

## ANALIZA WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW PRACY SILNIKA DWUPRZEPLYWOWEGO Z DWIEMA KOMORAMI SPALANIA

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań numerycznych porównujących efektywność pracy klasycznego silnika dwuprzepływowego oraz silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania. Na wstępie podano istotne informacje dotyczące konstrukcji silnika dwuprzepływowego z dodatkową komorą spalania usytuowaną pomiędzy turbiną wysokiego i niskiego ciśnienia i wynikające stąd korzyści eksploatacyjne silnika. Przedstawiono zasadnicze różnice w modelu silnika z dwiema komorami spalania oraz przeanalizowano ich wpływ na osiągi silnika. Wykonano symulacje komputerowe pracy silnika z dwiema komorami spalania i porównano je z wynikami dla klasycznego silnika dwuprzepływowego. Wskazano na istotne cechy silnika dwukomorowego, które są związane z doбором parametrów obiegu silnika. Wykazano, że w odróżnieniu od klasycznego silnika dwuprzepływowego można wyznaczyć spręż całkowity silnika, dla którego spełnione będzie jednocześnie kryterium osiągnięcia minimum jednostkowego zużycia paliwa i maksimum ciągu jednostkowego. W wyniku obliczeń parametrów eksploatacyjnych wyznaczono przebiegi podstawowych parametrów pracy silnika dla różnych warunków lotu i wskazano występowanie zakresów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, w których silnik z dwiema komorami spalania będzie rozwiązaniem korzystniejszym niż klasyczny silnik dwuprzepływowy. Na podstawie wykonanych analiz sformułowano wnioski dotyczące porównania cech eksploatacyjnych obydwu typów silników.

### WSTĘP

Silniki dwuprzepływowe są obecnie najczęściej stosowanymi zespołami napędowymi w lotnictwie komunikacyjnym i transportowym. Wynika to z ich niekwestionowanych zalet, jakimi są możliwość osiągania wysokich wartości ciągu przy jednoczesnym znacząco niższym jednostkowym zużyciem paliwa w porównaniu z innymi typami silników odrzutowych. Równocześnie silniki te cechują się niższymi wskaźnikami emisyjności zanieczyszczeń i hałasu w porównaniu z silnikami odrzutowymi [13]. Wynika to z samego rozwiązania konstrukcyjnego tego typu silników, gdzie znacząca ilość powietrza – w niektórych przypadkach dochodząca nawet do 80% - przepływa przez kanał zewnętrzny, w którym nie występuje proces spalania, a wylotowy strumień spalin z dyszy tego kanału osiąga znacznie niższe prędkości niż w przypadku silników odrzutowych z jedną wspólną dyszą wylotową. Jest to także efekt prac konstruktorów nad doskonaleniem procesów wewnętrznych zachodzących w silniku: nad doskonaleniem aerodynamiki przepływu (np. współczesne kształty łopat wentylatorów), przebiegu procesów cieplnych w komorach spalania w celu podniesienia sprawności i obniżenia emisyjności (np. nowoczesne dwustrefowe komory spalania w silnikach CFM-56, GEnx) i materiałów zdolnych pracować w wyższych temperaturach.

Wszystkie zabiegi zmierzające do poprawy funkcjonowania silników lotniczych wynikają z prognoz wskazujących znaczący wzrost ilości wykonywanych operacji lotniczych w najbliższych latach, a to przy braku działań zapobiegawczych będzie skutkowało zwiększeniem niekorzystnego oddziaływania na środowisko, a przez to na pogorszenie warunków życia, rozwój chorób cywilizacyjnych itp. Przeciwdziałając temu organy stanowiące prawo lotnicze wprowadzają coraz restrykcyjniejsze wymagania względem emisyjności nowowprowadzonych do eksploatacji silników lotniczych [1,4,8,13].

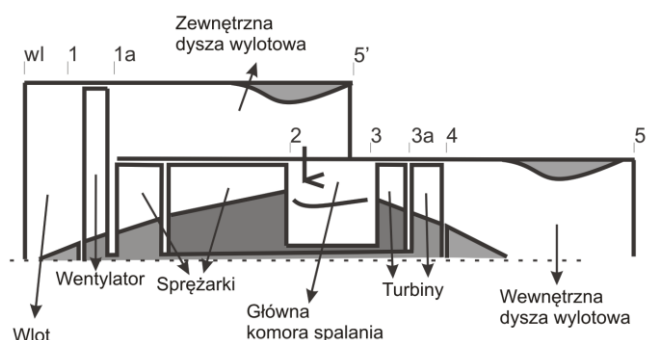
Analizy układów konstrukcyjnych silników odrzutowych odbiegających od współcześnie stosowanych rozwiązań wskazują na istotne korzyści związane z połączenia procesu spalania z procesem rozprężania spalin na turbinach silnika. W pracach

[5,9,10,11,12] wykonane zostały analizy, które wskazują na zbliżenie obiegu pracy tak zmodyfikowanego obiegu silnika do obiegu Carnota, który cechuje się najwyższą sprawnością spośród obiegów silnikowych. Równocześnie obniżenie najwyższej temperatury obiegu powinno skutkować znaczącą redukcją NOx emitowanych do atmosfery.

