

URZĄD LOTNICTWA CYWILNEGO
Departament Techniki Lotniczej
Wydział Ochrony Środowiska

Opracowanie:

Smugi kondensacyjne (ang. contrails) pochodzące z cywilnych statków powietrznych o napędzie odrzutowym.

Wstęp

Poniższe opracowanie Urzędu Lotnictwa Cywilnego powstało w wyniku zapotrzebowania w związku z rosnącym zainteresowaniem społecznym problematyką występowania smug kondensacyjnych.

W ostatniej dekadzie jesteśmy świadkami znaczącego wzrostu popularności transportu lotniczego. Dynamicznie rośnie liczba osób wybierających samolot jako środek transportu. W latach 2004 - 2012 liczba obsługiwanych pasażerów w polskich portach lotniczych zwiększyła się ponad trzykrotnie, co z kolei przełożyło się na istotny wzrost liczby wykonywanych operacji lotniczych w polskiej przestrzeni powietrznej.

W związku z powyższym obserwujemy częstsze pojawianie się na niebie trwałych smug kondensacyjnych pochodzących ze statków powietrznych o napędzie odrzutowym.

Przyczyny powstawania smug

Istotnym jest, że zarówno przebieg procesu powstawania smug kondensacyjnych jak i ich wygląd zależą od warunków meteorologicznych. Przy określonej temperaturze i wilgotności względnej powietrza na wysokości lotu statku powietrznego może w ogóle nie dochodzić do powstania smug kondensacyjnych albo mogą one zniknąć w krótkim czasie od momentu utworzenia. W innych specyficznych uwarunkowaniach takich jak wysoka wilgotność względna powietrza na wysokości lotu statku powietrznego, smugi będą szczególnie dobrze widoczne i mogą ulec przekształceniu w chmury piętra wysokiego zwane także chmurami pierzastymi (łac. *cirrus*). Dzieje się tak dlatego, że trwałe linearne smugi kondensacyjne (ang. CONDensational TRAILS – contrails) są w zasadzie chmurami złożonymi z kryształków lodu powstałych w procesie kondensacji pary wodnej. W konsekwencji zastosowania paliw węglowodorowych w lotnictwie, głównymi produktami spalania paliwa lotniczego jest para wodna i dwutlenek węgla.

Prof. Dr U. Schumann¹ [5], [2013 r.] precyzuje, iż „warunkiem koniecznym do utworzenia smug kondensacyjnych jest dostatecznie niski poziom temperatury, określanej terminem proggu temperaturowego Schidt’a - Appleman’a, który dla produktów spalania nafty lotniczej mieści

¹ Prof. Dr Ulrich Schumann jest pracownikiem naukowym instytutu DLR. W latach 1982-2012 był dyrektorem jednostki tegoż instytutu w Oberpfaffenhofen, k. Monachium. W latach 1969-1982 pracował naukowo w Centrum Naukowym w Karlsruhe. Na przełomie lat 1974/1975 prowadził zaawansowane prace naukowo-badawcze w Narodowym Centrum Badań Atmosferycznych, położonym w miejscowości Boulder, w Stanie Colorado, w USA. Profesor Dr Ulrich Schumann prowadził badania naukowe ukierunkowane na kilka obszarów w obrębie fizyki atmosfery i jest autorem 150 publikacji naukowych oraz szeregu książek i raportów. Koordynował szereg narodowych jak i ogólnoeuropejskich lotniczych projektów badawczych, dotyczących emisji substancji ze statków powietrznych, chmur typu cirrus, wyładowań atmosferycznych, zagadnień klimatycznych i środowiskowych.

