

OBLICZENIA OSIĄGÓW DYSZY AEROSPIKE PRZY UŻYCIU PAKIETU FLUENT

Michał Folusiak
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Celem analiz numerycznych zaprezentowanych w artykule było rozpoznanie możliwości wykorzystania komercyjnego pakietu obliczeniowego ANSYS Fluent® do analiz osiązków i parametrów przepływu w dyszy aerospace. Analizowane przypadki obliczeniowe zbudowane zostały w oparciu o prosty model geometrii dyszy, pozwoliły jednak na wysnucie pewnych wniosków, które posłużą ukierunkowaniu dalszych prac.

OPIS PRZYPADKU OBLICZENIOWEGO

Modelem czynnika roboczego w obliczeniach był model gazu doskonałego. Zastosowano solver sprzężony (density based), strumienie liczone przy użyciu schematu Roe-FDS. Wykorzystano model lepkości $k-\epsilon$ Realizable.

Geometria dyszy określona została metodą przybliżoną, zaproponowaną przez Angelino, opartą o model gazu doskonałego, uogólnioną dla geometrii osiowosymetrycznych [1]. Dwuwymiarowy, osiowosymetryczny obszar obliczeniowy dyskretyzowany został siatką 100 000 komórek obliczeniowych. Siatkę skonstruowano w taki sposób, aby możliwe było jej wykorzystanie do wszystkich symulacji dysz o różnej długości względnej – poprzez wygaszanie obszarów w modelu dyszy o długości 10%. Zastosowany podział pozwolił jednocześnie na odczyt wartości składowych ciągu konturowego dyszy co 5% względnej długości dyszy.

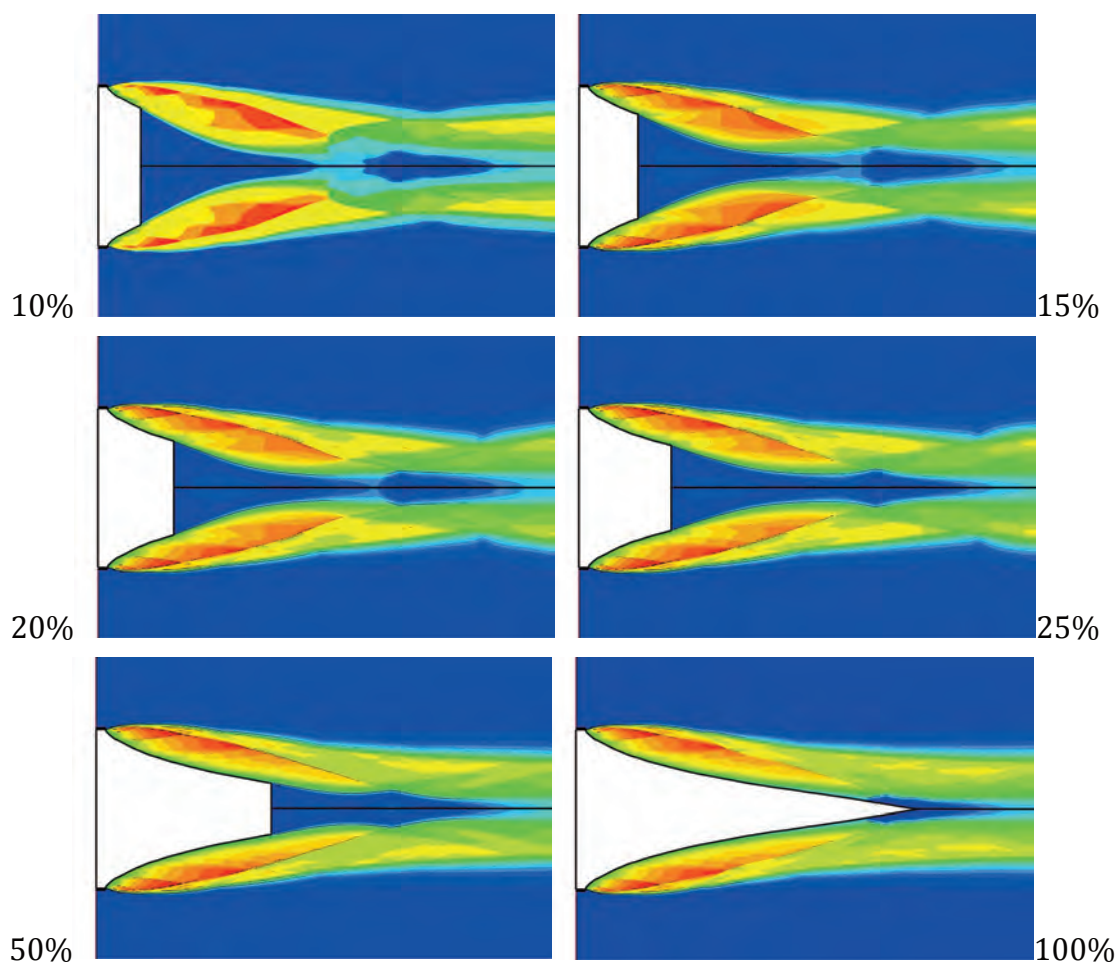
Rozprężanie realizowane było od ciśnienia $P_c=20$ bar w modelowanej toroidalnej komorze spalania hipotetycznego silnika o zasilaniu ciśnieniowym. Stosunek przekrojów dyszy wynosił $A_E/A_T=71,9$, stąd obliczeniowy rozpręż w dyszy $P_c/P_E=2440$. Założono średnicę przekroju wylotowego silnika $D_E=1,9$ m.

