

Znaczenie jakości i rodzaju paliw w silnikach turbinowych

Jan Kozieł, Dominik Nowakowski

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Streszczenie

Praca jest analizą wpływu parametrów paliwa na wydajność, sprawność oraz eksploatację silników turbinowych. Omówiono kluczowe właściwości paliw lotniczych, takie jak skład chemiczny, wartość opałowa i odporność na zmiany temperatury. Przedstawiono również porównanie różnych typów paliw, w tym tradycyjnych naftowych oraz alternatywnych biopaliw i paliw syntetycznych. Zwrócono uwagę na znaczenie jakości paliwa w kontekście bezpieczeństwa lotów, emisji spalin oraz kosztów eksploatacji. W pracy zawarto również analizę przyszłościowych rozwiązań, które mogą wpłynąć na rozwój bardziej ekologicznych i efektywnych technologii napędowych w lotnictwie.

Słowa kluczowe: paliwa lotnicze, bezpieczeństwo, normy, jakość, rozwój

Wprowadzenie

Paliwa odgrywają kluczową rolę w funkcjonowaniu silników turbinowych, które znajdują zastosowanie zarówno w lotnictwie, jak i w energetyce. Ich jakość i rodzaj mają bezpośredni wpływ na wydajność, trwałość oraz bezpieczeństwo eksploatacji tych zaawansowanych jednostek napędowych. W obliczu rosnących wymagań dotyczących efektywności i zrównoważonego rozwoju zrozumienie znaczenia paliw staje się kluczowe zarówno dla inżynierów, jak i dla całej branży lotniczej.

W niniejszej pracy zostaną omówione podstawowe rodzaje paliw stosowanych w silnikach turbinowych, ich właściwości oraz wpływ jakości na pracę silników. Zostaną również poruszone zagadnienia związane z bezpieczeństwem, a także przedstawione alternatywne paliwa, których można użyć w silnikach turbinowych.

Charakterystyka paliw do silników turbinowych

Silniki turbinowe są podstawowym napędem większości współczesnych samolotów. Paliwa stosowane w tych silnikach, zwane paliwami lotniczymi, muszą spełniać rygorystyczne wymagania, takie jak odpowiednia lotność, stabilność chemiczna, właściwości reologiczne w niskich temperaturach oraz neutralność chemiczna wobec materiałów używanych w układach zasilania i dystrybucji. Kluczowym aspektem jest zapewnienie pełnego spalania, minimalizującego osady i wpływ na środowisko.

Zgodnie z normami międzynarodowymi takimi jak standardy ICAO czy ISO współcześnie wszystkie paliwa lotnicze muszą przejść szczegółowe badania, zanim zostaną

dopuszczone do użytku. Proces kwalifikacji obejmuje testy laboratoryjne, aplikacyjne i praktyczne, zapewniające zgodność paliwa z wymaganiami dotyczącymi bezpieczeństwa, wydajności oraz ochrony środowiska.

Rozwój globalnych standardów w obszarze jakości paliw lotniczych przyczynił się do eliminacji wcześniejszych różnic regionalnych. Obecnie obowiązujące normy, takie jak ASTM D1655 dla Jet A i Jet A-1, stanowią podstawę oceny i kontroli jakości paliw. W coraz większym stopniu uwzględniane są również kwestie zrównoważonego rozwoju, a rozwój biopaliw oraz paliw syntetycznych (SAF – Sustainable Aviation Fuel) odgrywa kluczową rolę w zmniejszaniu emisji gazów cieplarnianych w lotnictwie.

Kluczowe właściwości paliw turbinowych

Paliwa turbinowe muszą spełniać rygorystyczne wymagania techniczne, aby zapewnić bezpieczną i efektywną pracę silników w różnicowanych warunkach. Poniżej omówione są najważniejsze właściwości paliw, które wpływają na ich przydatność w lotnictwie i innych zastosowaniach turbinowych.