się w przedziale temperatur od -35°C do -55°C zależnie od poziomu wilgotności powietrza otaczającego zmieniającego się z wysokością”. Zatem gdy powietrze atmosferyczne ma temperaturę niższą od temperatury progu Schidt’a - Appleman’a dla danego poziomu wilgotności względnej powietrza, para wodna emitowana przez silniki samolotu kondensuje na jądrach kondensacji, którymi są cząstki stałe przypadkowo obecne w powietrzu lub cząstki sadzy w strudze gazów spalinowych wypływających z napędów lotniczych tworząc chmurę drobnych kropelek wody. Z powodu niskiej temperatury otoczenia, owe kropelki tworzące chmurę po pewnym czasie zamarzają stając się kryształkami lodu. Gdy powietrze w otoczeniu smugi kondensacyjnej jest suche to lodowe cząsteczki tworzące smugę ulegają sublimacji (tj. bezpośredniemu odparowaniu z pominięciem przejścia w fazę ciekłą) i smuga kondensacyjna szybko zanika. Wszakże gdy mamy do czynienia z przypadkiem odwrotnym, czyli dużym poziomem wilgotności względnej powietrza otaczającego smugę kondensacyjną (powyżej poziomu wilgotności potrzebnego do pozostawiania kryształów lodu i pary wodnej we wzajemnej równowadze ilościowej), drobinki uformowane z kryształów lodu zaczynają rosnać z uwagi na proces adsorpcji pary wodnej na ściankach kryształów, czyli proces odwrotny do sublimacji (tzw. resublimacja) i wtedy smugi kondensacyjne mogą utrzymywać się przez wiele godzin. W sprzyjających warunkach możliwy jest dalszy rozwój chmur typu cirrus zachodzący na jądrach kondensacji jakimi są kryształki lodu w smugach kondensacyjnych pozostawionych przez statki powietrzne w stratosferze gdzie temperatura utrzymuje się na poziomie -55 stopni Celsjusza, i taki przypadek jest zjawiskiem dobrze znanym. Smugi kondensacyjne powstają na dość znacznej wysokości z reguły powyżej 6 tys metrów ponad ziemią najczęściej pomiędzy 7 - 10 tys. metrów. Trwałe smugi kondensacyjne mogą utrzymywać się w przestrzeni od szeregu minut do wielu godzin po ich utworzeniu w wyniku przelotu statku powietrznego, co wymaga wysokiej wilgotności powietrza w otoczeniu lecącego samolotu i temperatury obniżonej do -40 stopni Celsjusza.

Według badań prowadzonych przez Prof. Dr U. Schumann [5], [idem] w instytucie DLR² „związek pokrywy chmur pierzastych z natężeniem ruchu lotniczego może być opisany tzw. modelem odpowiedzi liniowej. Na podstawie uzyskanych danych oraz wyników modelowania oszacowano udział chmur cirrus pochodzenia lotniczego na około 1-2% przy typowym czasie rozwoju chmur pierzastych 2-4 godzin od czasu zainicjowania takiego procesu smugą kondensacyjną”. Stwierdzono, iż z jednej strony smugi kondensacyjne prowadzą do wzmocnienia efektu cieplarnianego w atmosferze globalnej ogrzewając ziemię poprzez odbicie części promieniowania podczerwonego emitowanego z powierzchni ziemi ku przestrzeni kosmicznej z powrotem w kierunku powierzchni planety. Z drugiej strony, smugi kondensacyjne również zwiększają albedo ziemi i w ten sposób nie dopuszczają do ogrzania planety przyczyniając się do odbicia promieni słonecznych przez kryształki lodu działające jak mikro-pryzmaty zanim promieniowanie dotrze do powierzchni globu. Rozwiązanie zagadnienia polegającego na określeniu, który z efektów będzie miał znaczenie dominujące, zależy od czasu, położenia smugi kondensacyjnej w przestrzeni oraz pogody.

Wpływ zjawiska na środowisko

Ten sam autor [idem] zwraca uwagę na fakt, iż „(...) warunki sprzyjające formowaniu się smug kondensacyjnych wykazują silną zmienność wraz ze współrzędnymi określającymi położenie w przestrzeni. Warstwy wilgotnego powietrza, w obrębie których dochodzi do powstawania trwałych smug kondensacyjnych, są raczej cienkie, często ich grubość nie przekracza 600 m. Stąd tworzeniu smug kondensacyjnych łatwo zapobiec poprzez zmianę pułapu przelotowego o jeden poziom lotu względem pułapu planowanego pierwotnie. Wpływ

² DLR – Deutschen Zentrums für Luft – und Raumfahrt (tłumaczenie własne: Niemieckie Centrum Lotnictwa i Astronautyki).

smug kondensacyjnych zależy silnie od podłoża. Smugi ogrzewają lub chłodzą silniej w warunkach braku zachmurzenia niż podczas występowania pokrywy chmur. Dlatego często korekta trasy przelotu polegająca na jej niewielkim równoległym przesunięciu silnie redukuje wpływ lotnictwa na klimat” – objaśnia Profesor U. Schumann.

W świetle obecnie prowadzonych badań naukowych, ochładzający wpływ smug kondensacyjnych jest najsilniejszy wczesnym rankiem i podczas późnych godzin popołudniowych, natomiast smugi kondensacyjne tworzące się przed zachodem słońca mogą dotrzeć do pory nocnej i wtedy będą wykazywać efekt grzewczy. W dalszej kolejności smugi kondensacyjne utworzone przed wschodem słońca mogą wykazywać efekt ochładzający we wczesnych godzinach rannych. Dlatego w opinii Prof. Dr U. Schumann [5], [idem] „klimatyczna optymalizacja tras przelotowych powinna uwzględniać uwarunkowania wynikające z pory doby”.