Obliczenia podzielone zostały na 2 etapy:

- badanie wpływu skrócenia dyszy na przepływ dla jednego, ustalonego ciśnienia otoczenia;
- badanie wpływu ciśnienia otoczenia na przepływ w dyszy o długości względnej 20%, przy różnych ciśnieniach otoczenia.

WPŁYW SKRÓCENIA DYSZY NA OSIĄGI

W pierwszym etapie analiz numerycznych przeanalizowanych zostało 6 modeli dysz, utworzonych poprzez wygaszanie odpowiednich obszarów siatki obliczeniowej. Utworzono w ten sposób dysze o identycznym konturze o długościach względnych - 10, 15, 20, 25, 50 i 100%. Ciśnienie otoczenia ustalone zostało na poziomie $P_{amb}=0,02$ bar, czyli znacznie powyżej ciśnienia obliczeniowego dyszy. Na rysunku 1 przedstawione zostały graficznie wyniki analiz.



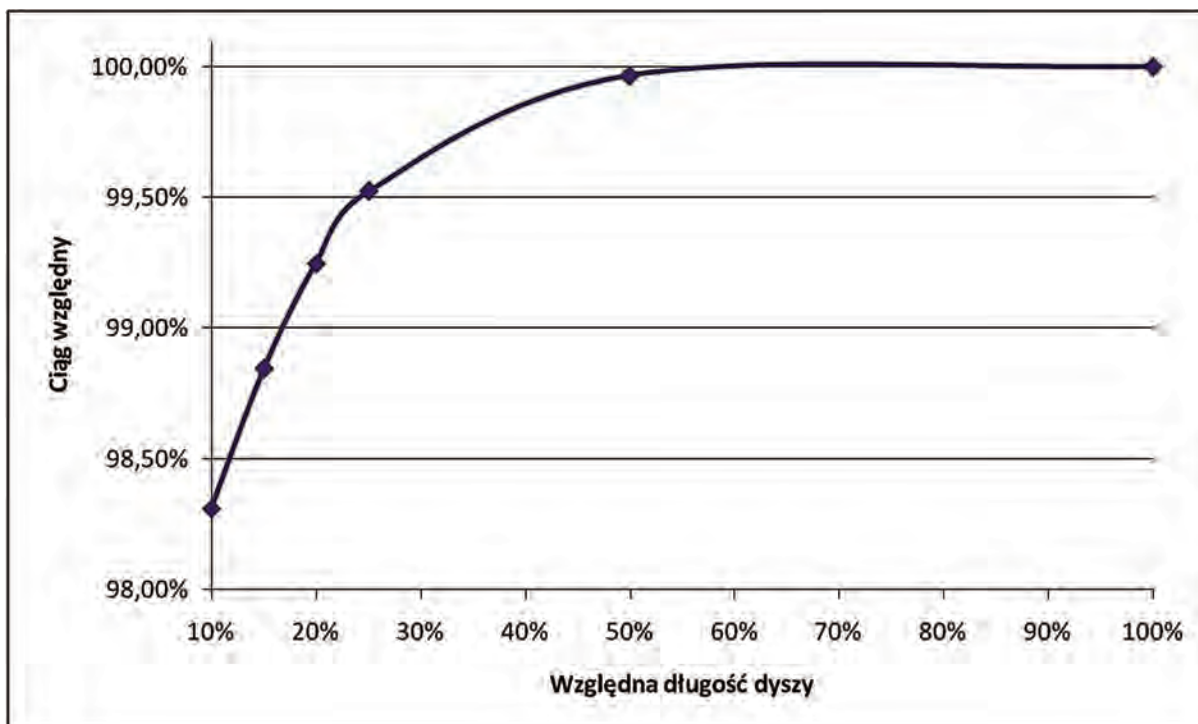
Rys. 1. Obraz pola liczby Macha w przepływie przez skrócone dysze aerospace o różnych długościach względnych

Celem opisywanego etapu obliczeń było oszacowanie wpływu skrócenia dyszy na wartość składowych siły ciągu wytwarzających się na konturze dyszy. W tabeli 1 zestawione zostały udziały siły ciągu generowanej na konturze dyszy oraz na powierzchni bazowej względem ciągu całkowitego dyszy o danej długości.

Tabela 1 Składowe siły ciągu dyszy aerospace o różnych długościach

Względna długość	100%	50%	25%	20%	15%	10%
	Udział w ciągu całkowitym dyszy:					
Siła na powierzchni bazowej	0,00%	-0,09%	-0,14%	-0,08%	0,12%	0,70%
Suma składowych konturowych ciągu	100,00%	100,09%	100,14%	100,08%	99,88%	99,30%

Na wykresie na rysunku 2 przedstawiono wartości ciągu dyszy skróconej względem dyszy o pełnej długości (100%).



Rys. 2. Wpływ skrócenia dyszy na spadek ciągu

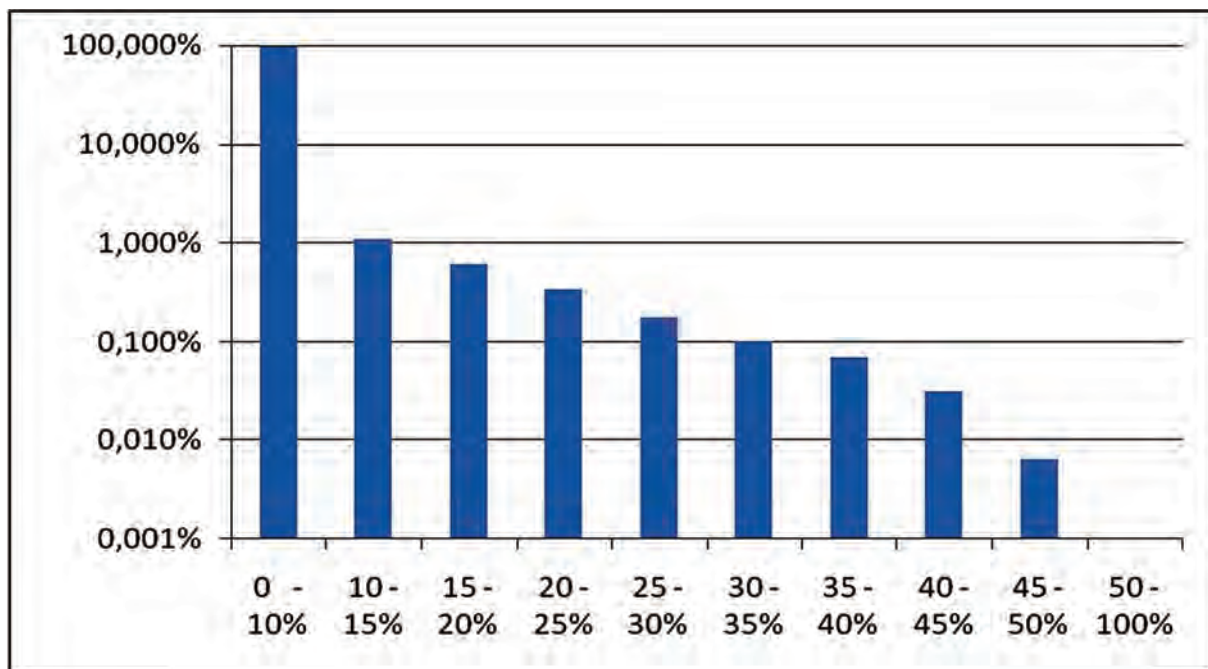
Do interesujących wniosków prowadzi analiza składowych ciągu generowanych na odcinkach konturu dysz o różnych długościach. Zestawienie takich danych przedstawione zostało w tabeli 2.

Tabela 2 Składowe ciągu konturowego generowane na odcinkach konturu

Względna długość	100%	50%	25%	20%	15%	10%
Odcinki konturu	Składowe konturowe ciągu					
0 - 10%	97,590%	97,588%	97,968%	98,302%	98,903%	100,000%
10 - 15%	1,091%	1,090%	1,095%	1,098%	1,097%	
15 - 20%	0,600%	0,600%	0,602%	0,600%		
20 - 25%	0,337%	0,337%	0,335%			
25 - 30%	0,177%	0,177%				
30 - 35%	0,101%	0,101%				
35 - 40%	0,070%	0,070%				
40 - 45%	0,031%	0,031%				
45 - 50%	0,006%	0,006%				
50 - 100%	-0,003%					

Z przedstawionych powyżej danych wynika, że składowe konturowe ciągu nie różnią się od siebie (lub różnią nieznacznie) na odpowiadających sobie odcinkach konturu dysz o różnych długościach skonstruowanych na tej samej krzywej. Dlatego, dla wszystkich powyższych przypadków można skonstruować wspólny wykres składowych ciągu konturowego wzdłuż dyszy (rysunek 3). Wynika z niego jednoznacznie, że ponad 99 % ciągu, wytworzonego na konturze, generowane jest na pierwszych 20% konturu dyszy aerospike pełnej długości. Zgodnie z wnioskiem wysnutym z danych w tabeli 2, składowe ciągu konturowego są identyczne (lub nieznacznie się różnią) bez względu na stopień jej skrócenia. Dlatego, ciąg wytworzony na konturze dyszy skróconej, o długości względnej 20% stanowi 99% ciągu generowanego na konturze dyszy aerospike pełnej długości.

Powyższe stwierdzenie zgadza się z informacjami zawartymi w literaturze [2]. Należy jednak podkreślić, że powyższe wnioski wysnute zostały na podstawie obliczeń dysz przy ciśnieniu otoczenia znacznie wyższym niż ciśnienie obliczeniowe, dla których zaprojektowany został kontur dyszy. W celu lepszego poznania wpływu obciążenia dyszy na ciąg należy przeprowadzić analizy dla innych ciśnień otoczenia (wysokości). Szczególnie interesujące są dane dla ciśnień otoczenia zbliżonych do ciśnienia obliczeniowego dyszy, oraz ciśnień w których zachodzi transformacja obszaru recyrkulacji.



Rys. 3. Składowe ciągu konturowego generowane na odcinkach konturu

WPLYW CIŚNIENIA OTOCZENIA NA OSIĄGI DYSZY SKRÓCONEJ

Drugim etapem analiz numerycznych była próba jakościowego odtworzenia, przy użyciu programu Fluent®, charakterystyki wysokościowej skróconej dyszy typu aerospike. Do analiz wybrano model dyszy o długości względnej 20%. Przeanalizowanych zostało 13 przypadków obliczeniowych – punktów charakterystyki wysokościowej.

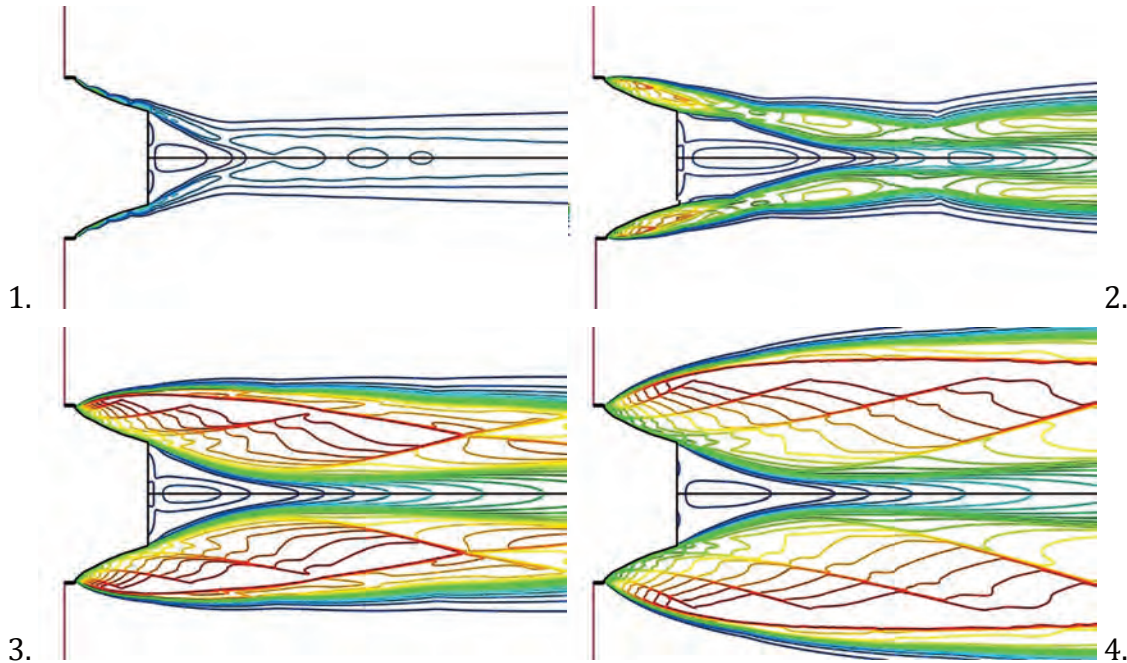
Na rysunku 4 przedstawione zostały wybrane wyniki obliczeń (kontury liczby Macha) badanej dyszy przy różnych ciśnieniach otoczenia:

1. $P_{amb} = 1,0000 \text{ bar}$; $h = 0 \text{ km}$; $P_C / P_{amb} = 20$
2. $P_{amb} = 0,0500 \text{ bar}$; $h = 20,6 \text{ km}$; $P_C / P_{amb} = 400$
3. $P_{amb} = 0,0082 \text{ bar}$; $h = 32,4 \text{ km}$; $P_C / P_{amb} = 2440$ – WARUNKI OBLICZENIOWE
4. $P_{amb} = 0,0025 \text{ bar}$; $h = 41,7 \text{ km}$; $P_C / P_{amb} = 8000$

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wykresy sporządzone na podstawie analiz numerycznych. Zgodnie z danymi zawartymi w literaturze w pewnym punkcie charakterystyki, poniżej punktu obliczeniowego dyszy pełnej długości, następuje nagłe załamanie charakterystyki wysokościowej[3]. Zjawisko to jest związane z transformacją obszaru recyrkulacji(z otwartego w zamknięty). Niestety, ze względu na zbyt małą rozdzielczość punktów charakterystyki niemożliwe było pełne, ilościowe ujęcie zjawiska.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wnioskuje się, że możliwe jest numeryczne uchwycenie zjawisk wpływających na przebieg charakterystyki wysokościowej. Dla lepszego poznania

mechanizmu transformacji obszaru recyrkulacji, oraz ilościowego opisu zjawisk tam zachodzących, potrzebne jest zwiększenie rozdzielczości punktów charakterystyki – przypadków obliczeniowych. Na rysunku 7 przedstawiony został wykres zmiany znormalizowanego ciśnienia na powierzchni bazowej w funkcji stosunku ciśnień P_C/P_{amb} . Przebieg tej zależności może być przewidziany teoretycznie [3].



Rys. 4. Dysza aerospike o długości względnej 20 % w różnych reżimach obliczeniowych

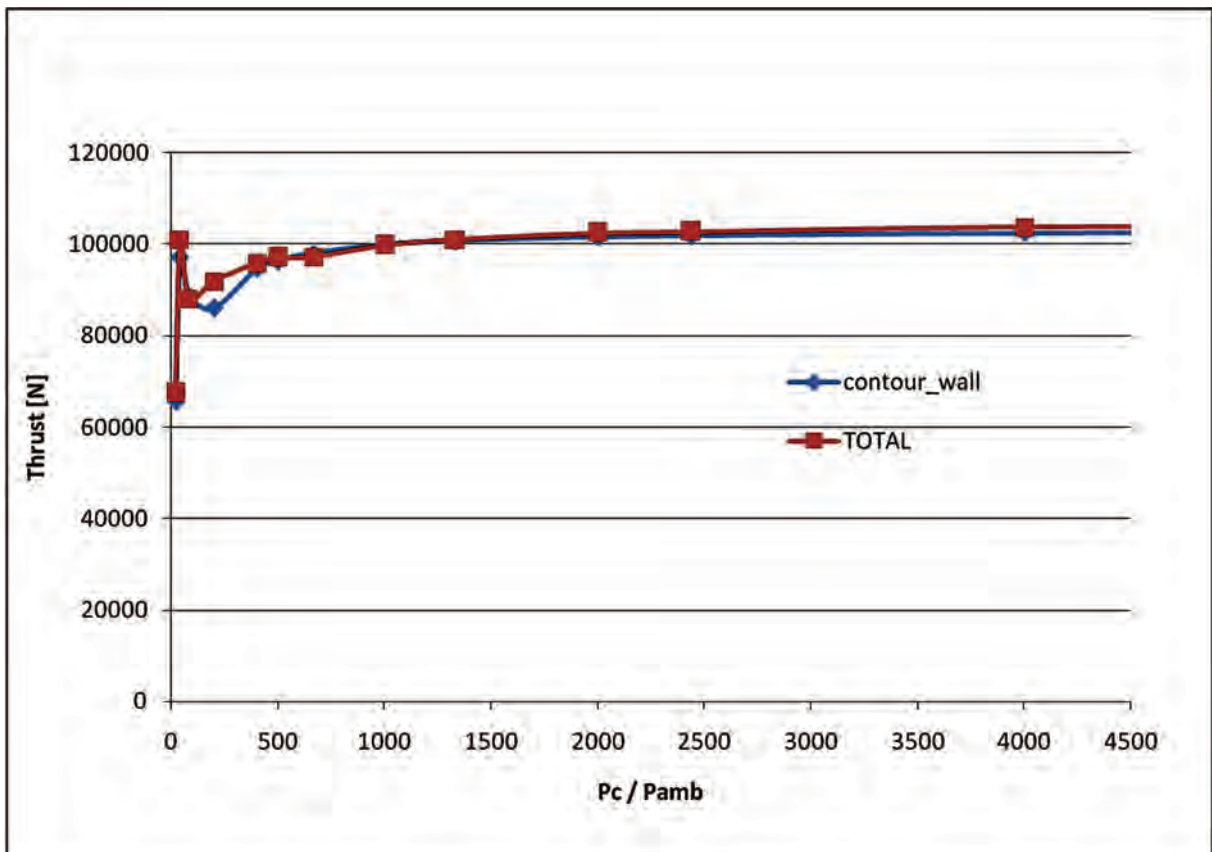
WNIOSKI

Wyniki analiz numerycznych wykonanych pakietem obliczeniowym FLUENT® przedstawione w artykule potwierdzają, że możliwe jest jakościowe odtworzenie zjawisk występujących przy wypływie z dyszy aerospike. Z przedstawionych doświadczeń numerycznych można wyciągnąć następujące wnioski:

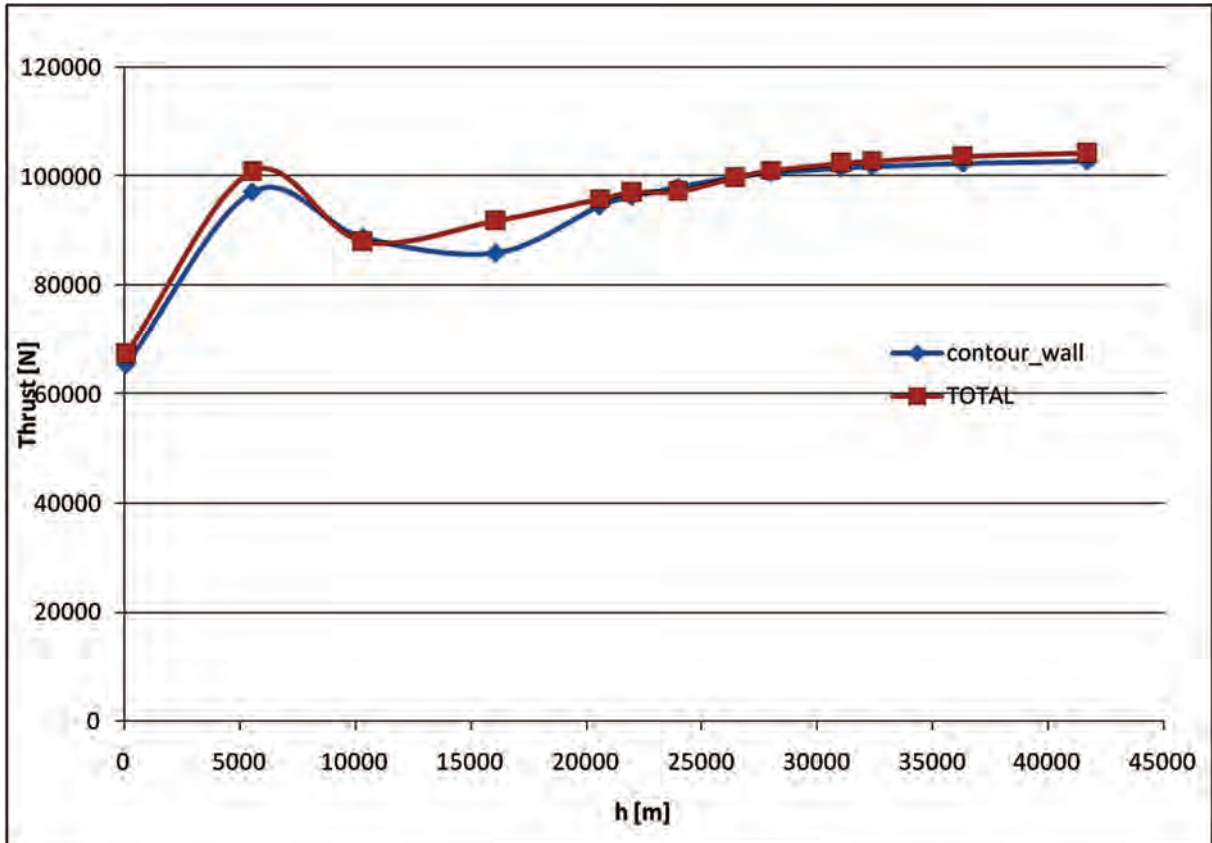
- składowe konturowe ciągu dyszy skróconej nie różnią się od składowych konturowych dyszy pełnej;
- ciąg dyszy skróconej różni się od ciągu dyszy pełnej o wartość ciągu generowanego przez odcięty fragment konturu dyszy oraz ciąg generowany na powierzchni bazowej;
- kluczowe z punktu widzenia osiągnięć dyszy jest rozpoznanie zjawiska transformacji obszaru recyrkulacji z „otwartego” w „zamknięty”;
- ciąg wytworzony na konturze dyszy skróconej, o długości względnej 20% stanowi 99% ciągu generowanego na konturze dyszy aerospike pełnej długości.

W celu uzyskania wyników ilościowych, w szczególności lepszego odwzorowania zjawiska transformacji obszaru recyrkulacji konieczne jest spełnienie następujących warunków:

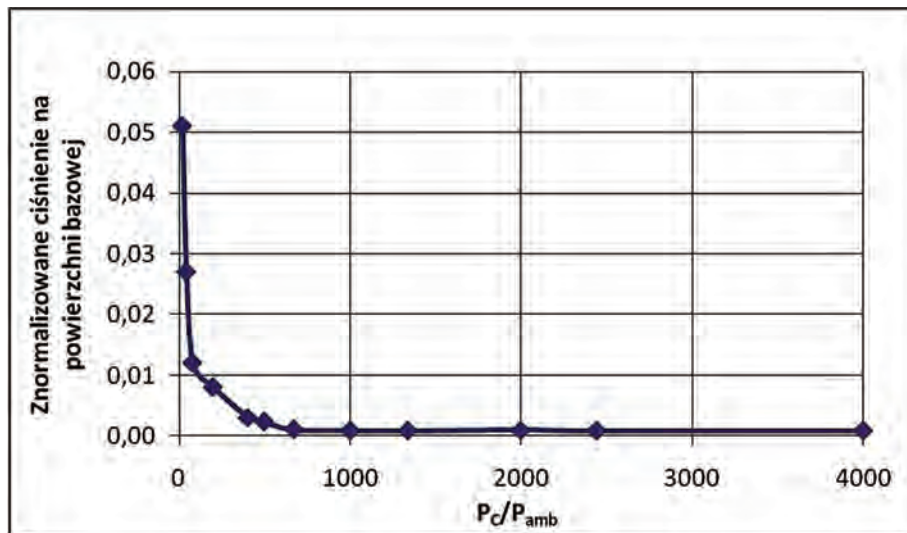
- geometria dyszy stworzona w oparciu o model gazu pół-idealnego ($C_p = f(T)$) - metoda charakterystyk lub metoda ekspansji Prandtla-Meyera;
- większa rozdzielczość (ilość) przypadków obliczeniowych przy różnych ciśnieniach otoczenia;
- porównanie uzyskanych wyników z jednym z dostępnych modeli transformacji obszaru recyrkulacji.



Rys. 5. Zależność ciągu silnika z dyszą aerospace od współczynnika ciśnień P_c/P_{amb}



Rys. 6. Charakterystyka wysokościowa silnika z dyszą aerospace



Rys. 7. Znormalizowane ciśnienie na powierzchni bazowej w funkcji stosunku ciśnień P_c/P_{amb}

BIBLIOGRAFIA

1. Angelino, G.: **Approximate Method for Plug Nozzle Design**. *AIAA Journal*, 1964, **2**: 1834-1835.
2. Hagemann, G.: **Advanced Rocked Nozzles**. *Journal of Propulsion and Power* 1998, **14**: 620-634.
3. Onofri, M.: **Plug Nozzles: Summary of Flow Features and Engine Performance**. 2002.

Michał Folusiak

COMPUTATIONS OF AEROSPIKE NOZZLE PERFORMANCE USING FLUENT

Summary

The purpose of the analyses presented in this paper was to investigate the capability of ANSYS Fluent® to analyze the performance and flow parameters of the aerospike engine. Despite the fact that the nozzle contour was approximated by the relative simple model, simulations' results allow to deduce some conclusions which will be helpful in further research.