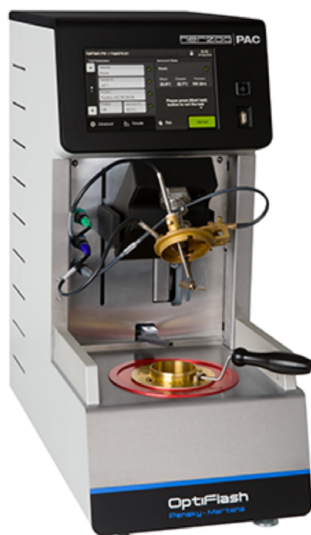
1. Temperatura zapłonu – to najniższa temperatura, przy której para paliwa może ulec zapłonowi w obecności źródła ognia. Wysoka temperatura zapłonu zwiększa bezpieczeństwo podczas obsługi naziemnej i transportu paliwa, zapewniając ochronę przed samozapłonem w warunkach ekstremalnych, takich jak przegrzanie w instalacji paliwowej.

Do wyznaczania temperatury zapłonu stosuje się specjalistyczne urządzenia, takie jak automatyczny aparat OptiFlash, działający zgodnie z metodą Pensky–Martensa (ryc. 1). Aparat ten umożliwia precyzyjne i powtarzalne oznaczenie temperatury zapłonu poprzez analizę zachowania par substancji palnej w zamkniętym naczyniu.

Zasady działania aparatu OptiFlash i etapy procedury pomiarowej opisano poniżej:

- podgrzewanie próbki – ciecz umieszczona w zamkniętym tyglu jest podgrzewana w sposób kontrolowany;
- mieszanie – w trakcie podgrzewania próbka jest mieszana, co zapewnia równomierne rozprowadzenie par wewnątrz tygla;
- okresowe zapłonowanie – w regularnych odstępach czasu do tygla wprowadza się źródło zapłonu (np. płomień lub iskrę), przerywając jednocześnie mieszanie;
- wykrywanie zapłonu – jeśli stężenie par jest wystarczające, następuje zapłon, a aparat rejestruje temperaturę, w której do niego doszło;

- powtarzanie pomiaru – procedura jest powtarzana do momentu uzyskania stabilnych, powtarzalnych wyników;
- wynik końcowy – uzyskana wartość temperatury zapłonu stanowiąca wynik pomiaru.



Ryc. 1. Automatyczny aparat OptiFlash do oznaczania temperatury zapłonu metodą Pensky'ego-Martensa

Dzięki automatyzacji procesu i zastosowaniu nowoczesnych czujników, urządzenie zapewnia wysoką dokładność i bezpieczeństwo pomiarów, zgodnie z obowiązującymi normami laboratoryjnymi.

2. Temperatura zamarzania – to najniższa temperatura, przy której paliwo pozostaje w stanie płynnym bez wytrącania się kryształków lodu. Jest to kluczowa właściwość w lotnictwie, gdzie samoloty operują na dużych wysokościach, przy temperaturach spadających często poniżej -50°C . Niska temperatura zamarzania, jak w przypadku paliwa Jet A-1 (-47°C), zapobiega blokadzie filtrów i przewodów paliwowych przez zamarznięte składniki. W przypadku paliw wojskowych takich jak JP-8 dodatkowo stosuje się specjalne substancje zapobiegające tworzeniu się lodu w układzie paliwowym. Do precyzyjnego pomiaru temperatury zamarzania paliwa lotniczego wykorzystywany jest automatyczny tester HZBD-5972, zaprojektowany zgodnie z normami SH/T 0770 i ASTM D5972 (ryc. 2). Urządzenie to umożliwia szybkie i dokładne wyznaczenie temperatury, w której w paliwie zaczynają krystalizować się węglowodory w stanie stałym.

Działanie testera HZBD-5972 w ramach procedury pomiarowej składa się z następujących etapów:

- chłodzenie próbki – urządzenie stopniowo obniża temperaturę próbki paliwa do poziomu, w którym może nastąpić zamarzanie;
- wykrywanie krystalizacji – specjalny czujnik monitoruje zmiany strukturalne w próbce i identyfikuje moment tworzenia się pierwszych kryształów;
- pomiar temperatury – w chwili pojawienia się krystalizacji, tester automatycznie rejestruje aktualną temperaturę;

- odczyt wyniku – zarejestrowana temperatura jest wyświetlana cyfrowo, co umożliwia dokładny i jednoznaczny odczyt.

