

TURBINOWY SILNIK ODRZUTOWY JAKO ŹRÓDŁO ZAGROZEŃ EKOLOGICZNYCH

PAWEŁ GŁOWACKI*, STEFAN SZCZECIŃSKI**

Urząd Lotnictwa Cywilnego*, Instytut Lotnictwa**

Streszczenie

W artykule przedstawiono najważniejsze mechanizmy powstawania toksycznych składników spalin w komorach spalania turbinowych silników odrzutowych. Ogólnie opisano jakie parametry pracy silnika i komory spalania powodują wzrost intensywności tworzenia się tlenków azotu (NOx), sadzy, niespalonych węglowodorów (NHC), tlenku węgla (CO) i dwutlenku węgla (CO2), a jakie ograniczają możliwości ich powstawania. Zasygnalizowano również jakie problemy czekają inżynierów silnikowców w przyszłości, związane z koniecznością wymuszania przez odpowiednie regulatory znacznej redukcji emisji toksycznych składników spalin.

Słowa kluczowe: turbinowy silnik odrzutowy, komora spalania, spaliny, toksyczne składniki spalin, ochrona środowiska.

WSTĘP

Prowadząc rozważania dotyczące lotniczych silników turbinowych często (szczególnie w opracowaniach popularno – naukowych) traktuje się je jako kombinację” turbina – sprężarka”, uznając układ spalania mieszaniny paliwowo- powietrznej marginalnie i poświęcając mu o wiele mniej uwagi niż na to zasługuje.

Osiągi i sprawność silników zależą w równej mierze od efektywności pracy wszystkich elementów konstrukcyjnych silnika.

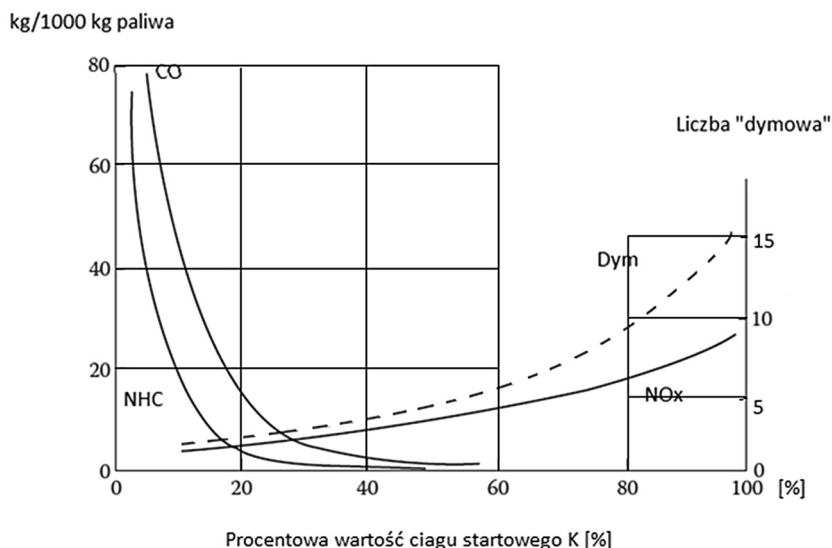
Od początku prac nad powstaniem silnika odrzutowego wymagania dotyczące działania komór spalania pozostają niezmiennie:

- Wysoka efektywność przekształcania energii chemicznej paliwa w entalpię produktów spalania
- Minimalny spadek ciśnienia
- Jak najmniejsze pole przekroju poprzecznego
- Konstrukcja lekka, trwała i niekosztowna
- Stabilna praca na całym zakresie prędkości obrotowych silnika oraz prędkości i wysokości lotu bez możliwości zgaśnięcia
- Łatwość rozruchu silnika zarówno na ziemi jak w powietrzu
- Spalanie całkowite w celu uniknięcia odkładania się (depozytu) węgla
- Wysoka podatność obsługiwa

I do tego obecnie:

