawy doktorskiej.

Przedmiotem rozdziału 2 jest stanowisko pomiarowe. W paragrafie 2.1 opisana została budowa generatora strugi syntetycznej, którego głównym elementem jest głośnik niskotonowy o średnicy membrany 145 mm. Dyszę stanowi otwór kołowy w płycie wykonanej z pleksi. Badane były dysze o średnicach 9, 15 i 24 mm o grubości 3, 5 i 20 mm. W kolejnym paragrafie omówiono zasilanie generatora obejmujące generowanie sygnału cyfrowego, przetwarzanie sygnału cyfrowego na analogowy i wzmacnianie sygnału analogowego. Do pomiaru prędkości przepływu powietrza w strudze syntetycznej zastosowany został termooanemometr stałotemperaturowy. Z uwagi na dużą częstotliwość zmian prędkości powietrza w osi dyszy wybór metody pomiarowej jest w pełni uzasadniony.

W paragrafie 2.4 omówiono układ do pomiaru uśrednionego w czasie współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni płyty, na którą prostopadle napływa struga syntetyczna.

Sposób pomiaru gęstości strumienia ciepła przekazywanego od gorącej ożebrowanej płyty (radiatora) chłodzonej strugą syntetyczną do otoczenia przedstawiony jest w paragrafie 2.5.

Stanowisko badawcze do wizualizacji strugi syntetycznej jest przedmiotem paragrafu 2.6.

Zastosowana została metoda optyczna, tzw. metoda dymiącego drutu, w której nagrany drut posmarowany gliceryną lub olejem roślinnym, umieszczony w komorze generatora, wytwarza dym. Struga syntetyczna podświetlana jest laserem zielonym, dzięki czemu możliwa jest obserwacja strugi syntetycznej za pomocą kamery cyfrowej.

W paragrafie 2.7 przedstawiono sposób wyznaczania niepewności wielkości fizycznych mierzonych bezpośrednio.

W rozdziale 3 omówione są parametry charakteryzujące strugę syntetyczną oraz liczby kryterialne.

Charakterystycznym wymiarem strugi wypływającej okresowo z komory jest długość umownego walca płynu. Jest ona równa iloczynowi uśrednionej czasowo i przestrzennie prędkości płynu U_e wypływającego z komory oraz okresu drgań T . Periodyczny charakter strugi syntetycznej ujmuje liczba Stokesa St_k lub Strouhala Sr za pomocą której można wyrazić bezwymiarową długość walca: $L = L_0 / d = \pi / Sr$. Sprawność generatora strugi syntetycznej jest definiowana jako stosunek energii kinetycznej płynu wypływającego z komory do energii elektrycznej dostarczonej do generatora strugi syntetycznej w ciągu okresu drgań T .

Następnie omówione zostały parametry charakteryzujące konwekcyjną wymianę ciepła na powierzchni płaskiej, na którą prostopadle napływa struga syntetyczna. W badaniach zastosowano płytkę gładką lub ożebrowaną (radiator) o wymiarach 66×66 podgrzewaną od spodu. Na podstawie pomiaru temperatury i gęstości strumienia ciepła na powierzchni płytki od strony napływającego powietrza oraz pomiaru temperatury otoczenia wyznaczany był uśredniony w czasie i na powierzchni płytki współczynnik przejmowania ciepła.

Przedmiotem rozdziału 4 jest plan badań, który obejmował badania przepływowe strugi syntetycznej oraz wymiany ciepła na powierzchni płaskiej w zależności od parametrów geometrycznych i parametrów pracy generatora strugi syntetycznej. Ponadto wyznaczane były profile osiowe i promieniowe strugi syntetycznej oraz przeprowadzona została wizualizacja strugi. Badania przepływowo-ciepłne strugi przeprowadzono dla różnych wartości pięciu parametrów, takich jak: średnica i grubość dyszy, głębokość komory, napięcie skuteczne zasilania głośnika oraz współrzędna osiowa i promieniowa. Zmieniana była również wartość liczby Reynoldsa i Stokesa.

Przedmiotem rozdziału 5 jest porównanie pomiarów własnych z pomiarami innych autorów.