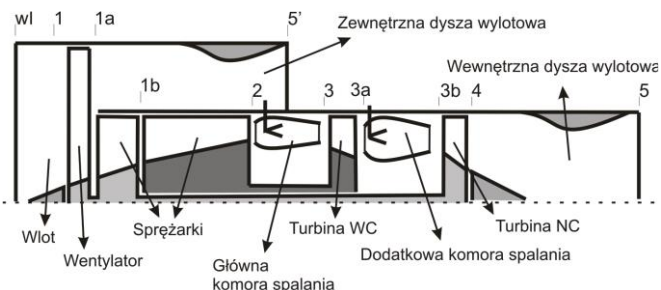
O ile mało prawdopodobnym wydaje się rozwiązanie silnika w którym turbina będzie zarazem komorą spalania, to pewnym rozwiązaniem pośrednim dającym zbliżone korzyści może być silnik z dodatkową komorą spalania (komorami spalania) pomiędzy turbinami. Dlatego w pracy zaprezentowano wyniki badań nad właściwościami silnika z dwiema komorami spalania w porównaniu z klasycznym silnikiem dwuprzepływowym.

### 1. SILNIK DWUPRZEPLYWOWY Z DWIEMA KOMORAMI SPALANIA – ANALIZA OBIEGU

Schemat przepływu klasycznego silnika dwuprzepływowego z zaznaczeniem podstawowych jego elementów przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku 2 zaprezentowano silnik dwuprzepływowy z dodatkową komorą spalania umieszczoną pomiędzy turbinami wysokiego i niskiego ciśnienia. Takie rozwiązanie konstrukcji silnika, prowadzi do tego, że osiągnięcie tych samych wskaźników użytkowych, a zasadniczo ciągu, jest możliwe przy znaczącym obniżeniu maksymalnej temperatury spalin obiegu silnika, co graficznie zilustrowano na rys. 3. Wynika to stąd, że energia niezbędna do zrealizowania pracy turbin oraz rozprężenia spalin wylotowych z wewnętrznej dyszy silnika dostarczana jest etapami. Dla porównania w klasycznym silniku dwuprzepływowym całość energii należy dostarczyć do silnika od razu w głównej komorze spalania, co powoduje, że maksymalna temperatura spalin obiegu współczesnych silników często przekracza 1800K [2,8,13,14].



Rys. 1. Schemat silnika dwuprzepływowego z oznaczeniem przekrojów kontrolnych



Rys. 2. Schemat silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania z oznaczeniem przekrojów kontrolnych

Analiza silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania wskazuje na możliwość istotnego obniżenia emisji NOx poprzez obniżenie temperatury obiegu w porównaniu z eksploatowanymi współcześnie silnikami dwuprzepływowymi [10,11,12]. Natomiast w pracy [5] wskazano na możliwość istotnego uproszczenia konstrukcji silnika z dwiema komorami spalania poprzez eliminację zaawansowanych systemów do chłodzenia turbin w wyniku obniżenia temperatury gazów wylotowych z komór spalania. Wskazano przy tym, że mniejsza ilość powietrza upuszczanego na cele chłodzenia powinna prowadzić do poprawy efektywności pracy takiego silnika poprzez wykorzystanie całej ilości przepływającego przez silnik strumienia gazu do wytworzenia mocy turbiny, a brak zaburzeń od mieszania się chłodzącego powietrza z głównym strumieniem gazów w turbinie powinien skutkować zwiększeniem jej sprawności.

## 2. MODEL NUMERYCZNY SILNIKA Z DWIEMA KOMORAMI SPALANIA

Zasadniczo modele obydwu analizowanych typów silników są bardzo zbliżone z tą różnicą, że w modelu numerycznym silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania ciepło dostarczane do silnika wyznacza się jako sumę ciepła dostarczonego w głównej i dodatkowej komorze spalania:

$$Q_t = Q_B + Q_{IT} \quad (1)$$

gdzie  $Q_t$  – sumaryczna ilość ciepła dostarczonego do silnika,  $Q_B$  – ciepło dostarczone w głównej komorze spalania silnika,  $Q_{IT}$  – ciepło dostarczone w dodatkowej komorze spalania pomiędzy turbinami. Ciepło dostarczone w każdej z komór spalania musi spełniać zależność:

$$Q = m_f W_u \eta_B = m C_p (T_{B2} - T_{B1}) \quad (2)$$

gdzie  $m_f$  – masa paliwa (strumień masowy paliwa),  $W_u$  – wartość opałowa paliwa,  $\eta_B$  – sprawność cieplna procesu spalania,  $m$  – wydatek masowy gazu na wlocie do komory spalania,  $C_p$  – umowne ciepło właściwe dla procesu spalania,  $T_{B1}$ ,  $T_{B2}$  – temperatura gazu odpowiednio na wlocie i wylocie z komory spalania.