Tester HZBD-5972, dzięki automatyzacji procesu i wysokiej czułości pomiaru, stanowi niezastąpione narzędzie w laboratoriach paliwowych oraz przemyśle lotniczym, gdzie niezawodność paliwa w niskich temperaturach jest kwestią krytyczną dla bezpieczeństwa operacji lotniczych.



Ryc. 2. HZBD-5972 – automatyczny tester temperatury zamarzania

3. Stabilność termiczna i chemiczna:

- a) stabilność termiczna – odporność paliwa na rozkład pod wpływem wysokich temperatur w systemie paliwowym. Zapobiega tworzeniu się osadów w dyszach paliwowych, które mogą zakłócać przepływ paliwa i pogorszyć wydajność silnika;
- b) stabilność chemiczna – odpowiedzialna za długoterminową przydatność paliwa do użycia. Zanieczyszczenia chemiczne, takie jak woda lub siarka, mogą powodować korozję elementów silnika i układów paliwowych.

4. Gęstość energetyczna – ilość energii, jaką można uzyskać z jednostki masy lub objętości paliwa. Im wyższa gęstość energetyczna, tym więcej energii można uzyskać z tej samej ilości paliwa, co przekłada się na zasięg samolotu i efektywność paliwową. Paliwa naftowe, takie jak Jet A i JP-8, mają wysoką gęstość energetyczną, co czyni je odpowiednimi do długodystansowych lotów. Biopaliwa i paliwa syntetyczne często mają nieco niższą gęstość energetyczną, co wymaga modyfikacji w systemach napędowych.

5. Zawartość siarki i zanieczyszczeń – niska zawartość siarki w paliwie lotniczym ma kluczowe znaczenie dla ochrony środowiska i trwałości silników. Zmniejszenie emisji tlenków siarki zapobiega (SO_x) powstawaniu kwaśnych deszczy i zanieczyszczeniu atmosfery, a także korozji elementów układu napędowego. Obecność wody w paliwie może prowadzić do tworzenia się lodu w instalacji paliwowej, natomiast cząstki stałe stanowią zagrożenie dla pomp i filtrów, mogą powodować ich uszkodzenie lub całkowitą awarię.

Dlatego wysokiej jakości paliwa lotnicze, takie jak Jet A-1 i JP-8, są rygorystycznie oczyszczane i badane pod kątem zawartości siarki oraz innych zanieczyszczeń. Jednym z nowoczesnych urządzeń stosowanych do tego celu jest analizator zawartości siarki ANTEK MultiTek (ryc. 3).

Pomiar zawartości siarki w paliwie przy użyciu analizatora ANTEK MultiTek przebiega w następujących etapach:

- przygotowanie próbki – próbka paliwa jest dostarczana do analizatora, gdzie zostaje precyzyjnie dozowana i przygotowana do analizy;
- spalanie – paliwo jest całkowicie spalane w piecu o wysokiej temperaturze w obecności tlenu, co powoduje uwolnienie związków siarki w postaci dwutlenku siarki (SO_2);
- konwersja chemiczna – powstały SO_2 jest przekształcany chemicznie w odpowiednią formę wykrywalną przez układ pomiarowy, często poprzez konwersję do związków reagujących z chemiluminescencyjnymi wskaźnikami;
- detekcja – analizator wykorzystuje metodę chemiluminescencji lub detekcji UV do ilościowego oznaczenia zawartości siarki w badanej próbce;
- odczyt wyniku – wynik analizy jest prezentowany w formie cyfrowej i może być archiwizowany w systemie zarządzania danymi.

ANTEK MultiTek to wszechstronny analizator, który może jednocześnie mierzyć zawartość siarki, azotu i halogenów w różnych próbkach węglowodorowych. Dzięki wysokiej czułości i precyzji pomiaru urządzenie to znajduje zastosowanie w kontroli jakości paliw lotniczych, gdzie nawet śladowe ilości zanieczyszczeń mogą mieć krytyczne znaczenie dla bezpieczeństwa operacji lotniczych.