Kolejny krok instytutu DLR w kierunku łagodzenia wpływu smug kondensacyjnych na klimat, polegał na opracowaniu narzędzia do przewidywania zachmurzenia piętra wysokiego (cirrus) indukowanego aktywnością lotniczą. Stworzono zatem oprogramowanie, które wykorzystując dane synoptyczne pozwala na przewidywanie stopnia pokrycia nieba smugami kondensacyjnymi oraz umożliwia szacowanie efektów klimatycznych generowanych przez pojedyncze smugi na indywidualnych trasach przelotowych statków powietrznych. Opisane narzędzie, według relacji Profesora U. Schumanna może zostać sprzęgnięte z tradycyjnie stosowanym oprogramowaniem do optymalizacji tras przelotowych w funkcji temperatury i wiatru w celu znalezienia tras, które będą bliskie idealnym warunkom minimalizacji kosztu i zużycia paliwa a jednocześnie zapewnią minimalizację efektu cieplarnianego.

Objaśnienie procesów spalania w lotniczych napędach turbinowych – informacje podstawowe.

Emisje z lotniczych napędów odrzutowych mają charakterystykę zbliżoną do emisji z samochodowych silników diesla z tym, że paliwo we współczesnych napędach odrzutowych jest spalane dużo dokładniej a emitowane spaliny są wprowadzane do środowiska po uprzednim zmieszaniu z czystym powietrzem, które następnie ulegają dalszemu rozcieńczeniu zanim dotrą do powierzchni ziemi. Oczywiście reguła ta ma zastosowanie z wyłączeniem lotnisk i ich najbliższego otoczenia, gdzie ich stężenie jest mierzalne i według szeregu oszacowań nie różni się istotnie od tła wielkomiejskiego ACI EUROPE, [2010], [6].

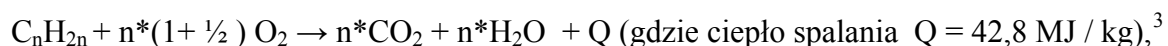
W celu dokładniejszego wyjaśnienia zjawiska powstawania smug kondensacyjnych koniecznym jest uprzednie objaśnienie dlaczego para wodna i dwutlenek węgla są zasadniczymi produktami spalania węglowodorów i dlaczego tworzą zasadniczą masę smugi kondensacyjnej.

Najbardziej rozpowszechnionym paliwem do lotniczych napędów odrzutowych jest nafta lotnicza złożona z cząsteczek różnych węglowodorów, stąd dogodnie jest przyjąć do opisu procesu jej spalania molekułę zastępczą, ale wiernie odwzorowującą jej chemiczne właściwości.

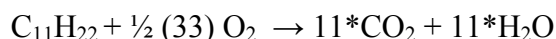
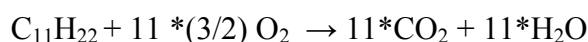
Nafta lotnicza zgodna ze specyfikacją Jet A, na podstawie analizy 167 zidentyfikowanych związków chemicznych, może zostać opisana uśrednionym wzorem zastępczym w postaci: $C_{10,84}H_{19,65}$.

Natomiast po uwzględnieniu tak zwanych związków niezidentyfikowanych zawierających około 10 atomów węgla w cząsteczce - zastępcza cząsteczka węglowodoru zgodna z uśrednionym składem paliwa Jet A została opisana wzorem $C_{11}H_{22}$ odpowiadając zatem

szeregowi homologicznemu alkenów związków o wzorze ogólnym C_nH_{2n} . W znacznym uproszczeniu, w przypadku zupełnego utlenienia węglowodorów w tym szeregu homologicznym zachodzi następująca reakcja:



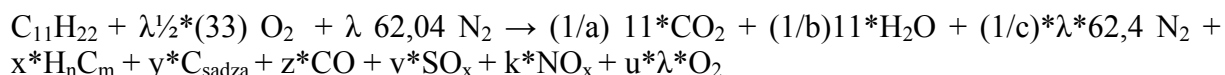
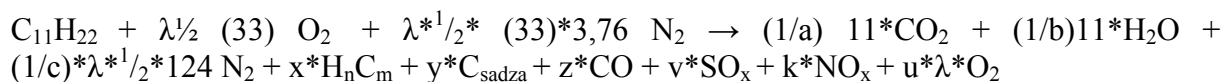
oraz gdy $n=11$



Czyli z jednej spalanej cząsteczki nafty lotniczej powstaje jedenaście cząsteczek dwutlenku węgla i jedenaście cząsteczek pary wodnej oraz odpowiednia ilość ciepła.