Spełnienie zal. 1 wiąże się z tym że całkowita masa paliwa dostarczona do silnika jest wyrażona jako:

$$\sum m_f = m_{f_B} + m_{f_{IT}} \quad (3)$$

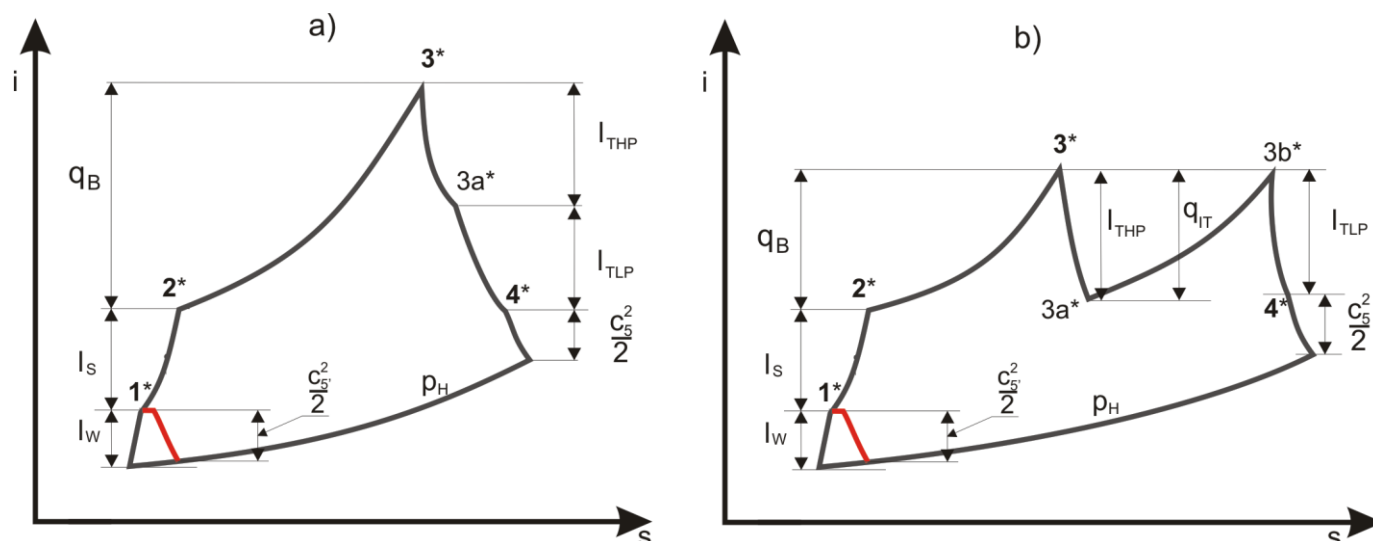
gdzie:  $\sum m_f$  – sumaryczne zużycie paliwa,  $m_{f_B}$  - zużycie paliwa w głównej komorze spalania,  $m_{f_{IT}}$  - zużycie paliwa w komorze spalania pomiędzy turbinami.

Osiągi silnika wyznacza się wg zależności podobnie jak dla silnika dwuprzepływowego. Ciąg silnika przedstawia zależność:

$$K = m_5 c_5 + m_{5'} c_{5'} - (m_5 + m_{5'}) V \quad (4)$$

Przy czym  $m_5 c_5$  – oznacza iloczyn strumienia masy gazu i jego prędkości w przekroju wylotowym dyszy wewnętrznej silnika, a  $m_{5'} c_{5'}$  – dla dyszy zewnętrznej silnika,  $mV$  – jest iloczynem masy powietrza wlotowego do silnika i prędkości lotu.

Wskaźniki jednostkowe tj. ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycie paliwa przedstawiają zależności:



Rys. 3. Wykres obiegu silnika dwuprzepływowego z oddzielnymi dyszami wylotowymi w układzie entalpia entropia (i-s) a) silnik klasyczny, b) silnik z dwiema komorami spalania

$$k_j = \frac{\frac{m_5}{m_1} c_5 + \alpha c_{5'} - (1 + \alpha)V}{1 + \alpha} \quad (5)$$

$$c_j = \frac{\sum m_f}{K} = \frac{\frac{\sum m_f}{m_1}}{(1 + \alpha)k_j} \quad (6)$$

gdzie:  $k_j$  – ciąg jednostkowy,  $c_j$  – jednostkowe zużycie paliwa,  $\alpha$  – stopień dwuprzepływowości,  $m_1$  – wydatek masowy powietrza na wlocie do kanału wewnętrznego,  $\sum m_f$  – sumaryczne zużycie paliwa w obydwu komorach spalania.