- Minimalizacja emisji NCH,CO,CO₂,NO_x,sadzy,SO_x,NMVOCs¹ na wszystkich zakresach pracy silnika i warunkach lotu
- Redukcja hałasu emitowanego podczas procesu spalania i pracy silnika jako całości
- Możliwość stosowania wielu rodzajów paliwa

Formowanie się szkodliwych składników spalin jest związane z temperaturą, czasem i historią koncentracji procesu spalania. Charakterystyczne, że koncentracja powstawania tlenku węgla (CO) i niespalonych węglowodorów (NHC) jest najwyższa dla niskich zakresów pracy silnika i zanika w funkcji wzrostu ciągu silnika. Odwrotne zjawisko dotyczy tlenków azotu (NO_x) i dymu, których obecność w spalinach na zakresach małych wartości ciągu jest niezauważalna a znacznie rośnie wraz ze wzrostem ciągu silnika. Powyższe zależności ilościowe przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wielkość emisji dla silników turbinowych w zależności od ciągu silnika

Gas turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions third edition
Arthur H. Lefebvre and Dilip R. Ballal © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC
CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business

1. PRZYCZYNY POWODUJĄCE TWORZENIE SIĘ SZKODLIWYCH SKŁADNIKÓW SPALIN

1.1. Czynniki sprzyjające powstawaniu tlenku węgla (CO)

W czasie pracy silnika gdy w strefie zapłonu wytworzona jest tzw. bogata mieszanina paliwowo- powietrzna tworzy się wiele tlenku węgla (CO) ze względu na brak wystarczającej ilości tlenu potrzebnej do reakcji chemicznej zapewniającej tworzenie się dwutlenku węgla (CO₂). Nawet jednak przy reakcji stechiometrycznej czy mieszaninie umiarkowanie ubogiej będzie również występowała duża ilość CO ze względu na dysocjację CO₂.

W praktyce emisja CO jest znacznie wyższa niż ta wynikająca z równań równowagi.

¹Non Methane Volatile Organic Compounds – niemetanowe lotne związki organiczne. Zaliczamy do nich np. benzen, etanol, aceton

Podstawowymi czynnikami wpływającymi na wydajność spalania a tym samym emisję CO są: temperatura na wlocie do silnika i komory spalania, ciśnienie w komorze spalania, współczynnik nadmiaru powietrza w strefie pierwotnej i średni rozmiar kropli w mieszaninie paliwowo-powietrznej. Empirycznie dowiedziono, że emisja CO zanika przy wartości 0.8 współczynnika nadmiaru powietrza, po czym następuje duży gradient wzrostu jego emisji wraz ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza.

Wzrost ciśnienia w komorze spalania znacznie redukuje emisję CO. Przy małych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza wzrost ciśnienia w komorze spalania o 50% powoduje dwukrotne zmniejszenie produkcji tlenku węgla. Jeżeli występują wysokie wartości tego współczynnika wzrost ciśnienia spalania zahamowuje dysocjację CO₂ a tym samym emisję CO.

Niespalone węglowodory to praktycznie paliwo opuszczające komorę spalania jako krople lub pary. Czynniki wpływające na wielkość emisji są praktycznie takie same jak te dla tlenku węgla.

1.2. Czynniki sprzyjające powstawaniu tlenków azotu (NO_x)

Większość tlenku azotu (NO) powstałego w procesie spalania utlenia się do dwutlenku azotu (NO₂) i dla tej przyczyny podaje się sumaryczną emisję tych związków jako NO_x.

Tworzą się one poprzez cztery różne mechanizmy:

- Termiczny
- Utlenianie azotu
- Tzw. natychmiastowy (szybki) NO_x
- Pochodzący z paliwa

Badania potwierdzają fakt, że ciśnienie w komorze spalania szczególnie dla wstępnie mieszanych, ubogich mieszanek ma minimalny wpływ na tworzenie się związków NO_x. Dla bogatych mieszanek ilość emitowanego NO_x zwiększa się proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z wartości ciśnienia. Zwiększa się też wraz ze wzrostem wymiaru średniej kropli dla małych wartości współczynników nadmiaru powietrza, natomiast dla mieszanek bogatych wymiar kropli nie wpływa na emisję NO_x.