Analizowana była prędkość chwilowa i uśredniona w osi strugi, a także profile prędkości w funkcji promienia dla różnych odległości od przekroju wylotowego dyszy. Autor stwierdził dobrą zgodność otrzymanych wyników z wynikami badań innych autorów. W paragrafie 5.2 Autor weryfikował eksperymentalnie kryterium powstawania strugi syntetycznej zaproponowane przez Holmana (odwrotność liczby Strouhala powinna być większa lub równa 0,16). Również w tym przypadku wyniki otrzymane przez Autora nie odbiegają od dotychczas uzyskanych wyników. Pomiar liczby Nusselta przy chłodzeniu uderzeniowym strugą swobodną omówiony jest w paragrafie 5.3. Wyznaczone w rozprawie wartości liczby Nusselta w punkcie spiętrzenia dla różnych odległości dyszy od powierzchni płaskiej potwierdzają dostępne w literaturze korelacje do obliczania liczby Nusselta.

Po przeprowadzonych testach porównawczych potwierdzających poprawność zastosowanych technik pomiarowych, Kandydat przedstawił wyniki obszernych badań własnych. Identyfikacja częstotliwości rezonansowych Helmholtza przeprowadzona została w paragrafie 6.1. Badania wpływu zmiany średnicy dyszy na parametry przepływowo-ciepne przedstawione zostały w paragrafie 6.2. Wyznaczono m.in. przebieg prędkości skutecznej i maksymalnej w funkcji częstotliwości stwierdzając, że największe prędkości powietrza występują przy częstotliwości rezonansowej głośnika oraz częstotliwości rezonansowej Helmholtza. Badania eksperymentalne pokazują, że średnia prędkość powietrza podczas wytłaczania powietrza z komory jest większa niż prędkość zasysania do komory a poziom turbulencji strugi syntetycznej zależy od częstotliwości i średnicy dyszy. Stwierdzono również, że sprawność generatora strugi zależy w istotny sposób od średnicy dyszy, nie jest jednak wyższa od 5%. Bezwymiarowa długość walca jest największa dla średnicy dyszy równej 9 mm w porównaniu z długościami wyznaczonymi dla średnicy dyszy równej 15 lub 24 mm. Największy wpływ częstotliwości na wartości liczby Nusselta w punkcie spiętrzenia stwierdzono dla dyszy o średnicy 9 mm. Maksymalne wartości współczynnika przejmowania ciepła nie przekraczają $150 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Wartość liczby Nusselta w punkcie spiętrzenia silnie zależy od bezwymiarowej długości walca. Sprawność generatora strugi i efektywność chłodzenia w funkcji średnicy dyszy wyznaczone zostały dla częstotliwości rezonansowej głośnika i częstotliwości rezonansowej Helmholtza.

Wpływ zmian długości dyszy oraz objętości komory generatora strugi syntetycznej na parametry przepływowo-ciepne badanego układu generator strugi syntetycznej - - podgrzewana pozioma płyta przedstawiono odpowiednio w paragrafach 6.3 i 6.4. Badany był również wpływ napięcia zasilania generatora, odległości dyszy od płyty oraz liczby Reynoldsa i Stokesa na wielkości przepływowo-ciepne wymienionego układu.

Promieniowe profile prędkości dla różnych wartości liczby Reynoldsa i Stokesa analizowane są w paragrafie 6.8. Wizualizację tworzenia się wiru pierścieniowego zawiera paragraf 6.9.

W rozdziale 7 wyznaczone zostały na podstawie badań eksperymentalnych bezwymiarowe zależności (korelacje) na liczbę Nusselta w punkcie spiętrzenia na powierzchni grzanej płyty.

Liczba Nusselta w punkcie spiętrzenia jest funkcją liczby Reynoldsa, Prandtla, bezwymiarowej długości walca oraz funkcją bezwymiarowej odległości wylotu dyszy od płyty.

Porównanie właściwości chłodzących strugi syntetycznej i swobodnej jest przedmiotem rozdziału 8.

W krótkim rozdziale 9 przedstawiono zastosowanie generatora strugi syntetycznej do chłodzenia ożebrowanego radiatora (ożebrowana płyta o wymiarach 66×66 mm).

Podsumowanie i wnioski zawiera rozdział 10.