Prezentowane zależności uzupełniono klasycznymi równaniami wykorzystywanymi w opisie parametrów wewnętrznych w silniku dwuprzepływowym posłużyły do zbudowania modelu obliczeniowego w środowisku MATLAB. Wykorzystano przy tym powszechnie przyjmowane na etapie tworzenia modelu 1D założenia upraszczające dla silnika turbinowego dotyczące modelowania przepływu w silniku (patrz [4,5,6,7,9]). W klasycznym silniku dwuprzepływowym uwzględniono chłodzenie turbiny wysokiego ciśnienia, gdzie ilość czynnika upuszczanego na chłodzenie turbiny wyznaczono wg zależności podanych w pracy [14], a model pracy turbiny chłodzonej zrealizowano wg zależności podanych w pracy [5].

W analizie dla porównania obydwu rozpatrywanych konstrukcji, przyjęto, że wskaźniki efektywności pracy poszczególnych zespołów silnika za wyjątkiem turbin są na takim samym poziomie. Dla turbin w silniku z dwiema komorami spalania założono wzrost sprawności o 2% dla turbiny wysokiego ciśnienia i 1% dla turbiny niskiego ciśnienia. W silniku tym potraktowano, że ilość powietrza upuszczana ze sprężarki na chłodzenie części gorących silnika jest na tyle mała, że ją pominięto. W klasycznym silniku założono, że temperatura gazów przed turbiną wysokiego ciśnienia wynosi 1750 K, oraz uwzględniono występowanie chłodzenia wewnętrznego turbiny wysokiego ciśnienia. W silniku z dwiema komorami spalania założono, że temperatura gazów na wylocie z obydwu komór spalania jest na tym samym poziomie i wynosi 1300 K, jednakże w niektórych obliczeniach rozszerzono zakres badań także na przypadki różnych wartości temperatury gazów na wylocie z obydwu komór spalania.

Dla obydwu silników przyjęto stopień dwuprzepływowości  $\alpha=6$ , spręż wentylatora  $\pi_w=1,6$  oraz spręż sprężarki niskiego ciśnienia (napędzanej przez turbinę wentylatora)  $\pi_{SNC}=1,5$ ,

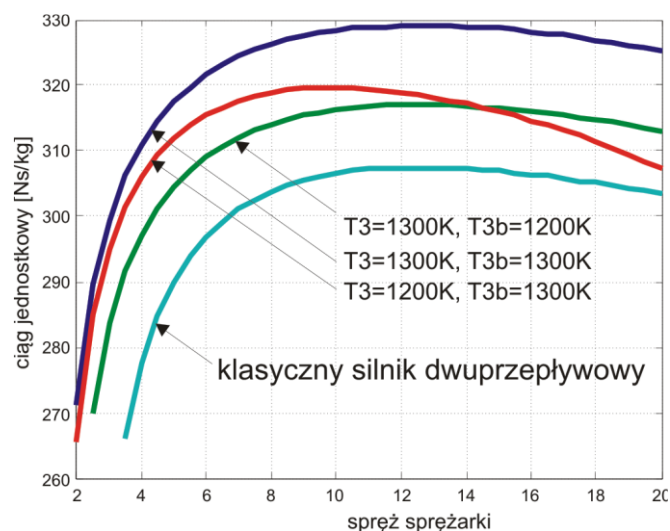
### 3. WYNIKI OBLICZEŃ OSIĄGÓW SILNIKA

Realizację badań podzielono na dwa etapy. W pierwszym wykonano obliczenia w celu doboru parametrów roboczych silnika z dwiema komorami spalania. Wykonano analizę parametrów jednostkowych silnika od sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia w wyniku czego dokonano doboru wartości sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia. W drugim etapie wyznaczono charakterystyki prędkościowo wysokościowe dla silnika z dwiema komorami spalania i klasycznego silnika dwuprzepływowego.

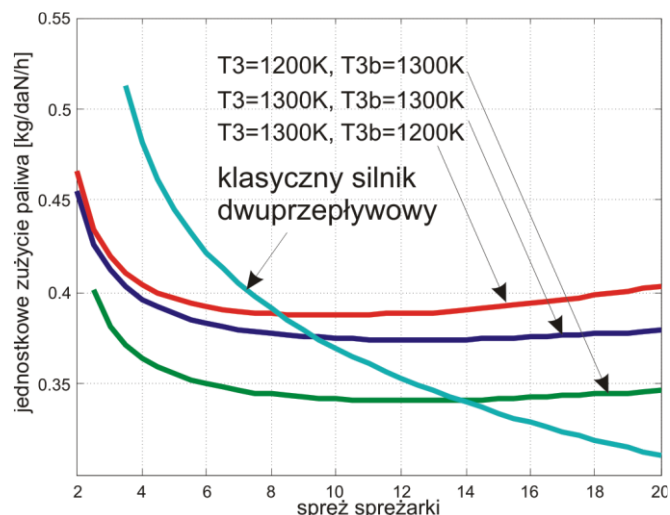
#### 3.1. Optymalizacja obiegu i dobór parametrów obliczeniowych silnika z dwiema komorami spalania

Wykonano obliczenia mające na celu optymalizację obiegu silnika. W wyniku tego dążono do ustalenia parametrów korzystnych z punktu widzenia eksploatacji silnika. Założono w tej analizie, że stopień dwuprzepływowości i spręż wentylatora w realizowanych obliczeniach są stałe. Natomiast spręż kanału wewnętrznego silnika z dwiema komorami spalania jest parametrem dobieranym.

Wyniki obliczeń zależności ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa od sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania przedstawiono na rys. 4 i 5. Obliczenia zrealizowano dla trzech przypadków pracy silnika: gdy temperatury spalin na wylocie z obydwu komór spalania są równe i wynoszą 1300 K, gdy w temperaturze spalin na wylocie z głównej komory spalania jest 1300 K a na wylocie z komory spalania pomiędzy turbinami wynosi 1200 K oraz gdy na wylocie z głównej komory spalania temperatura spalin wynosi 1200 K, a na wylocie z dodatkowej komory spalania 1300 K. Uzupełniono to wynikami symulacji dla klasycznego silnika dwuprzepływowego o temperaturze gazów przed turbiną 1750 K.



Rys. 4. Zależność ciągu od sprężu sprężarki dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania i klasycznego silnika dwuprzepływowego,  $T_3$  – temperatura spalin na wylocie z głównej komory spalania,  $T_{3b}$  – temperatura na wylocie z komory spalania pomiędzy turbinami



Rys. 5. Zależność jednostkowego zużycia paliwa od sprężu sprężarki dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania i klasycznego silnika dwuprzepływowego,  $T_3$  – temperatura spalin na wylocie z głównej komory spalania,  $T_{3b}$  – temperatura na wylocie z komory spalania pomiędzy turbinami

Wyniki symulacji dla silnika z dwiema komorami spalania pokazują, że poprzez optymalizację obiegu można tak dobrać spręż silnika, aby jednocześnie ciąg jednostkowy był na najwyższym poziomie i jednostkowe zużycie paliwa było najniższe. W klasycz-



nym silniku dwuprzepływowym nie można dobrać sprężu silnika aby spełnić te obydwa warunki łącznie i przy doborze stopnia sprężania należy poszukiwać rozwiązania kompromisowego. W analizowanych silnikach z dwiema komorami spalania sprężę sprężarki wysokiego ciśnienia przy których uzyskano optymalne parametry pracy silnika wahają się w przedziale 9- 13 w zależności od temperatur gazów na wylocie z komór spalania. W porównaniu do badanego klasycznego silnika dwuprzepływowego jest to w okolicy sprężu optymalnego tego silnika, ale znacznie mniej niż wynosi spręż ekonomiczny tego silnika (w prezentowanym przedziale sprężu nie osiągnięto minimum jednostkowego zużycia paliwa dla tego silnika).

Na podstawie analizy wyników prezentowanych na rys. 4-5 dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania ze względu na jednostkowe zużycie paliwa najkorzystniej prezentuje się silnik o temperaturze spalin na wylocie z głównej komory spalania 1300 K i z dodatkowej komory spalania 1200K. Dla tego silnika przy sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia wynoszącym 12 (spręż całkowity silnika 29) oszacowano jednostkowe zużycie paliwa na poziomie 0.341 kg/daN/h i ciąg jednostkowy równy 315 N\*s/kg. Dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania przy równej temperaturze spalin na wylocie z obydwu komór spalania wynoszącej 1300 K stopień sprężania sprężarki wysokiego ciśnienia dobrano na poziomie 13 (spręż całkowity 31). Ciąg jednostkowy tego silnika oszacowano na 329 N\*s/kg i jest to najwyższa wartość osiągnięta dla badanych silników, a jednostkowe zużycie paliwa na 0,374 kg/daN/h. Przy tym stopniu sprężania (spręż całkowity 31) dla klasycznego silnika dwuprzepływowego ciąg jednostkowy oszacowano na poziomie 307 N\*s/kg, a jednostkowe zużycie paliwa 0,349 kg/daN/h. Porównanie ciągu jednostkowego silników z dwiema komorami spalania i silnika klasycznego w analizowanym zakresie sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia wskazuje, że silnik z dwiema komorami spalania prezentuje się korzystniej. W niektórych przypadkach ciąg jednostkowy silnika z dwiema komorami spalania jest nawet o 10% większy niż dla klasycznego silnika.

### 3.2. Porównanie charakterystyk eksploatacyjnych silnika dwuprzepływowego z jedną i dwiema komorami spalania

Charakterystyki prędkościowo-wysokościowych wyznaczono dla klasycznego silnika dwuprzepływowego i silnika z dwiema komorami spalania o równej temperaturze gazów na wylocie z obydwu komór spalania wynoszącej 1300 K i sprężu sprężarki wysokiego ciśnienia 13. Na podstawie prac [4,13] w obliczeniach przyjęto założenia, że dla jednego stanu prędkości obrotowej silnika spręż na poszczególnych zespołach jest stały. Także jako stałe założono wartości sprawności procesów przepływowo-ciepłnych w silniku, a wartości temperatury gazów na wylocie z głównej i dodatkowej komory spalania silników są wyrażane w zależności od prędkości i wysokości lotu jako:

$$T_3(M_a, H) = T_{3\_obl} \frac{T_{1b}(M_a, H)}{T_{1b\_obl}} \quad (7)$$

$$T_{3b}(M_a, H) = T_{3b\_obl} \frac{T_{Ht}(M_a, H)}{288} \quad (8)$$

dzie:  $T_3(M_a, H)$  – temperatura spiętrzenia gazów na wylocie z komory spalania dla różnych prędkości  $Ma$  i wysokości lotu  $H$ ,  $T_{3b}(M_a, H)$  – temperatura spiętrzenia gazów na wylocie z dodatkowej komory spalania dla różnych prędkości  $Ma$  i wysokości lotu  $H$ ,  $T_{3\_obl}$  – temperatura gazów na wylocie z komory spalania w warunkach obliczeniowych,  $T_{Ht}(M_a, H)$  – temperatura spiętrzenia gazów wlotowych do silnika, którą wyznacza się z zależności:

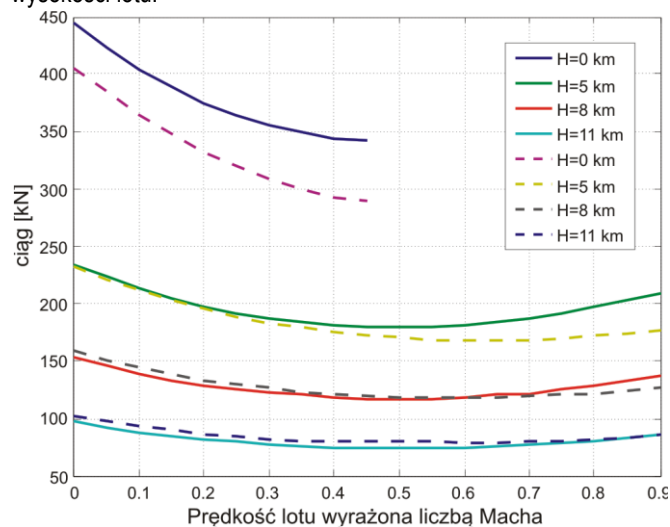
$$T_{Ht}(M_a, H) = T_H(H) \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right) \quad (9)$$

Wydatek masowy powietrza przepływającego przez silnik na podstawie zależności zredukowanych wyraża się:

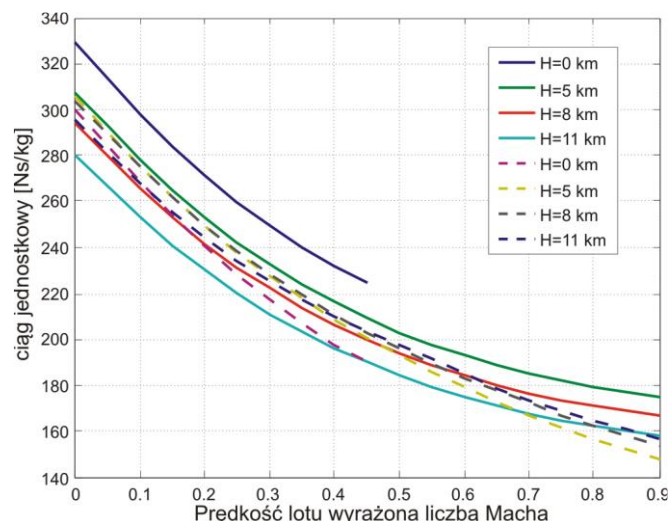
$$m \frac{\sqrt{T_{Ht}(M_a, H)}}{p_{Ht}(M_a, H)} = m_{obl} \left( \frac{\sqrt{288}}{101325} \right) \quad (10)$$

gdzie  $p_{Ht}(Ma, H)$  – ciśnienie całkowite we wlocie silnika od wysokości  $H$  i prędkości lotu  $Ma$ ,  $m_{obl}$  – wartość wydatku masowego obliczonego dla wysokości  $H=0$  i przy prędkości  $Ma=0$ .

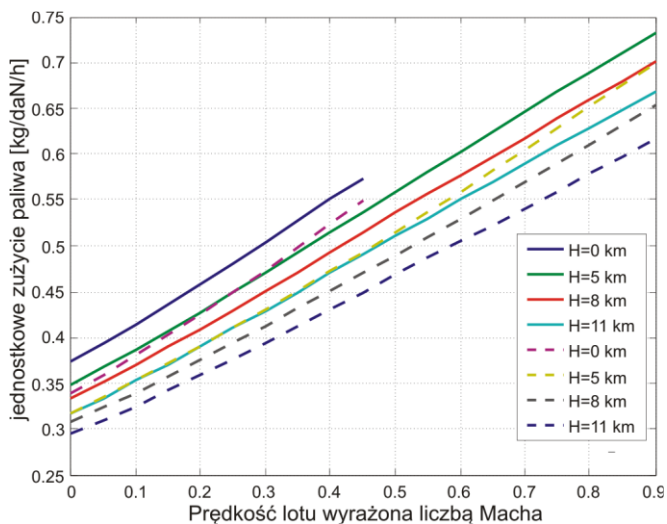
Wyniki obliczeń zaprezentowano na rys. 6-9, gdzie przedstawiono kolejno zależności ciągu, ciągu jednostkowego, jednostkowego zużycia paliwa i sekundowego zużycia paliwa od prędkości i wysokości lotu.