2. LOTNICTWO, A ZANIECZYSZCZANIE ATMOSFERY

Obecnie wprowadzane są ostre można by stwierdzić, że wręcz restrykcyjne normy dotyczące czystości spalin w lotnictwie.

Przemysł lotniczy musi rozwiązać w najbliższych latach problemy związane zarówno z czystością spalin jak i redukcją zużycia paliwa w celu ochrony środowiska, a głównie zatrzymania efektu cieplarnianego.

Wpływ na środowisko spowodowany ruchem lotniczym staje się ważnym elementem analiz naukowców zajmujących się naszą atmosferą. Silniki lotnicze emitują produkty spalania w bardzo ważnej jej warstwie zwanej tropopauzą. Znaczny wzrost przewozów, tym samym zwiększenie emisji gazów może być składnikiem czynników powodujących pewien brak równowagi klimatycznej Ziemi spowodowany szczególnie tworzeniem się ozonu (O₃) w tropopauzie.

Dodatkowo ozon tworzy się tylko w pobliżu korytarzy powietrznych, więc wpływ lotnictwa na wzrost temperatury półkuli północnej będzie większy niż południowej.

Zgodnie z najnowszymi badaniami ocenia się, że wpływ ilości ozonu (O₃) na wzrost temperatury powierzchni Ziemi jest czterokrotnie większy niż dwutlenku węgla (CO₂) – dokładnie 82% pochodzi od ozonu.

Należy zwrócić również uwagę na fakt, że dotychczasowe wymagania i normy dotyczące szkodliwych emisji określone są dla terenu położonego wokół lotnisk i uwzględniają tzw. samolotowy cykl startu i lądowania.

Należytej uwagi nie poświęcono zakresowi przelotowemu a przecież emisja gazów wylotowych silników stanowiących napęd samolotów w co najmniej w 80% dotyczy tej właśnie fazy lotu. Wprowadzenie do eksploatacji komór spalania o obniżonej emisji szkodliwych substancji tzw. LEC (Low Emission Combustor) w przestrzeni około lotniskowej zredukowało emisję NOx o około 50% lecz spowodowało też jej wzrost do nawet 100% na zakresie przelotowym. Można stwierdzić, że rozwiązanie problemu emisji NOx samolotu na zakresie przelotowym jest cztery razy ważniejsze niż CO2 i co szczególnie ważne:

„przelotowa emisja NOx staje się o wiele bardziej palącym problemem do rozwiązania niż ta na małych wysokościach”.

3. KOMORY SPALANIA

Konwencjonalne komory spalania i procesy w nich zachodzące są dobrze rozpoznane przez konstruktorów i technologów i stanowią większość wśród obecnie będących w eksploatacji. Zmiany w ich konstrukcji prowadzące do redukcji emisji trujących gazów w spalinach dokonały się dzięki badaniom na tej właśnie grupie komór spalania.

Głównymi czynnikami wpływającymi na emisje szkodliwych składników są:

- temperatura i współczynnik nadmiaru powietrza w strefie pierwotnego strumienia w komorze
- stopień ujednorodnienia procesu spalania w tej strefie
- charakterystyki chłodzenia ścian osłony rury ogniowej
- charakterystyki rozpylania paliwa

Obecność CO i NHC w spalinach spowodowana jest procesem niecałkowitego spalania. Należy więc poprawić sprawność procesu spalania poprzez taką redystrybucję strumienia powietrza by osiągnąć w strefie pierwotnej wartości współczynnika nadmiaru powietrza bliskie 0.8.

Dobre ujednorodnienie mieszaniny paliwowo- powietrznej w strefie pierwotnej redukuje emisję CO i NHC i nawet gdy współczynnik nadmiaru powietrza jest optymalny to nieprawidłowe wymieszanie paliwa z powietrzem spowoduje powstanie stref „ubogiej mieszanki” i w konsekwencji niecałkowite spalanie lub stref „bogatej mieszanki” gdzie niewystarczająca ilość tlenu nie pozwoli na reakcję zamiany CO w CO2.