Widzimy zatem, że w uproszczeniu z jednej cząsteczki zastępczej o „n” atomach węgla (ekwiwalentnej dla nafty lotniczej) powstaje „n” cząsteczek dwutlenku węgla i taka sama ilość czyli „n” cząsteczek pary wodnej, która będzie kondensować tym szybciej im niższa jest temperatura otoczenia i im większe jest nasycenie parą wodną środowiska, w którym zachodzi opisywana emisja.

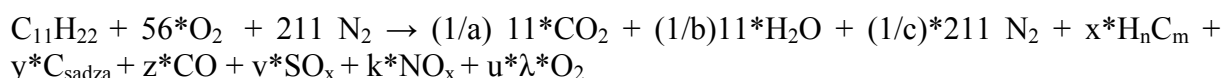
Przyjmuje się ustalony skład powietrza co implikuje, iż na jedną cząsteczkę tlenu O_2 przypada około 3,76 cząsteczek azotu N_2 (zgodnie z Tabelą IV w Aneksie 2 „Skład powietrza suchego”) to w konsekwencji do komory spalania silnika odrzutowego dostaje się odpowiednia ilość azotu zaburzając proces spalania:



Nadto stosunek paliwa do powietrza w silniku odrzutowym zmienia się w zakresie od 1:45 do 1:130 podczas gdy do pełnego spalania paliwa wystarczy stosunek 1:15.

Stąd dla przypadku w którym stosunek masowy paliwo powietrze wynosiłby 1:50, przy założeniu upraszczającym, że masa molowa nafty lotniczej jest na poziomie 154 atomowych jednostek masy a suma mas molowych cząsteczki tlenu O_2 i towarzyszących jej cząsteczek azotu $3,76 N_2$ wynosi 137,28 a.j.m., można zapisać proporcję $\frac{1}{50} = \frac{(154)}{(x * 137,28)}$ skąd $X = \frac{(154 * 50)}{137,28} = 56,1$

co w konsekwencji:



³ Stosuje się często jeszcze bardziej uogólniony lecz równoważny zapis postaci: $C_xH_y + (x + \frac{1}{4} * y) O_2 \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2} H_2O$, oraz $C_xH_y + (x + \frac{1}{4} * y) O_2 + 3,76 (x + \frac{1}{4} * y) N_2 \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2} H_2O + 3,76 * (x + \frac{1}{4} * y) N_2$,

W konsekwencji rozcieńczenia tlenu azotem, niekompletnego spalania, obecności niewielkich ilości siarki w paliwie lotniczym, w produktach spalania pojawiają się niewielkie ilości niedopalonych węglowodorów (H_nC_m), sadzy (C), tlenku węgla (CO), tlenku i dwutlenku siarki ($SO_x \rightarrow SO$ oraz SO_2) i tlenków azotu ($NO_x \rightarrow NO$ oraz NO_2).

Współczynnik korekcyjny (1/a) informuje, że powstaną mniejsze ilości dwutlenku węgla przez wzgląd na powstanie sadzy i obecność niespalonych węglowodorów po stronię produktów. Współczynnik (1/b) odzwierciedla mniejszą ilość pary wodnej z uwagi na obecność niespalonych węglowodorów jak wyżej. Natomiast współczynnik (1/c) wskazuje jaka część azotu atmosferycznego zasadniczo nie biorącego udziału w reakcji ulegnie utlenieniu do tlenków azotu.

Nadmieniamy, że podaliśmy bardzo uproszczony opis przebiegu procesów w napędach odrzutowych, niemniej naszym zdaniem wystarczający dla celów poglądowych.

Postęp technologiczny

Od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku międzynarodowa społeczność lotnicza we współpracy z przemysłem silników lotniczych i statków powietrznych czyni starania zmierzające do obniżenia emisji ubocznych produktów spalania paliw lotniczych znanych jako tzw. zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego. Wskutek ogromnych wysiłków dokonywanych w tej dziedzinie na przestrzeni wielu dziesięcioleci udało się radykalnie obniżyć emisję ubocznych produktów spalania paliw lotniczych i uzyskać optycznie czyste smugi kondensacyjne koloru białego.

Aby zilustrować wyżej opisaną różnicę poniżej zamieszczono kopię zdjęcia samolotu Boeing 707-120 American Airlines startującego z lotniska w Los Angeles z 1959 roku. Porównując zamieszczone zdjęcie operacji startu z obecnie wykonywanymi, warto zwrócić uwagę jak skutecznie wyeliminowano emisję sadzy. Zabieg taki pozwolił także na eliminację wielu innych rodzajów emisji, ale jednocześnie uzyskano imponujące oszczędności paliwa tak, że współczesny samolot spala 30% tego co samolot z początku lat sześćdziesiątych.