Ryc. 3. Analizator zawartości siarki ANTEK MultiTek, PAC

6. Dodawane substancje (aditiva):

- środki przeciwutleniające: zapobiegają utlenianiu paliwa, co wydłuża jego trwałość;
- substancje przeciwkorozyjne: chronią elementy metalowe w systemie paliwowym przed rdzą;
- dodatki przeciwdziałające tworzeniu się lodu: zmniejszają ryzyko krystalizacji w niskich temperaturach;

- środki poprawiające smarność: zmniejszają tarcie i chronią pompy paliwowe przed zużyciem.

Najczęściej stosowane gatunki paliw

1. Jet A i Jet A-1

Paliwa Jet A i Jet A-1 należą do najczęściej stosowanych paliw lotniczych w silnikach turbinowych. Są to paliwa typu nafta, charakteryzujące się wysoką jakością i spełniające rygorystyczne normy przemysłowe.

1.1 Charakterystyka Jet A

Jet A jest standardowym paliwem używanym w Stanach Zjednoczonych, w szczególności w lotnictwie cywilnym. Jego podstawowe cechy to:

- temperatura zapłonu: ok. 38–43°C, co zapewnia bezpieczne użytkowanie w warunkach naziemnych i podczas operacji lotniczych,
- temperatura zamarzania: -40°C, co czyni je mniej odpornymi na bardzo niskie temperatury w porównaniu z Jet A-1.

Zastosowanie: loty krajowe i regionalne w warunkach umiarkowanego klimatu.

1.2 Charakterystyka Jet A-1

Jet A-1 jest standardowym paliwem używanym na całym świecie, szczególnie w lotnictwie cywilnym międzynarodowym. Jego kluczowe cechy obejmują:

- temperatura zapłonu: zbliżona do Jet A,
- temperatura zamarzania: -47°C, dzięki czemu lepiej nadaje się do operacji w ekstremalnych warunkach pogodowych, np. na dużych wysokościach lub w obszarach polarnych.

Dodatki chemiczne: zawiera substancje zapobiegające tworzeniu się lodu w układzie paliwowym oraz poprawiające stabilność chemiczną.

Zastosowanie: międzynarodowe loty komercyjne oraz operacje wojskowe w klimacie arktycznym i umiarkowanym.

1.3 Porównanie Jet A i Jet A-1

Tabela 1. Porównanie paliwa Jet A i Jet A-1

Właściwość	Jet A	Jet A-1
Temperatura zapłonu	~38–43°C	~38–43°C
Temperatura zamarzania	-40°C	-47°C
Obszar zastosowań	USA, klimat umiarkowany	świat, klimat ekstremalny

2. Paliwo lotnicze Jet B Jet B to specjalistyczne paliwo lotnicze naftowe o wysokiej lotności, należące do grupy paliw szeroko frakcyjnych. Jest mieszkanką benzyny naftowej (około 30%) i nafty (około 70%). Zostało zaprojektowane, aby działać w ekstremalnie niskich

temperaturach, co czyni je idealnym do zastosowań w regionach arktycznych i zimnym klimacie.

Właściwości:

- punkt zapłonu: bardzo niski (około -20°C),
- temperatura krzepnięcia: około -60°C , co umożliwia użytkowanie w ekstremalnych warunkach,
- gęstość: lżejsze od Jet A lub Jet A-1.

3. Paliwa wojskowe: JP-5 i JP-8

Paliwa wojskowe, takie jak JP-5 i JP-8, zostały zaprojektowane specjalnie do zastosowań militarnych, gdzie wymagana jest wyjątkowa niezawodność i odporność na trudne warunki środowiskowe oraz operacyjne.

3.1 JP-5

JP-5 jest paliwem stosowanym głównie w operacjach morskich, np. w lotnictwie marynarki wojennej. Kluczowe właściwości JP-5:

- wysoka temperatura zapłonu: minimum 60°C , co znacznie zmniejsza ryzyko pożaru na lotniskowcach i w magazynach paliw,
 - odporność na korozję: dzięki specjalnym dodatkom JP-5 jest bardziej odporny na działanie soli morskiej i wilgoci.
- Zastosowanie: lotnictwo marynarki wojennej, w tym samoloty i śmigłowce operujące z pokładów statków.