Kolejnym źródłem redukcji ilości CO i NHC jest ograniczenie objętości chłodzącego powietrza w obrębie osłony rury ogniowej zwłaszcza w strefie dopływu pierwotnego strumienia powietrza.

We współczesnych komorach spalania występuje ciśnienie powyżej 3.5 MPa, osiągana jest sprawność 99% i minimalna objętość powietrza chłodzącego osłonę ściany rury ogniowej. Efekty te uzyskano dzięki zastosowaniu nowych materiałów i specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych umożliwiających chłodzenie efuzyjne i transpiracyjne osłony ściany rury ogniowej. Dzięki tym rozwiązaniom doprowadzono do tego, że emisja CO i NHC jest praktycznie jednocyfrowa dla najnowszych silników lotniczych i zredukowana niemal do zera dla stacjonarnych silników turbinowych.

Występowanie dymu w spalinach zależne jest od temperatury na wlocie do komory spalania, ciśnienia i charakterystyki rozpylania paliwa. Wpływ temperatury wlotowej jest dwojaki gdyż jej wzrost jednocześnie przyspiesza tworzenie jak i spalanie sadzy. Bilans jest jednak na korzyść redukcji dymu. Tworzeniu się dymu sprzyja również wysokie ciśnienie w komorze spalania.

Eliminacja powstawania dymu następuje wtedy gdy stworzone są warunki uniemożliwiające tworzenie się stref bogatej mieszanki w płomieniu.

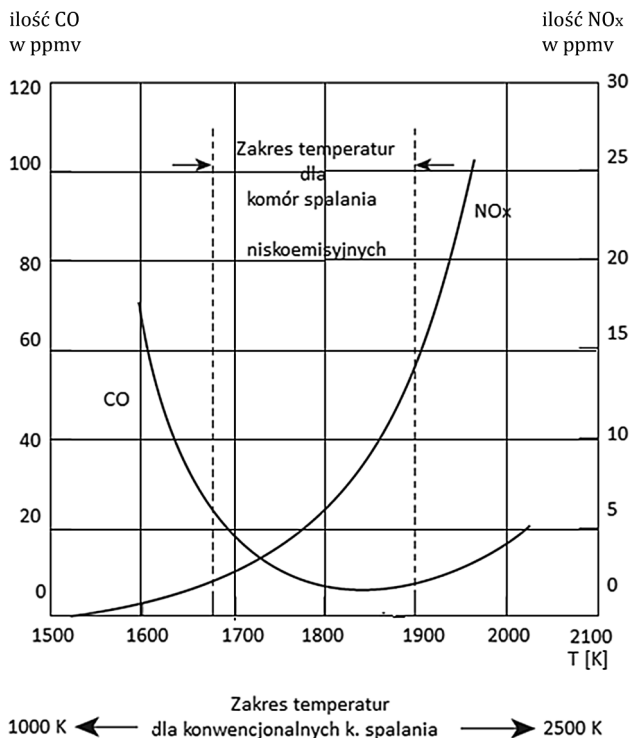
Dodatkowa ilość powietrza w strefie pierwotnej również powoduje redukcję dymu, pamiętać należy przy tym, że zwiększa się wtedy emisja CO i NHC na zakresach biegu jałowego pracy silnika.

Wstępne mieszanie paliwa już w samym wtryskiwaczu jest też przyczyną redukcji emisji dymu.

Tworzenie się tlenków azotu (NOx) zależne jest wykładniczo od temperatury spalania.

Oczywisty jest więc fakt, że obniżenie temperatury w strefie spalania spowoduje ograniczenie emisji NOx. Efekt ten można uzyskać np. poprzez doprowadzanie dodatkowego powietrza w strefę spalania. Należy jednak rozważyć to stosować z rozmysłem ponieważ powoduje to wzrost prędkości przepływu w strefie pierwotnej co ma negatywny wpływ na zapłon i stabilność płomienia.