Zdjęcie 1: Jedna z operacji startu samolotu Boeing 707-120 linii American Airlines z lotniska w Los Angeles w 1959 roku.



Źródło: Zdjęcie pochodzi z opracowania: Thomas et al., pt. „Plane Simple Truth”, Perth Business Centre, May 2008.

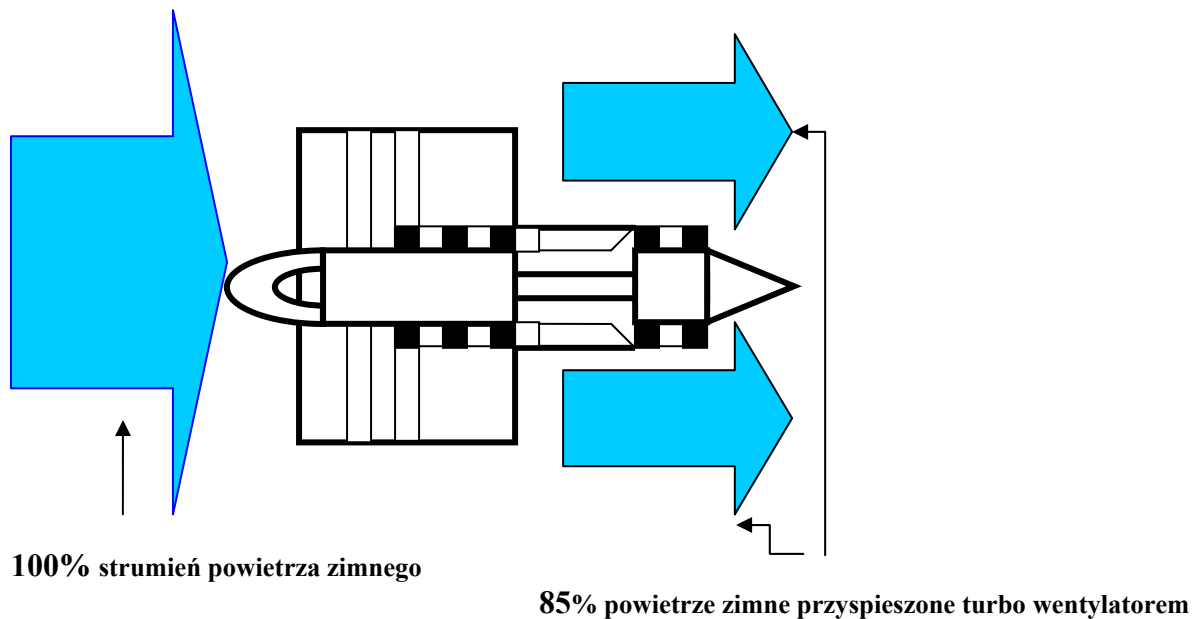
Reasumując warto pamiętać, że zaletą nowoczesnych silników lotniczych obok efektywnego spalania jest techniczna konieczność rozcieńczenia spalin ogromnym nadmiarem czystego powietrza, które pozwala na ochłodzenie spalin, w przeciwnym razie doszłoby do uszkodzenia turbiny napędu lotniczego. Zatem spaliny są jeszcze wewnątrz silnika turboodrzutowego rozcieńczane czystym powietrzem.

Nadto powinniśmy być świadomi, że żyjąc w miastach lub w otoczeniu np. drogi szybkiego ruchu jesteśmy zmuszeni wdychać spaliny samochodowe wprost z powierzchni ziemi tj. zanim jeszcze ulegną wymieszaniu z otaczającym powietrzem. W przypadku samolotów komunikacyjnych z uwagi na wysokości przelotowe większość emisji zachodzi na znacznych wysokościach dając czas i miejsce na dodatkowe wymieszanie się z otaczającymi masami powietrza.

Aneks 1: Proces spalania w lotniczych napędach turbinowych - rozwinięcie

Lotniczy silnik turbinowy ma charakter silnika wysokoprężnego, jednak szereg uwarunkowań technicznych powoduje, że procesy spalania zachodzą w sposób pełniejszy niż w innych rodzajach silników. Mają zatem bardzo korzystny przebieg z punktu widzenia ochrony środowiska.