3.2 JP-8

JP-8 to paliwo uniwersalne stosowane w siłach zbrojnych NATO. Jego charakterystyka obejmuje:

- odporność na warunki środowiskowe: paliwo jest przystosowane do pracy w ekstremalnie niskich temperaturach, dzięki czemu może być używane w arktycznych operacjach wojskowych.
- Dodatki funkcjonalne:
- środki przeciwutleniające i antykorozyjne, które chronią układy paliwowe,
 - substancje zapobiegające tworzeniu się lodu w instalacji paliwowej.

Zastosowanie: samoloty wojskowe, czołgi, generatory polowe i inne urządzenia, co czyni JP-8 paliwem uniwersalnym w działaniach zbrojnych.

3.3 Porównanie JP-5 i JP-8

Tabela 2. Porównanie paliwa JP5 i JP-8

Właściwość	JP-5	JP-8
Temp. zapłonu	min. 60°C	$\sim 38-43^{\circ}\text{C}$
Dodatki antykorozyjne	Tak	Tak
Zastosowanie	Lotnictwo morskie	Wojsko lądowe i lotnicze

Oba paliwa odgrywają kluczową rolę w działaniach wojskowych, jednak ich zastosowanie zależy od specyfiki operacji i wymagań związanych z bezpieczeństwem.

Niesprawności lotniczych silników turbinowych związane z jakością paliw

Współczesne lotnicze silniki turbinowe i stosowane paliwa spełniają rygorystyczne normy wynikające z wieloletniego doświadczenia konstruktorów oraz użytkowników. Postęp technologiczny powoduje, że wymagania w zakresie jakości paliw stale się zmieniają, a odpowiednie tolerancje muszą uwzględniać zmienność parametrów eksploatacyjnych.

Kluczowym wyzwaniem jest zapewnienie odpowiedniego doboru paliwa. W praktyce wybór nie zawsze jest idealny, co może prowadzić do awarii. Proces wyboru optymalnego paliwa obejmuje testy stacjonarne i w trakcie eksploatacji, jednak ich liczba jest ograniczona przez koszty i dostępne zasoby. W przypadku wykrycia nieprawidłowości, możliwe jest dostosowanie paliwa lub wymagań technicznych, co stanowi część ciągłego procesu doskonalenia.

W przeszłości jednym z najpoważniejszych problemów była obecność wody w paliwie, która mogła powodować oblodzenie układu paliwowego. Współczesne dodatki zapobiegają takim problemom, znacząco poprawiając bezpieczeństwo i niezawodność eksploatacji.

Obecnie jednym z głównych priorytetów pozostaje kontrola jakości paliw, minimalizacja ryzyka wynikającego z niedopasowania ich parametrów do wymagań silników oraz eliminacja potencjalnych wad materiałowych. Dbałość o te aspekty stanowi fundament nowoczesnego lotnictwa.

Tabela 3. Niesprawności turbinowych silników lotniczych związane z jakością paliwa

Obserwowana niesprawność silnika	Przyczyna niesprawności	Właściwości paliwa będące przyczyną niesprawności
Brak możliwości rozruchu silnika, rozruch niestabilny lub przewlekły	Niewłaściwe rozpylanie paliwa (zniekształcenie stożka rozpylania, niedostateczna jakość rozpylania) przez wtryskiwacze rozruchowe lub niezadawalająca praca świec zapłonowych. Zawisanie tłoczka zaworu automatu rozruchowego, smoka lub zaworu automatu przyspieszenia silnika lub zawisanie tłoczka zaworu stałego ciśnienia czy tłoczka zaworu zrzutowego. Za mały kąt rozpylania paliwa nieobejmujący zasięgiem rozpylonego paliwa strefy iskry świec zapłonowych	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna lub niedostateczne właściwości smarne i przeciwzużyciowe paliwa, lub zwiększona skłonność do nagarowania. Niedostosowanie kąta rozpylania paliwa do zmienionych właściwości paliwa: gęstości, lepkości, napięcia powierzchniowego, lotności

Tabela 3. Niesprawności turbinowych silników lotniczych związane z jakością paliwa

