

Politechnika Śląska w Gliwicach Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

# ANALIZA INTENSYFIKACJI WYMIANY CIEPŁA FALĄ AKUSTYCZNĄ

Sebastian Rulik

Włodzimierz Wróblewski

Krzysztof Rusin

Mirosław Majkut



### Zakres prowadzonych badań

Zaprezentowane badania stanowią podsumowanie prac mających na celu szczegółową analizę zjawisk występujących w rezonatorach akustycznych wraz z ocenę relacji pomiędzy parametrami generowanej fali akustycznej a warunkami wymiany ciepła w rejonie komory. Zakres prowadzonych badań obejmował wiele zadań oraz realizację celów szczegółowych, z których podstawowe to:

- opracowanie modeli CFD (dwuwymiarowe oraz trójwymiarowe),
- budowa stanowiska laboratoryjnego wraz ze specjalnym systemem pomiarowym obejmującym blok sygnałów wolno- oraz szybkozmiennych,
- wykonanie pomiarów dla szerokiego zakresu warunków przepływowych oraz ich porównanie z symulacjami numerycznymi
- wizualizacja pola przepływu przy wykorzystaniu metody typu schlieren zastosowana dla przepływów z niskimi liczbami Macha,
- analiza zjawisk cieplno-przepływowych dla różnych warunków przepływowych oraz konfiguracji geometrycznych komory,
- aplikacja rezonatora akustycznego do układu chłodzenia konwekcyjnego kanału typu "U".





### Przepływ przez komory - przykłady



r = b r = b r = b r = b r = b r = b r = b  $r = c_{e}$   $r = c_{e}$ 

Kamouni M., Tridimensional analysis of a Turbulent Flow through an Eccentric Short Labyrinth Seal, International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 19 No. 1 Jan. 2017, pp. 37-45

Oettle, Nicholas and Sims-Williams, David (2017) 'Automotive aeroacoustics : an overview.', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D : Journal of automobile engineering., 231 (9). pp. 1177-1189. Patinios, M., Scobie, J. A., Sangan, C. M., Owen, J. M., and Lock, G. D., 2017, "Measurements and Modeling of Ingress in a New 1.5-Stage Turbine Research Facility." ASME. J. Eng. Gas Turbines Power., 139(1): 012603



https://www.pcmag.com/news/nasa-tech-reduces-aircraft-noise-by-up-to-70-percent





Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Mechanizm generacji dźwięku

Rossiter jako pierwszy zauważył, że częstotliwość drgań własnych komory jest związana z mechanizmem sprzężenia zwrotnego. Jego obserwacje przy wykorzystaniu metody smugowej wykazały obecność dużych struktur wirowych odpowiedzialnych za pulsacje ciśnienia w komorze. Ich interakcja z tylną ścianą komory powoduje powstanie impulsów ciśnienia, które przesuwając się w kierunku przedniej ściany komory, intensyfikują spływ kolejnych wirów. Część generowanych fal wydostaje się na zewnątrz komory i jest odpowiedzialna za generację hałasu.

Drugim typem rezonansu, który może pojawić się w omawianym przypadku przepływu, jest praca komory jako tzw. rezonator Helmholtza.



Zależność Rossitera

$$St = \frac{fL}{U_{\infty}} = \frac{m - \alpha}{Ma + \frac{1}{k}}$$





### Stanowisko badawcze







Katedra Maszyn <u>i Urządzeń Energ</u>etycznych

www.kmiue.polsl.pl

5

### Stanowisko badawcze









System przygotowania powietrza oraz stanowisko badawcze wraz z systemem pomiarowym





Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Model obliczeniowy



w	Vlot	Prędkość: 30-80 m/s Temperatura statyczna: 15ºC Intensywność turbulencji: 1%
N	ylot Uśrednione ciśnienie statyczne: 1 bar	
Ś	Ściany kanału Adiabatyczne	
Ś	ciany komory	Adiabatyczne lub z uwzględnieniem przepływu ciepła przez założenie stałej temperatury ściany równej 120ºC (warunek Dirichleta)
P	Płyn Powietrze – gaz doskonały	
P	rzepływ ciepła	Równanie energii oparte na entalpiach spoczynkowych z uwzględnieniem pracy związanej z występowaniem naprężeń stycznych
N tu	1odel urbulencji	SST lub metoda DES







Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych



Wzbudzenie fluktuacji ciśnienia akustycznego przy prędkości przepływu w kanale 50 m/s – model 1









Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Wyniki obliczeń

2D k-ω SST (model 1) 160 –Punkt D —Punkt P –Punkt L 140 120 **8b**, 100 80 60 40 0 1000 2000 3000 4000 5000 *f,* Hz 300 -Punkt D -Punkt P -Punkt L 250 200 150 100 50 *p'*, Pa 0 -50 -100 -150 -200 -250 -300 0 10 12 14 16 18 20 t, ms







Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Wyniki obliczeń

3D k-ω SST 500 400 —Punkt D -Punkt P —Punkt L -Punkt D -Punkt P -Punkt L 400 300 300 200 200 100 100 **م**', Pa *p'*, Pa 0 v=80 m/s -100 -200 -200 -300 -300 -400 -400 -500 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 0.0 4.5 5 0 0.5 1.5 3.5 1 2 2.5 3 4 *t,* ms *t,* ms Obliczenia Eksperyment Р L D





Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Wyniki obliczeń



#### Rozkład wirowości prędkości oraz ciśnienia akustycznego.





Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Wizualizacja pola przepływu







Katedra Maszyn <u>i Urz</u>ądzeń Energetycznych

www.kmiue.polsl.pl

12

### Wizualizacja pola przepływu



## v=50 m/s f=1235 Hz







Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Analiza wymiany ciepła



Politechnika Śląska



Katedra Maszyn <u>i Urządzeń En</u>ergetycznych

www.kmiue.polsl.pl

14

### Analiza wymiany ciepła



Średnie wartości współczynnika wnikania ciepła





Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Optymalizacja kształtu







Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Aplikacja rezonatora w kanale typu "U"



Warunki brzegowe			
Wlat	Prędkość: 50 m/s		
WIOL	Temperatura statyczna: 573 K		
Wylot	Uśrednione ciśnienie statyczne: 15 bar		
Ściana	Adiabatyczna		
Ściany L, R, DA, DB	Interfejs płyn-ciało stałe		
Zewnętrzna ściana metalu	HTC: 300 W(m <sup>2</sup> K)		
	Temperatura zewnętrzna: 1273 K		
Pozostałe założenia			
Płyn	Powietrze – gaz doskonały		
	Równanie energii oparte na entalpiach		
Przepływ ciepła	spoczynkowych z uwzględnieniem pracy		
	sił lepkościowych		
Model turbulencji	k-ω SST		
Kontrola kroku czasowego (tylko dla rozwiązania	Obszar ciała stałego – krok fizyczny 0.5 s		
stacjonarnego)	Obszar płynu – krok fizyczny 10 <sup>-5</sup> s		
Krok czasowy (tylko dla analizy niestacjonarnej)	10 <sup>-5</sup> s		





Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

### Aplikacja rezonatora w kanale typu "U"





Shen Z., Xie Y. Zhang D., Experimental and numerical study on heat transfer in trailing edge cooling passages with dimples/protrusions under the effect of side wall slot ejection, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 92, 2016, p. 1218-1235

--- Temperatura płynu - punkt D --- Temperatura metalu - TDa --- Temperatura metalu - TDb





### Aplikacja rezonatora w kanale typu "U"



Dla wariantu referencyjnego temperatura na brzegach metalu zmienia się w zakresie 1085-1149 K, dla natomiast wariantu 7 komorą zastosowaną jest to odpowiednio 989-1025 K. Przy wzięciu pod uwagę bezwzględnej wartości temperatury aplikacja komory rezonansowej prowadzi do spadku maksymalnej temperatury metalu aż o 124 K.





Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

#### Podsumowanie

- Przedstawione badania rozwijają obecny stan wiedzy, w szczególności jeśli chodzi o analizę generacji oraz propagacji dźwięku w kanałach zamkniętych, których przekrój jest zbliżony do wielkości rezonatora akustycznego.
- Zasadniczą częścią pracy było uzupełnienie prowadzonych badań z zakresu aeroakustyki o relację pomiędzy niestacjonarnym polem przepływowym w obszarze rezonatora akustycznego a warunkami wymiany ciepła.
- Uzyskane rezultaty badań pozwoliły na aplikację omawianego rozwiązania w uproszczonym modelu kanału typu "U", który jest stosowany w układzie chłodzenia konwekcyjnego łopatki turbinowej.
- Kierunkiem dalszych badań będzie przede wszystkim walidacja eksperymentalna przeprowadzonych symulacji numerycznych dotyczących warunków wymiany ciepła w komorze rezonansowej oraz pomiar pola prędkości przy wykorzystaniu systemu laserowej anemometrii dopplerowskiej.





## Dziękuję za uwagę!



Politechnika Śląska



Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych