

Emisja spalin z silników lotniczych

Produkty spalania w lotniczych silnikach tłokowych **benzyny lotniczej** to: tlenek węgla, tlenki azotu, węglowodory, aldehydy, dwutlenek siarki, cząsteczki sadzy i szereg innych, powstających w nieznacznym ilościach z domieszek do paliwa, jak np. ołów. W silnikach małych samolotów, jak Cessna 152 lub 182, z 1 kg benzyny Avgas powstaje 3,05 kg dwutlenku węgla CO₂ oraz niewielkie ilości innych składników, których orientacyjne ilości podano w poniższej tabeli 1. Średnie zużycie paliwa w silnikach tych samolotów w warunkach przelotowych wynosi odpowiednio ok. 20 i 40 litrów na godzinę.

Tabela 1. Przykłady współczynników emisji dla jednosilnikowych samolotów tłokowych w [g] na [kg] spalonego paliwa				
	Współczynniki emisji [g/kg]			
Wysokość lotu w stopach	NO _x	HC	CO	SO ₂
3000	2,70	20,09	1,054	0,21
3000-18000	4,00	12,50	1,080	0,17

Źródło: EMEP Emission Inventory Guidebook, 2010 r.

Jednak małe samoloty, włączając samoloty transportu lokalnego i lotnictwa ogólnego oraz śmigłowce, zużywają objętościowo małą ilość paliwa.

W lotnictwie cywilnym głównym producentem spalin są samoloty pasażerskie. Lotnictwo wojskowe zużywa jedynie ok. 20% ogółu spalanej paliwa lotniczego.

Paliwo do silników odrzutowych, którym jest **nafta lotnicza**, stanowi ok. 98% paliwa spalanej w lotnictwie. Nafta ta musi spełniać specjalne wymagania, określone w odpowiednich normach.

Spaliny z turbinowych silników odrzutowych można podzielić na 3 zasadnicze grupy:

- naturalne produkty spalania paliw: CO₂, H₂O i NO_x,
- produkty nieefektywnego spalania: CO, HC (nie spalane węglowodory) i sadza,
- emisje związane z jakością paliwa: siarczki i cząsteczki pozostałości takie, jak metale.

W nowoczesnych silnikach lotniczych spalanie 1 kilograma nafty w 3,4 kg tlenu powoduje powstanie następujących ilości składników spalin:

- 3,16 kg dwutlenku węgla (CO₂),
- 1,29 kg wody (H₂O),
- poniżej 0,6 g tlenku węgla (CO),
- poniżej 15 g tlenków azotu (NO_x),
- poniżej 0,8 g dwutlenku siarki (SO₂),
- poniżej 0,01 g nie spalonych węglowodorów (CH_x),
- 0,01 – 0,03 g sadzy C.

Główne produkty spalania, czyli dwutlenek węgla i para wodna stanowią więc 99% masy spalin.

Silnik turbowentylatorowy podczas pracy zasysa wielką ilość powietrza. Około 15% kierowane jest do kanału wewnętrznego silnika, gdzie powietrze służy do spalania paliwa i chłodzenia komór spalania. Spaliny są mieszane z pozostałym (ok. 85%) powietrzem, sprężonym przez wentylator. Pracujący w zakresie startowym i w fazie początkowego wznoszenia silnik odrzutowy CFM56-3C-1 stosowany na samolocie B737 spala ok. 1 kg paliwa w ciągu 1 sekundy, zaś nowoczesny silnik Trent 1000 na B787, znacznie większy i o większym ciągu, spala ok. 2 kg paliwa. Samolot poruszający się wówczas z prędkością rzędu 300 km/godz. pokonuje w tym czasie odległość ok. 83 m. Powstające spaliny są mieszane z ogromną ilością powietrza, dzięki czemu są one rozcieńczane do znikomych stężeń. W warunkach przelotowych zużycie paliwa jest zdecydowanie mniejsze, a więc mniejsze są ilości spalin.

Systematycznie zastrzane przepisy międzynarodowe, utrzymujące się wysokie ceny paliwa lotniczego oraz konkurencja wśród producentów silników lotniczych wymuszają prowadzenie prac naukowo-badawczych, których efektem są coraz to nowsze konstrukcje silników i materiały, stosowane do ich budowy, poprawiające ich wydajność i znacząco zmniejszające zużycie paliwa. Osiągnięto to m.in. poprzez zastosowanie wyższych temperatur i ciśnień spalania. Chociaż rozwiązanie to powoduje wzrost ilości tlenków azotu, jednak dzięki odpowiednim ulepszeniom konstrukcyjnym udaje się obniżyć także ich ilość. Obecnie są prowadzone programy badawcze dla silników zakładające obniżenie emisji tlenków azotu do 70% obecnych wymagań. Zmniejszenie ilości spalanej paliwa obniżyło proporcjonalnie ilość emitowanego dwutlenku węgla. Znacząco także obniżyła się emisja VOC (ang. Volatile Organic Compounds) - lotnych związków organicznych, dwutlenku siarki i pary wodnej. W najnowszych silnikach już prawie nie zachodzi emisja tlenku węgla, nie spalonych węglowodorów, podtlenku azotu N_2O i sadzy.

Jednakże przy konstruowaniu silników nadal trzeba stosować kompromisy. Np. dążenie do redukcji emisji tlenków azotu i obniżenia hałasu było powodem zwiększenia średnicy silników projektowanych przez koncerny GE/Pratt&Whitney i Rolls-Royce dla samolotu Airbus A380. W efekcie zwiększył się ciężar tych silników oraz zużycie paliwa i emisje innych związków. Zatem zwracanie uwagi tylko na jeden składnik emisji bez należytego kontrolowania pozostałych może dać skutek w sumie szkodliwy dla środowiska. Pomimo to, uśrednione zużycie paliwa w A380 w przeliczeniu na pasażera na 100 km jest bardzo niskie i wynosi tylko 2,9 litra, co jest porównywalne z obecnie produkowanymi samochodami osobowymi.

Podstawowe przepisy międzynarodowe regulujące przedmiotową tematykę to głównie **II tom „Emisje z silników lotniczych” Załącznika 16 "Ochrona środowiska"** do Konwencji o międzynarodowym lotnictwie cywilnym ICAO. Zawierają one opis metody pomiaru ilości poszczególnych składników spalin: **tlenków azotu, tlenku węgla, niespalonych węglowodorów i sadzy** oraz ich dopuszczalne wartości dla dużych turbinowych silników odrzutowych, o ciągu powyżej 26,7 kN. Wymagania te są stopniowo zastrzane w miarę rozwoju konstrukcji silników. Wprowadzone w 1982 r. normy na tlenki azotu zastrzono początkowo o 20% w 1993 r., następnie w 1999 r. o dalsze 16%, a w 2004 r. jeszcze o kolejne 12%.

Pomiary spalin prowadzone są na ziemi, w hamowni, i odpowiadają cyklowi startu do wysokości 915 m (3000 feet) i lądowania z tej wysokości (The Landing/Take-Off cycle, w skrócie **LTO**). Problemem, nad którym obecnie pracuje się, jest przeliczenie uzyskanych wartości dla warunków wznoszenia do wysokości przelotowej i dla samego przelotu.

Wzorcowy cykl **LTO** składa się z następujących faz:

1. Start (ustawienie ciągu: 100%, czas pracy: 0,7 min.)
2. Wznoszenie początkowe (ciąg: 85%, czas: 2,2 min.)
3. Podejście do lądowania (ciąg: 30%, czas: 4,0 min.)
4. Kołowanie/bieg jałowy (ciąg: 7%, czas: 26,0 min.)

W celu zorientowania czytelnika w przybliżonej skali emisji ze starej floty statków powietrznych w cyklu startu/lądowania podano odpowiednie wielkości w Tabeli 2.

Tabela 2. Szacunkowe współczynniki emisji w cyklu LTO dla podstawowych typów statków powietrznych [kg]									
Typ	Zużycie paliwa	CO ₂	CO	NMVOC	CH ₄	N ₂ O	NO _x	SO ₂	PM _{2,5}
B767 (wiek przeciętny)	1617	5094	6,1	0,2	00	0,2	26,0	1,6	0,15
B737-400 (wiek przeciętny)	825	2600	11,8	0,5	0,1	0,1	8,30	0,8	0,07
B737-100 (stara flota)	920	2900	4,8	0,5	0,1	0,1	8,0	0,9	0,10
B747-100 (stara flota)	3400	10754	78,2	33,6	3,7	0,3	55,9	3,4	0,47

Źródło: EMEP/ EEA Emission Inventory Guidebook, zawartość siarki w paliwie przyjęto na poziomie 0,05%, (również dane o emisji PM_{2,5} = emisji PM₁₀).

W ostatnim okresie pojawił się problem określania **cząstek stałych** czyli **pyłu** (particulate matter - PM) w spalinach. *Dyrektywa unijna 1999/30/EC w sprawie wartości dopuszczalnych dwutlenku siarki i tlenków azotu, zanieczyszczeń pyłowych i ołowiu w powietrzu* określała dzienne i roczne limity dla koncentracji w powietrzu pyłów PM₁₀ o średnicach do 10 µm. Jej zapisy zostały rozszerzone na inne substancje *dyrektywą 2008/50/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 21 maja 2008 r. w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy*, w tym dodając limity dla koncentracji PM_{2,5} o średnicach do 2,5 µm. Pyły te są już zbyt małe, by mogły być zatrzymane w naturalnym procesie filtracji oddechowej. Budowa gardła i nosa człowieka pozwala na zatrzymywanie jedynie większych cząstek pyłu. Natomiast mniejsze cząstki, według najnowszych raportów WHO są najgroźniejsze dla naszego zdrowia, gdyż przenikając z układu oddechowego bezpośrednio do krwi, mogą znacząco wpływać na zdrowie osób z chorobami serca lub płuc, osób starszych oraz dzieci. Powodować mogą trudności z oddychaniem, astmę, ataki kaszlu, skrócenie oddechu, alergię, arytmie i zawały. Ludzie zdrowi także mogą odczuwać podobne objawy, ale o mniejszym natężeniu.

Pyły powstają w procesach energetycznego spalania paliw kopalnych w kotłach opalanych węglem kamiennym i brunatnym, a także spalania paliw w silnikach pojazdów. Duże ilości pyłów powstają w wielu gałęziach przemysłu, jak hutnictwo czy produkcja cementu. Do emisji cząstek pyłów dochodzi także w wyniku zjawisk takich, jak erupcja wulkanów lub pożary lasów. Podobny charakter mają zjawiska erozyjne, wskutek których pyły są unoszone wiatrem z pustyń, wietrzejących skał lub gleb.

Chociaż statki powietrzne nie są, jak się ocenia, dominującym źródłem PM, jednak ich wpływ na lokalną jakość powietrza powinien być określany w celu inwentaryzacji emisji, oceny ich rozprzestrzeniania się oraz opracowania środków ograniczających ten wpływ.

W spalinach turbinowych silników lotniczych pyły są zasadniczymi **składnikami nielotnymi**, z czego ponad 80% masy emisji stanowi węgiel w postaci sadzy, pochodzący ze spalania węglowodorów w paliwie. Sadza ta może być widoczna w postaci smugi dymu wydobywającej się z silnika. Normy jakości powietrza dla PM są określane w jednostkach

masy na jednostkę objętości. Dotychczasowe normy II tomu Załącznika 16 do Konwencji przewidują pomiar zadymienia, który sprowadza się do określenia stopnia zaczernienia (wielkości zaplamienia) filtra bibułowego przez próbkę spalin, oznaczanego metodą optyczną według skali od 0 do 100. Metodyka ta dotychczas była uznana za wystarczającą, jednak obecnie w ramach prac realizowanych przez przemysł lotniczy pod auspicjami ICAO są prowadzone prace naukowo-badawcze nad podstawami nowej metodyki pomiaru emisji cząsteczek uwzględniającej ich masę w obrębie różnych frakcji wymiarowych oraz stwarzającej możliwości oznaczania udziału cząstek lotnych.

Nowoczesne turbinowe silniki lotnicze, jak wykazało szereg przeprowadzonych ostatnio badań, zazwyczaj emitują cząstki znacznie mniejsze niż PM_{10} (o średnicy mniejszej niż $1\ \mu m$). Przeciętna wartość średnicy tych cząsteczek w rozkładzie Gaussa zawiera się w granicach $15\ nm - 40\ nm$, zależnie od konstrukcji silnika i ustawionego ciągu. Ponieważ istnieje już techniczna możliwość pomiaru masy i ilości tych cząsteczek, po opracowaniu metody pobierania próbek i ich pomiarów oraz zebraniu odpowiedniej ilości wyników pomiarów będzie to wprowadzone jako norma certyfikacyjna do II tomu Załącznika 16 Konwencji.