Obserwowana niesprawność silnika	Przyczyna niesprawności	Właściwości paliwa będące przyczyną niesprawności
Zmniejszenie prędkości obrotowej silnika na zakresie startowym	Zawisanie zaworu ogranicznika maksymalnej prędkości obrotowej pompy nurnikowej. Zawisanie jednego lub kilku nurników pompy paliwowej	Niedostateczne właściwości smarne i przeciwzużyciowe paliwa, obecność zanieczyszczeń mechanicznych lub wolnej wody w paliwie. Osady na powierzchniach cylindrycznych nurników
Zmniejszenie maksymalnej prędkości obrotowej silnika bez możliwości regulacji	Zwiększone zużycie części regulatora i wirnika pompy	Niedostateczne właściwości smarne i przeciwzużyciowe paliwa, skłonność paliwa do wywoływania korozji części lub powstawania kawern kavitacyjnych
Wahania maksymalnych obrotów silnika w granicach do 1000 obr/min w cyklu dwusekundowym	Obecność pęcherzy gazowych w instalacji paliwowej w granicach do 1000. Ograniczenie ruchliwości suwaków w układzie automatycznej regulacji pompy nurnikowej	Wysoka prężność par paliwa. Niedostateczna stabilność termooksydacyjna lub właściwości smarne i przeciwzużyciowe
Niemożliwość osiągnięcia większej prędkości obrotowej silnika niż prędkość biegu jałowego (50–70% prędkości obrotowej maksymalnej)	Brak hermetyczności kołnierza tłoczka zawirowywacza wskutek zużycia lub zesterzenia gumy kołnierzy, lub przedostania się produktów zużycia części. Zawieszenie zaworka kulowego przepustu paliwa	Zanieczyszczenia mechaniczne w paliwie lub zwiększona zawartość żywic. Oddziaływanie paliwa na gumę. niedostateczne właściwości smarne i przeciwzużyciowe paliwa, skłonność paliwa do wywoływania korozji
Brak możliwości osiągania prędkości obrotowej silnika powyżej 93–95% obrotów maksymalnych	Zużycie powierzchni czołowych nurników lub bieżni łożyska oporowego pompy lub zużycie ciężarków odśrodkowego regulatora obrotów. Zużycie powierzchni separatora pompy nurnikowej. Ograniczenie ruchliwości nurników	Niedostateczne właściwości smarne i przeciwzużyciowe paliwa. Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa, zwiększona zawartość żywic w paliwie
Zwiększenie czasu przyśpieszania silnika lub niestateczna praca (pompaż)	Zawisanie tłoczka zaworu stałego ciśnienia lub zaworu rozruchowego. Zanieczyszczenie dyszki opóźniania i pakietów dławiących ogranicznika maksymalnej prędkości obrotowej	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa lub obecność zanieczyszczeń mechanicznych w paliwie
Gaśnięcie silnika na ziemi lub w czasie lotu (samoczynnie lub przy przesunięciu dźwigni dławienia)	Zawieszenie zaworu stałego spadku ciśnienia. Przemieszczenie tulei suwaka sprzężenia zaworowego względem kadłuba regulatora. Zwiększone nagarowanie na powierzchniach czołowych wtryskiwaczy roboczych	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna lub właściwości smarne i przeciwzużyciowe paliwa, obecność zanieczyszczeń mechanicznych w paliwie, skłonność paliwa do wywoływania korozji. Zwiększona skłonność paliwa do nagarowania. Zmiana czoła spalania w komorze wskutek zmiany jakości paliwa (gęstość, wartość opałowa, lepkość, napięcie powierzchniowe)
Przepalanie rur żarowych komór spalania oraz łopatek kierownic turbiny	Pogorszenie warunków powstawania mieszaniny par paliwa i powietrza. Naruszenie rozkładu pola temperatur. Zacinanie się zaworów drenażowych komory spalania	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa lub zwiększona skłonność do nagarowania. Skłonność paliwa do wywoływania gazowej korozji
Ubytki w materiale rur żarowych komór spalania łopatek kierownic turbiny i łopatek roboczych turbiny	Wypalanie lub wypadanie (wyptukiwanie) materiału: rur żarowych komór spalania, łopatek kierownic, łopatek roboczych turbin. Rozwarstwianie się materiału łopatek roboczych turbiny, zwłaszcza na krawędziach natarcia	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa lub zwiększona skłonność do hangarowania. Zjawisko związane z jakością paliwa, lecz jego mechanizm nie jest ostatecznie wyjaśniony. Zwiększona agresywność korozyjna paliwa w strefie gazowej silnika prawdopodobnie związana z obecnością w nim mikroelementów V, Co, Mo, Ni. Ci Zwiększona zawartość siarki w paliwie
Niewłężanie dopalacza, brak ciśnienia w układzie paliwowym dopalacza, nie kontrolowane wyłączenie dopalacza, niezwłocznie dopalacza	Zacięcie stycznika elektrycznego. Brak hermetyczności zaworów elektromagnetycznych przełącznika dopalacza i barostatu. Zanieczyszczenie otworów komory zapłonowej dopalacza	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa lub właściwości smarne i przeciwzużyciowe lub obecność zanieczyszczeń mechanicznych w paliwie
Niedostateczna siła ciągu przy pracy silnika z dopalaczem	Zanieczyszczenie wtryskiwaczy paliwowych układu paliwowego dopalacza	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa

Tabela 3. niesprawności turbinowych silników lotniczych związane z jakością paliwa

Obserwowana niesprawność silnika	Przyczyna niesprawności	Właściwości paliwa będące przyczyną niesprawności
Spadek ciśnienia paliwa przed pompami wysokiego ciśnienia, przepływ paliwa bocznikiem z pominięciem filtra paliwa. Gaśnięcie silnika skutek obniżonego ciśnienia paliwa	Zanieczyszczenie wkładu filtracyjnego i w następstwie otwarcie zaworu bocznikowego. Oblodzenie filtra w układzie niskiego ciśnienia paliwa na wejściu do silnika	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa lub skłonność paliwa do wywoływania korozji. Obecność w paliwie zanieczyszczeń mechanicznych. Zawartość wolnej wody w paliwie. Brak dodatków zapobiegających wytrącaniu się kryształków lodu
Długotrwałe dymienie (20–30 min.) z wlotu powietrza i wylotu gazów spalinowych po zatrzymaniu silnika. Spadek ciągu silnika i zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa	Dopalenie pozostałości paliwa. Zanieczyszczenie sprężarki spalinami i zakłócenia w procesie spalania wywołane nagarem. Powstawanie skupisk nagaru na elementach rury żarowej	Zwiększona skłonność paliwa do hangarowania: zwiększona zawartość węglowodorów aromatycznych jedno lub dwupierscieniowych. Niewłaściwy skład frakcyjny paliwa. Podwyższona zawartość żywic w paliwie
Zawisanie prędkości obrotowej silnika w czasie płynnej zmiany obrotów lub przyspieszania	Zacinanie się elementów sterujących spadkami ciśnień w automatycznym systemie sterowania lub przyspieszania silnika wskutek osadzania się produktów żywicznych	Niedostateczna stabilność termooksydacyjna paliwa. Podwyższona zawartość żywic w paliwie

Paliwa alternatywne

Paliwa alternatywne do silników turbinowych to substancje zastępujące tradycyjne paliwa lotnicze, takie jak Jet A i Jet A-1. Ich użycie ma na celu zmniejszenie emisji szkodliwych gazów oraz ograniczenie zależności od paliw kopalnych.

1. Biopaliwa lotnicze (SAF – *Sustainable Aviation Fuels*) to nowoczesne paliwa produkowane z surowców odnawialnych, takich jak oleje roślinne, tłuszcze zwierzęce czy odpady leśne. Charakteryzują się możliwością redukcji emisji CO₂ nawet o 80%, co czyni je jedną z najbardziej ekologicznych alternatyw dla tradycyjnych paliw lotniczych. Przykładem biopaliwa jest HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), które stosują linie lotnicze KLM i Lufthansa.
2. Paliwa syntetyczne (e-paliwa) wytwarzane są w procesie łączenia wodoru i dwutlenku węgla przy użyciu energii odnawialnej. Ich największą zaletą jest neutralność węglowa oraz brak emisji siarki podczas spalania, co czyni je ekologicznym rozwiązaniem dla przemysłu lotniczego. Przykładem takiego paliwa jest e-fuel produkowany przez firmę Synhelion, wspierany przez Lufthansę.
3. Wodór jako paliwo lotnicze powstaje dzięki elektrolizie wody z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Jego spalanie nie generuje emisji dwutlenku węgla, a jedynie parę wodną, co sprawia, że jest idealnym rozwiązaniem w dążeniu do zerowej emisji. Przykładem innowacji w tej dziedzinie jest silnik wodorowy opracowywany przez firmę ZeroAvia.
4. Gaz ziemny (LNG – *Liquefied Natural Gas*) to skroplona forma gazu ziemnego, która oferuje niższe emisje CO₂ i NO_x w porównaniu do paliw tradycyjnych. Dzięki temu LNG może być stosowane jako paliwo przejściowe w procesie transformacji energetycznej lotnictwa. Przykładem są silniki GE Aviation, które można przystosować do zasilania LNG.
5. Diesel lotniczy to wysokiej jakości olej napędowy wykorzystywany w lekkich samolotach. Jego zaletami są