2. Główne osiągnięcia naukowe

Do głównych osiągnięć mgr inż. Pawła Gila zaliczyłbym przeprowadzenie obszernych badań eksperymentalnych pod kątem oceny wpływu parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych generatora strugi syntetycznej na jego sprawność oraz efektywność chłodzenia płyty płaskiej lub ożebrowanej. Do Jego ważnych osiągnięć należy również wizualizacja strugi syntetycznej. Wizualizacyjne badania morfologii strugi syntetycznej uwidoczniły mechanizm formowania się wirów pierścieniowych. Ważnym wnioskiem poznawczym sformułowanym na podstawie badań eksperymentalnych jest podobieństwo uśrednionej w czasie strugi syntetycznej do turbulentnej strugi swobodnej wypływającej z dyszy, występujące w odległości $x/d > 9$. Kąt rozchodzenia się strugi syntetycznej wynosi $35,8^\circ$. Kandydat stwierdził, że generator strugi syntetycznej posiada dwie częstotliwości rezonansowe: głośnika oraz Helmholtza. Częstotliwość rezonansowa głośnika jest stała, a częstotliwość rezonansowa Helmholtza w generatorze strugi syntetycznej jest zależna od objętości komory, średnicy i długości dyszy.

Struga syntetyczna zastosowana do chłodzenia jest najbardziej efektywna przy częstotliwości rezonansowej głośnika lub częstotliwości Helmholtza. Kandydat zaproponował nowe korelacje na liczbę Nusselta w punkcie stagnacji przy prostopadłym napływie strugi syntetycznej na płaską gorącą powierzchnię.

Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Kandydata mają również znaczenie praktyczne. Wynika z nich, że generator strugi syntetycznej może być wykorzystany do chłodzenia różnego rodzaju komponentów urządzeń elektronicznych wydzielających ciepło. Efektywność chłodzenia za pomocą strugi syntetycznej jest porównywalna z efektywnością chłodzenia za pomocą wentylatorów.

Mgr inż. Paweł Gil wyznaczył również optymalne parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne generatora strugi syntetycznej stosowanego do chłodzenia uderzeniowego płyty płaskiej.

3. Uwagi krytyczne

- Kandydat wyznaczał uśrednioną w czasie gęstość strumienia ciepła na powierzchni płyty gładkiej lub pod powierzchnią ożebrowaną. Więcej informacji dostarczyłby pomiar nieustalonego strumienia ciepła na powierzchni płyty gładkiej lub żeber. Odpowiednie techniki pomiarowe można znaleźć, np. w pracy: Taler J., Taler D., Measurement of Heat Flux and Heat Transfer Coefficient, w książce Heat Flux, Processes, Measurement Techniques and Applications, pod redakcją: Gianluca Cirimele, Marcello D'Elia, Energy Science, Engineering and Technology, rozdział 1, Nova Science Publishers, Inc., New York 2012, 1-103 (Open access).

- Na stronie 39 Autor pisze: „Celem eksperymentu jest wyznaczenie stosunku mocy cieplnej rozpraszanej z radiatora do mocy elektrycznej dostarczanej do generatora strugi syntetycznej: Iloraz tych wielkości nazywa się efektywnością chłodzenia.”. Definicja efektywności chłodzenia nie jest zbyt precyzyjna. Nawet bez dostarczania energii elektrycznej do generatora strugi, chłodzenie nagrzanej powierzchni płyty będzie zachodzić w wyniku występowania konwekcji naturalnej. W takim przypadku efektywność chłodzenia zmierza do nieskończoności.
- Również stwierdzenie „W celu określenia rozszerzonej niepewności pomiaru, zastosowano standardowy współczynnik rozszerzenia wynoszący 2 by tak oszacowana niepewność pomiaru odpowiadała poziomowi ufności 95%.” jest niejasne. Współczynnik 2 nie jest współczynnikiem rozszerzenia ale kwantylem rozkładu Studenta dla 95-cio procentowego poziomu ufności i nieskończonej liczby danych pomiarowych.

Wyszczególnione wyżej uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Gila spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim. Z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Pawła Gila do publicznej obrony swojej pracy.

Mając na uwadze bardzo szeroki zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz bogaty dorobek publikacyjny Kandydata proponuję wyróżnić recenzowaną rozprawę doktorską.

David Jaler