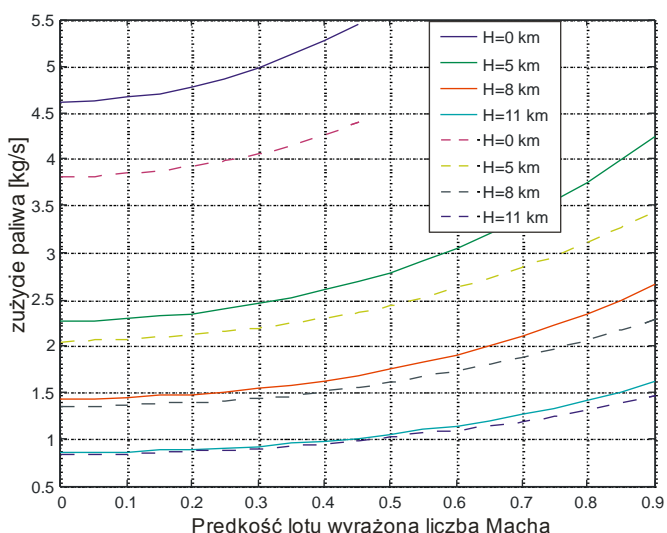
Rys. 5. Ciąg silnika od prędkości lotu wyrażonej liczbą Macha i dla różnych wysokości  $H$ , linie ciągłe dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania, linie przerywane dla klasycznego silnika dwuprzepływowego.



Rys. 5. Ciąg jednostkowy silnika od prędkości lotu wyrażonej liczbą Macha i dla różnych wysokości  $H$ , linie ciągłe dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania, linie przerywane dla klasycznego silnika dwuprzepływowego.



**Rys. 7.** Jednostkowe zużycie paliwa od prędkości lotu wyrażonej liczbą Macha i dla różnych wysokości  $H$ , linie ciągłe dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania, linie przerywane dla klasycznego silnika dwuprzepływowego.



**Rys. 8.** Zużycie paliwa od prędkości lotu wyrażonej liczbą Macha i dla różnych wysokości  $H$ , linie ciągłe dla silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania, linie przerywane dla klasycznego silnika dwuprzepływowego przed turbiną wynoszących

Analizując kolejno prezentowane wyniki należy stwierdzić, że badany silnik z dwiema komorami spalania cechuje się korzystniejszym ciągiem na wysokości  $H=0$  km od silnika klasycznego. Ze wzrostem wysokości charakterystyki ciągu w funkcji prędkości lotu dla obydwu silników osiągają zbliżone wartości

Ciąg jednostkowy w funkcji wysokości lotu silnika z dwiema komorami spalania maleje, zaś silnika klasycznego wzrasta przy tej samej prędkości lotu. Odmienne zachowanie tego parametru dla klasycznego silnika jest efektem założonego modelu chłodzenia turbin, gdzie przyjęto, że ze wzrostem temperatury gazów przed turbiną wzrasta ilość powietrza upuszczanego do chłodzenia. Zaś na podstawie zal. 7 temperatura gazów przed turbiną wzrasta, gdy różnie temperatura otoczenia, a ta jak wiadomo wzrasta na niższych wysokościach.

Zmiana ciągu jednostkowego z prędkością lotu wykazuje podobny przebieg – maleje dla obydwu analizowanych silników. Można stwierdzić, że wartości ciągu jednostkowego dla obydwu badanych silników nie różnią się istotnie.

Jednostkowe zużycie paliwa w całym zakresie badanych prędkości i wysokości lotu korzystniej prezentuje się dla klasycznego silnika dwuprzepływowego. W tym wypadku aby uzyskać korzystniejsze wyniki dla silnika dwukomorowego należało by zmodyfikować temperaturę na wylocie z komory spania pomiędzy turbinami – np. obniżyć ją, jak to pokazano we wcześniejszych symulacjach.

Analiza zużycia paliwa dla porównywanych silników wskazuje, że przy małych wysokościach lotu korzystniej prezentują się charakterystyki dla klasycznego silnika dwuprzepływowego, ale ze wzrostem wysokości charakterystyki zużycia paliwa dla obydwu silników wyrównują się.

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono porównanie wyników badań numerycznych silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania z wynikami dla klasycznego silnika dwuprzepływowego. Wskazano na pozytywną cechę silników z dwiema komorami spalania pozwalającą dobrać parametry robocze silnika tak, aby spełnić wymagania dotyczące maksimum ciągu jednostkowego i minimum jednostkowego zużycia paliwa. Wskazano, że nawet znaczące obniżenie maksymalnej temperatury obiegu (do 1300K) silnika z dwiema komorami umożliwiła uzyskanie wyższych ciągów jednostkowych od współczesnych silników dwuprzepływowych, a przy odpowiednim doborze temperatury gazów na wylocie z komór spalania można uzyskać niższe jednostkowe zużycie paliwa.

Zaprezentowano charakterystyki prędkościowo-wysokościowe klasycznego silnika dwuprzepływowego oraz silnika dwuprzepływowego z dwiema komorami spalania. Porównano wyniki wskazując że o ile występują różnice w wynikach dla zerowej wysokości, to na wysokościach przelotowych ( $h=11$  km) dla badanych silników uzyskano zbliżone wyniki. Wskazuje to, że silnik z dwiema komorami spalania ze względu na wspomniane w pracy cechy konstrukcyjne i wynikające stąd korzyści w postaci obniżenia emisyjności  $NO_x$  i uproszczenie konstrukcji turbin może zapewniać porównywalne osiągi do współcześnie eksploatowanych silników dwuprzepływowych i w perspektywie czasu może stać się dla nich rozwiązaniem alternatywnym.

## BIBLIOGRAFIA

1. Daggett, D., Hadaller, O., Hendricks, R., Walther, R.: *Alternative Fuels and their Potential Impact on Aviation*, ICAS 2006-5.8.2, 25th ICAS Congress, 2006.
2. Horlock, J. H., Watson, D. T., Jones, T. V., *Limitations on Gas Turbine Performance Imposed by Large Turbine Cooling Flow*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 123, pp. 487-494, July 2001.
3. Jakubowski R., *Analysis of turbofan engine design modification to add inter-turbine combustor*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 22 No.3, p. 75-82, 2015.
4. Jakubowski R., *Evaluation of performance properties of two combustor turbofan engine*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2015; 17 (4): p. 575–581.
5. Jakubowski R., *Modeling and analysis of jet engine with cooling turbine*, Journal of KONES, Vol 19, No. 2, p. 235-243, 2012.
6. Jakubowski R., Modelowanie osiągnięć silników turbinowych w środowisku MATLAB z wykorzystaniem modeli bloków funkcjonalnych, Technika transportu szynowego nr 12/2015, str. 691-696.
7. Jakubowski R., *Two-combustor turbofan engine performance analysis*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Euro-

- pean Science Society of Powertrain and Transport Publication, Vol. 21 No 3 s. 141-148, 2014.
8. Lefebvre, A. H., Gas Turbine Combustion, 3<sup>th</sup> ed., Taylor and Francis Group, LLC. 2010.
  9. Liew K. H., Urip E., Yang S. L., *Parametric Cycle Analysis of a Turbofan with Interstage Turbine Burner*, Journal of Propulsion and Power, Vol. 21, No.3, May-June 2005.
  10. Liew, K. H., Urip, E., Yang, S. L., Mattingly, J. D., Marek, C. J., *Performance Cycle Analysis of a Two-spool Separate-exhaust Turbofan with Interstage Turbine Burner*, Journal of Propulsion and Power, Vol. 22, No.2, pp. 411-416, March-April 2006.
  11. Liu, F. and Sirignano, W.A., *Turbojet and Turbofan Engine Performance Increases Through Turbine Burners*, Journal of Propulsion and Power, Vol 17, No. 3, pp. 695-705, May-June 2001.
  12. Sirignano, W.A., and Liu, F., *Performance Increases for Gas-Turbine Engines Through Combustion Inside the Turbine*, Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, No. 1, pp 111-118, January-February 1999.
  13. Walsh, P. P., and Fletcher, P., *Gas Turbine Performance*, 2nd ed., Blackwell Publishing and ASME, Fairfield, NJ, pp. 227 and 282, 2004.
  14. Young, J. B., and Wilcock, R. C., *Modeling the Air-Cooled Gas Turbine: Part 1 - General Thermodynamics*, Journal of Turbomachinery, Vol. 124, No. 2, pp. 207-213, April 2002.

## ANALYSIS OF CHOSEN WORK PARAMETERS OF TWO- COMBUSTOR TURBOFAN ENGINE

### *Abstract*

*The results of numerical investigation of performance of the classical turbofan engine and a two-combustor turbofan are presented in the paper. The basic information of the two-combustor turbofan are presented in the beginning. The differences in the model of two-combustor turbofan engine vs. classical turbofan were presented and their influence on engine performance was discussed. The numerical simulation of compared engine performance was done. By this way it was presented that it was possible to establish two-combustor engine parameters that specific thrust is maximum and specific fuel consumption is minimum. This is impossible to fulfillment for classical turbofan engine. The simulation of engine performance vs. altitude and flight velocity was done. By this way it was demonstrated that two-combustor turbofan engine performance are close to performance of classical turbofan and that there are some flight condition, for with two-combustor engine could be better than classical turbofan.*

Autorzy:

dr. inż. **Robert Jakubowski** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Samolotów i Silników Lotniczych, [robert.jakubowski@prz.edu.pl](mailto:robert.jakubowski@prz.edu.pl)

mgr inż. **Michał Kuźniar** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Samolotów i Silników Lotniczych