Względy zdrowotne oraz wpływ na środowisko wymagają właściwej identyfikacji wszystkich składników spalin i ich pomiaru. Zatem oprócz składników nielotnych powinny być mierzone także **składniki lotne**, jak np. związki siarki, tworzące się ze skondensowanych gazów w płomieniu wylotowym z silnika po ich ochłodzeniu do temperatur niższych niż panujące na wyjściu z silnika. Odbywa się to już praktycznie w większych odległościach od silnika, rzędu kilkudziesięciu metrów, zatem te składniki nie mogą być mierzone w ten sam sposób, co składniki nielotne. Jest to zagadnienie bardzo złożone, wymaga podstawowych badań naukowych, więc nie można spodziewać się rozwiązania tego problemu w krótkim terminie. Kondensujące się spaliny ulegają przekształceniu w cząstki poprzez zawiązywanie się nowych cząstek i poprzez zagęszczanie w sadzę PM. Nowopowstałe w stygnących spalinach lotne cząstki przewyższają liczebnie nielotne cząstki sadzy od 10 do 100 razy. Ich ilość zależy od zawartości siarki w paliwie, wielkości powierzchni cząstek sadzy dostępnej dla kondensacji oraz od warunków otoczenia, głównie temperatury – w niższych temperaturach ten proces przebiega szybciej.

Oprócz powyższych cząstek należy uwzględnić także substancje organiczne, tj. niespalone węglowodory i olej smarujący, których ilość zależy od konstrukcji silnika i ustawienia ciągu. Dla szeregu silników olej smarujący stanowi ponad 90% organicznych PM przy maksymalnym ustawieniu ciągu, gdyż sprawność spalania jest wówczas maksymalna i niespalone paliwo jest wówczas minimalne.

Ponieważ obecnie dużą wagę przywiązuje się do ograniczania emisji gazów cieplarnianych z systemu transportu lotniczego, w ICAO trwają także prace nad stworzeniem normy certyfikacyjnej na **emisję CO_2** z samolotu jako konstrukcji składającej się z kilku silników. Będzie to nowy, III tom Załącznika 16 do Konwencji. Bazując na zużyciu paliwa, a stąd ilości wytwarzanych emisji CO_2 , norma będzie zmuszać producentów samolotów do stosowania nowoczesnych technik ograniczających zużycie paliwa (w konstrukcji, napędzie, aerodynamice).

Silniki turbinowe mają stosunkowo duże jednostkowe zużycie paliwa na biegu jałowym i przy niskich wartościach ciągu. Dlatego też, aby polepszyć jakość powietrza w okolicach portu lotniczego, należy ograniczać czas ich pracy na ziemi – przy kołowaniu i podczas postoju. Temu też powinno służyć poprawianie działania służb ruchu lotniczego dla zminimalizowania czasu i paliwa traconego przez samoloty oczekujące swojej kolejki podczas kołowania na start lub przy lądowaniu. Istotne jest także stosowanie odpowiedniego profilu lotu – w silnikach turbinowych zużycie paliwa spada znacznie wraz ze zwiększaniem wysokości lotu.

Rozpatrywano w ICAO także możliwość poprawy jakości powietrza poprzez obniżenie emisji wprowadzając takie instrumenty ekonomiczne, jak opłaty środowiskowe (związane z odległością przelotu lub w postaci dopłaty do biletu czy opłaty lotniskowej) lub podatek nałożony na paliwo lotnicze. W 2012 roku włączono lotnictwo cywilne UE do unijnego systemu handlu emisjami (EU ETS). Ma to zachęcać linie lotnicze do stałego modernizowania posiadanego sprzętu lotniczego i wymiany na nowszy, bardziej ekonomiczny, spalający mniej paliwa, a więc emitujący mniej spalin.

Nowe generacje silników lotniczych powodują, że w wielu przypadkach w okolicach portów lotniczych spaliny z transportu drogowego są znacznie większym problemem, gdyż do pyłów ze spalania paliw dochodzą tu pyły powstające wskutek ścierania opon i hamulców oraz powierzchni dróg. Natomiast na jakość powietrza wokół portów lotniczych korzystnie wpływa ich architektura przez wzgląd na fakt, iż drogi startowe są lokalizowane na głównych kierunkach działających wiatrów. Stanowią one swojego rodzaju „korytarze wentylacyjne”, co poważnie łagodzi problem zanieczyszczenia powietrza.

W 2002 r. francuski instytut badawczy rolnictwa INRA przeprowadził badania kumulacji szkodliwych związków chemicznych w różnych roślinach, uprawianych w pobliżu portu lotniczego im. Charles de Gaulle'a pod Paryżem. Przebadano je pod kątem zawartości metali (Al, Ti, Cr, Fe, Ni, Ba), BTX (benzen, toluen, ksylen) i 16 PAH (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne), które zostały określone jako najbardziej niebezpieczne przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska. Porównanie ich z roślinami z terenów, które nie były narażone na spaliny lotnicze wykazało, że jedyną różnicą jest zwiększona koncentracja tytanu, który jednak nie jest toksyczny.

Opracowanie:

Bolesław Szuman, Piotr Lipka, Tadeusz Reklewski