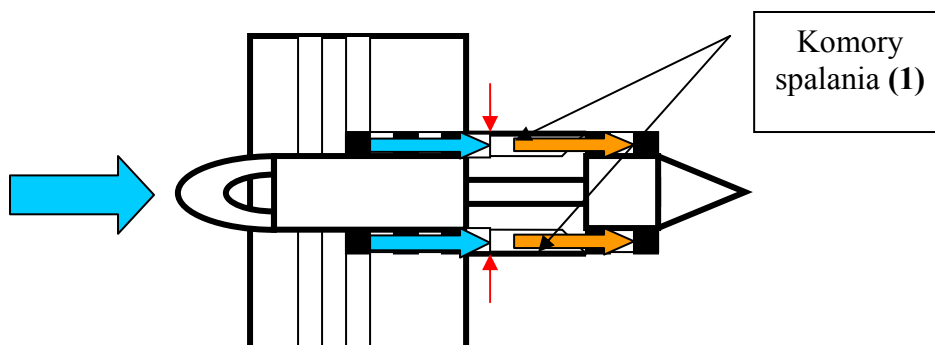
Rysunek 1: Proporcje masowe zimnego strumienia zewnętrznego do gorącego strumienia wewnętrznego naniesione na schemat napędu odrzutowego.



Źródło: Opracowanie własne, ULC, Warszawa, kwiecień 2013.

W najbardziej rozpowszechnionych obecnie silnikach dwuprzepływowych o dużym stopniu tzw. dwuprzepływowości jedynie 15% powietrza przechodzi przez część środkową silnika w której realizowane są procesy spalania.

Rys. 2: Podział masowego strumienia wewnętrznego oraz stosunek paliwo-powietrze naniesione na schemat napędu odrzutowego.

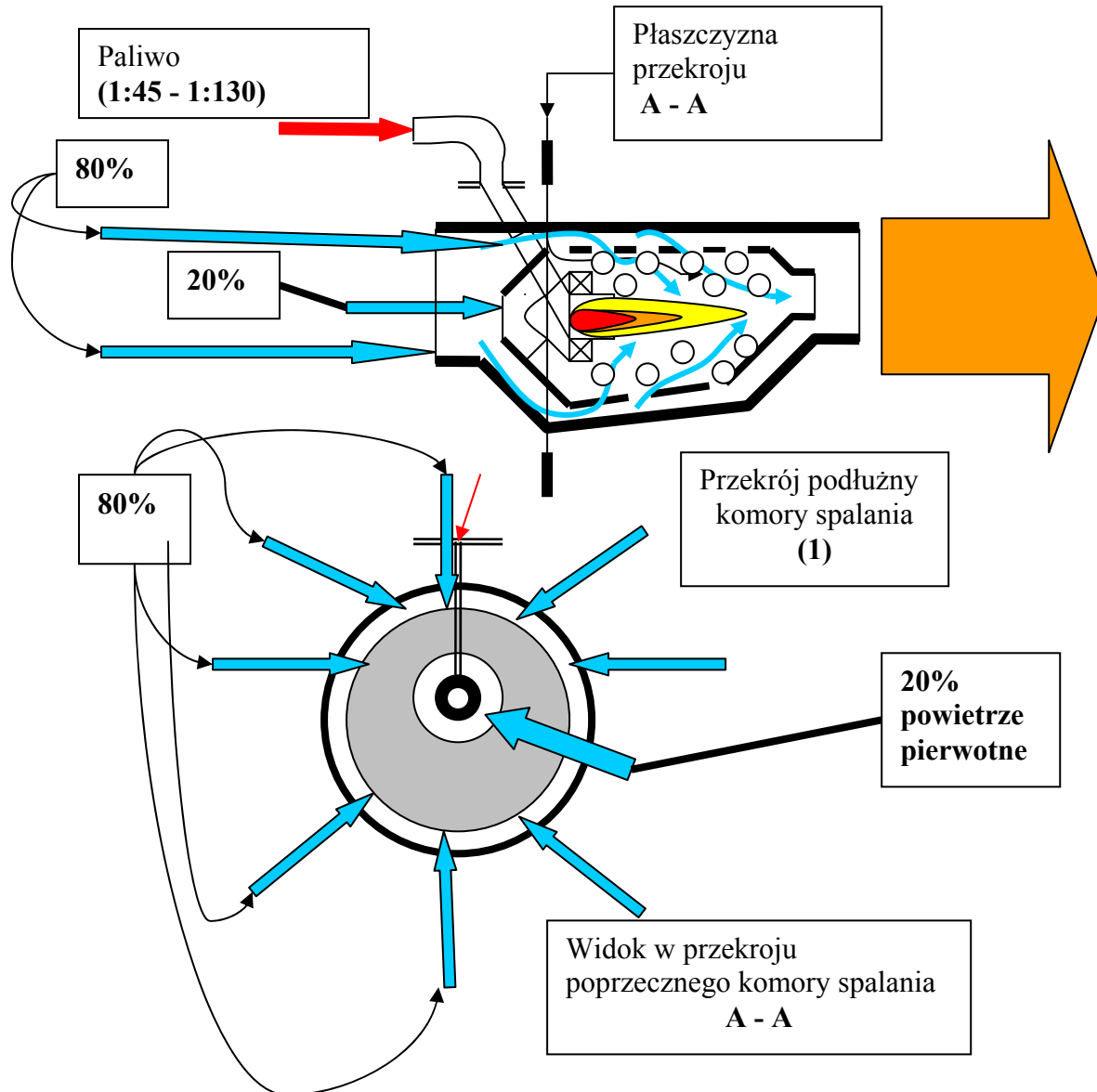


Źródło: Opracowanie własne, ULC, Warszawa, kwiecień 2013

Tylko 20% powietrza przechodzącego przez część środkową silnika turbowentylatorowego trafia do jego komór (komory spalania). Stosunek paliwa do powietrza w silniku odrzutowym zmienia się w zakresie od 1:45 do 1:130 (do pełnego spalania paliwa wystarczy stosunek

1:15). Powietrze pierwotne w ilości 20% wpływa centralnym otworem do komory spalania, 80% powietrza wpływa do przestrzeni pierścieniowej.

Rys. 3: Poglądowy schemat komory spalania napędu odrzutowego wraz z masowymi proporcjami strumieni paliwa, powietrza pierwotnego i powietrza wtórnego.



Źródło: Opracowanie własne, ULC, Warszawa, kwiecień 2013

Następnie dalsze 20% powietrza z przestrzeni pierścieniowej otworami bocznymi wpływa do komory spalania w strefie wtórnej spalania. Zatem około 40% powietrza skierowanego do komór spalania bierze udział w procesach utleniania paliwa. Pozostałe 60% powietrza odbiera nadmiar ciepła w procesie przepływowej wymiany ciepła - od ścianek komory spalania około 40%, a następnie służy do rozcieńczenia około 20% ciągle zbyt gorących gazów spalinowych, które mając temperaturę rzędu 1800-2000°C uszkodziłyby łopatki turbiny.

Reasumując, silnik odrzutowy z uwagi na wymogi techniczno-technologiczne, które zmuszają konstruktorów do stosowania ogromnego nadmiaru powietrza ponad ilość wymaganą do kompletnego utlenienia składników zawartych w paliwie, a dodatkowo ze względu na surowe

kryteria ekonomiczne narzucające minimalizację zużycia paliwa i jego kompletnego spalania wykazuje daleko idące zalety z punktu widzenia ochrony środowiska. Zatem, spaliny które u wylotu z dyszy napędu lotniczego są już wymieszane z powietrzem chłodzącym ulegają następnie dalszemu rozcieńczeniu powietrzem zimnego strumienia powietrza przyspieszonego pracą turbowentylatora (w przypadku silników turbowentylatorowych współcześnie najczęściej stosowanych). Mamy więc do czynienia nie tylko z procesem bardzo dokładnego spalania lecz także z wielostopniowym rozcieńczaniem powstałych spalin.

Aneks 2. Wybrane charakterystyki fizykochemiczne typowych paliw lotniczych.

Tabela I. Parametry energetyczne i gęstość paliw lotniczych						
Paliwo	Typowa gęstość w 15°C (60°F)		Typowa kaloryczność			
	[g]/[ml]	[lb]/[U.S gal]	Na jednostkę masy		Na jednostkę objętości	
			MJ/kg	Btu/lb	MJ/l	Btu/gal
Benzyna lotnicza	0,715	5,97	43,71	18,800	31,00	112,500
Paliwa do napędów odrzutowych						
„Wide Cut” *	0,762	6,36	43,54	18,720	33,18	119,000
Nafta lotnicza**	0,810	6,67	43,28	18,610	35,06	125,800

Źródło: „Aviation fuels technical review.”, Chevron [6], [http://chevronglobalaviation.com/docs/aviation_tech_review.pdf]
 * węglowodory o liczbie atomów węgla pomiędzy 5 a 15,
 **węglowodory o liczbie atomów węgla pomiędzy 8 a 16.