Redukcja emisji trujących gazów rozwiązana być może głównie poprzez optymalizację temperatury spalania. Zależnie od zakresu pracy silnika zawiera się ona w przedziale od 1000 K do 2500 K. Powstawanie CO ma miejsce przy temperaturach niższych od 1700 K podczas gdy formowanie się NOx występuje w temperaturach wyższych od 1900 K. Optymalna więc temperatura procesu spalania zawiera się w bardzo wąskim zakresie 1700K- 1900 K a niskoemisyjne komory spalania muszą ten przedział temperatur utrzymywać na całym zakresie pracy silnika, co obrazują wykresy na rys. 2.



Rys. 2. Wpływ temperatury w strefie pierwotnej na tworzenie się CO i NOx

PODSUMOWANIE

Wydaje się, że w przyszłości redukcja trujących składników gazów wylotowych będzie rozwiązana poprzez zastosowanie komór spalania tzw. LPP (lean, premixing, prevaporizing) co określa komorę spalania z ubogą mieszaniną paliwowo-powietrzną ze wstępnym mieszaniem i wstępnym odparowaniem. Wydzielić w niej można trzy przestrzenie. Pierwsza wtrysku paliwa, parowania paliwa i mieszania powietrza z paliwem i jego parami. Druga stabilizacji płomienia i zakończenia procesu spalania. Trzecia to strefa mieszania spalin z powietrzem wtórnym.

Charakterystyczny dla tych komór jest brak emisji sadzy, gdyż redukuje się ilość ciepła wypromieniowanego do osłony ściany rury ogniowej co prowadzi do obniżenia ilości potrzebnego powietrza chłodzącego a tym samym więcej go można użyć do ograniczania temperatury w strefie spalania. Kolejną zaletą LPP jest to, że w płomieniu o temperaturze nie przewyższającej 1900 K ilość produkowanego NOx nie rośnie wraz ze wzrostem czasu spalania co znaczy, że można go wydłużyć redukując tym samym emisję CO i NHC.

Wadą tych komór jest niebezpieczeństwo samozapłonu i powstania drgań prowadzących do rezonansu.

W najbliższym jednak czasie rozwiązaniem redukującym emisje toksyn najprawdopodobniej będzie zastosowanie fazowych komór spalania z wieloma wariacjami konstrukcyjnymi jak np. zastosowanie wtryskiwaczy paliwowych skonstruowanych i stosowanych już przez GE tzw. TAPS (Twin Annular Premixing Swirler), podwójny pierścieniowy zawirowywacz ze wstępnym mieszaniem. W dalszej przyszłości dopiero, wymienione tu komory spalania LPP mogą uzyskać dalszą poprawę już uzyskiwanych osiągnięć przy sprężach silników sięgających wartości 60.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal, Gas turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions third edition © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business
- [2] Hukam Mongia and Willard Dodds, Low Emissions Propulsion Engine Combustor Technology Evolution, Past, Present and Future, GE Aircraft Engines, Cincinnati, Ohio, U.S.A.
- [3] Ryszard Łapucha, Komory spalania silników turbinowo-odrzutowych procesy, obliczenia, badania, Warszawa 2004, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa
- [4] Włodzimierz Balicki (praca zbiorowa), Lotnicze silniki turbinowe konstrukcja-eksploatacja-diagnostyka część I, Warszawa 2010, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa
- [5] G. Geoffrey Smith, Gas Turbines and Jet Propulsion for Aircraft, fourth edition, August 1946, Flight Publishing Co. Ltd.
- [6] D. E. Gray, STUDY OF TURBOFAN ENGINES DESIGNED FOR LOW ENERGY CONSUMPTION, NASA Lewis Research Center, Contract NAS3-19132
- [7] Philip Gliebe, Will Dodds, Practical Technology Solutions for Future Aircraft Engine Noise and Emissions Reduction, AIAA/AAAF Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium, May 24-26, 2005 Monterey, California