Tabela II. Uśredniony skład różnych paliw lotniczych do napędów turbinowych.				
	JP-4	JP-5	JP-7	JP-8 (JetA/A-1)
Przybliżony wzór	$C_{8,5}H_{17}$	$C_{12}H_{22}$	$C_{12}H_{25}$	$C_{11}H_{21}$
Stosunek H/C	2,00	1,92	2,07	1,91
Wartość opałowa netto BTU/lb*	18,700	18,500	18,875	18,550
Ciężar właściwy w 15°C (60°F)	0,76	0,81	0,79	0,81
Zawartość związków aromatycznych [% (v/v)]	10	19	3	18
Węglowodory cykliczne (Nafteny) [% (v/v)]	29	34	32	20
Parafiny [% (v/v)]	59	45	65	60
Olefiny [% (v/v)]	2	2	-	2
Siarka [ppm]	370	470	60	490

Integrated Publishing, „Fuel properties” [http://WWW.tpub.com/kontent/altfuels 09/59480013.htm]
 1 [BTU] = 1055,06 [J], oraz 1[J] = 0,0094787 [BTU], również 1000 BTU = 0,293 kWh

Tabela III. Tabela. Systematyka paliw lotniczych typu wojskowego.				
JP-4 „Wide Cut”	JP -5	JP-7	JP-8	JP-9
Podobne do Jet B „Szeroka frakcja”	Podniesiona temperatura zapłonu, do stosowania na lotniskowcach	Podniesiona stabilność fizykochemiczna w wysokich temperaturach, dla samolotu szpiegowskiego SR-71 „Blackbird”	Typu nafty lotniczej, podobne do Jet A-1*	Paliwo do pocisków, o dużej zawartości energii na jednostkę objętości.

D. Lawicki. „Jet fuel characteristics.”, Flight Operations Engineering, Boeing 2002, [http://pilotlab.net/aircraft-manufacture/boeing/jet-fuel-characteristics-bo.pdf].
 *) Domniemuje się, że paliwa wojskowe typu naft lotniczych przeznaczone do napędu samolotów zawierają przede wszystkim zwiększone stężenia dodatków smarnych oraz antykorozyjnych w stosunku do ich cywilnych odpowiedników.

Tabela IV. Skład suchego powietrza atmosferycznego.

	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	H ₂	Ne	He	Kr	Xe
% objętościowe	78,09	20,95	0,933	0,030	0,01	0,0018	0,0005	0,0001	0,9*10 ⁻⁵
% masowe	75,47	23,20	1,28	0,046	0,001	0,0019	0,00007	0,0003	0,4*10 ⁻⁴

Źródło: Wiesław Pudlik „Termodynamika” WYDANIE III – cyfrowe, Gdańsk 2011, s.414.

Źródła:

- [1] Irem Y. Tumer, Anupa Bajwa, Learning About How Aircraft Engines Work And Fail [http://www.ultraligero.net/Cursos/mecanica/Como_funcionan_por_que_fallan_los_motores.pdf]
- [2] Jack D. Mattingly, "Introduction to Air Breathing Engines" Aircraft Engine Design, Chapter 1, of *Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets*, AIAA, 2006.
- [3] Baldev K Mehta "50 years of Engine Improvements", Boeing Company, Pacific North West AIAA Symposium, November 2009, Seattle.
[https://info.aiaa.org/Regions/Western/PacificNorthwest/Other%20Public%20Documents/2009%20Pacific%20Northwest%20AIAA%20Technical%20Symposium%20-%20Presentation%20Sharing/Presenter%20Presentations/Session%20B%20-%20View%20Lounge/Baldev%20Mehta/50%20years%20of%20Engine%20Improvements%20Sept%202009.pdf]
- [4] "The Jet Engine", Rolls-Royce
[http://www.rolls-royce.com/about/publications/jet_engine_book/]
- [5] Profesor Dr Ulrich Schumann „Cool contrails.” Deutsches Zentrum Fur Luft - und Raumfahrt (DLR), Institute of Atmospheric Physics, Oberpfaffenhofen. ECAC news.” Number 48 – Winter 2012/2013; European Civil Aviation Conference 2013 pp. 26- 29.
- [5a] "ECAC news", Number 48 – Winter 2012/2013; European Civil Aviation Conference 2013 pp. 26- 29. [odrębna notatka redakcji "ECAC news"].
- [6] „Effects of Air Traffic on Air Quality in the Vicinity of European Airport.” - local air quality assessments at and around European airports based on the airspace closure in Europe during the volcano eruption in Iceland in 2010. ACI EUROPE, Environmental Strategy Committee, Autumn 2010.
[www.zurich-airport.co/.../ACI_EUROPE_local...]

Opracowanie:

Tadeusz Reklewski, Piotr Lipka
 Departament Techniki Lotniczej
 Wydział Ochrony Środowiska