szeroka dostępność oraz wysoka wydajność energetyczna, co czyni go praktycznym rozwiązaniem w przypadku mniejszych maszyn lotniczych. Przykładem zastosowania jest silnik RED A03, używany w lekkich samolotach, oraz turbośmigłowy Pratt & Whitney Canada PW150.

Każde z tych paliw wymaga adaptacji technologii silników lub infrastruktury, ale obiecują one znaczne korzyści środowiskowe.

Ciekawostka o paliwach syntetycznych

Lockheed Martin, producent myśliwców F-35 (ryc. 4.) zażądał możliwości wykorzystania do 50% syntetycznego paliwa lotniczego (SATF) w tych nowoczesnych samolotach. Decyzję poprzedziły szczegółowe testy, które wykazały, że paliwo to spełnia wszystkie normy bezpieczeństwa i wydajności wymagane w lotnictwie wojskowym.



Ryc. 4. Wielozadaniowy samolot myśliwski piątej generacji Lockheed Martin F-35

Norwegia jako pierwszy kraj przeprowadziła testowe loty F-35 z wykorzystaniem mieszanki SATF, podkreślając swoje zaangażowanie w redukcję emisji i uniezależnienie od tradycyjnych źródeł paliwa. Chociaż myśliwce nadal emitują spaliny, nowa technologia pozwala ograniczyć ich ślad węglowy, a jednocześnie zwiększa bezpieczeństwo energetyczne kraju.

Syntetyczne paliwa lotnicze powstają m.in. w procesie Fischera-Tropscha, który przekształca tlenek węgla i wodór w ciekłe węglowodory. Surowcami mogą być gaz ziemny, biomasa czy nawet odpady przemysłowe, co czyni tę metodę bardziej zrównoważoną. Niestety, wysokie koszty produkcji oraz brak odpowiedniej infrastruktury sprawiają, że SATF wciąż jest rzadko stosowane na szeroką skalę.

Mimo to testy F-35 pokazują, że połączenie nowoczesnych technologii militarnych z ekologicznymi rozwiązaniami jest możliwe. W miarę rozwoju paliw syntetycznych mogą one odegrać kluczową rolę nie tylko w lotnictwie wojskowym, ale także cywilnym, przyczyniając się do bardziej zrównoważonego rozwoju w przyszłości.

Podsumowanie

Silniki turbinowe, wykorzystywane w lotnictwie i energetyce, wymagają paliw o wysokiej jakości, które zapewniają optymalną wydajność, bezpieczeństwo i trwałość ich pracy. Kluczowe parametry paliw, takie jak wartość opałowa, stabilność termiczna, właściwości smarne oraz odporność na zamarzanie, mają bezpośredni wpływ na funkcjonowanie tych jednostek napędowych. Zanieczyszczenia czy nieodpowiednia specyfikacja paliwa mogą prowadzić do problemów eksploatacyjnych, takich jak korozja, odkładanie się osadów czy zwiększone zużycie podzespołów.

W obliczu rosnących wymagań ekologicznych oraz wyczerpywania się paliw kopalnych coraz większe znaczenie zyskują paliwa alternatywne. Biopaliwa, paliwa syntetyczne oraz wodór oferują potencjał redukcji emisji gazów

cieplarnianych i zmniejszenia zależności od ropy naftowej. Jednak ich zastosowanie wymaga rozwoju technologii silników, dostosowania infrastruktury oraz rozwiązania problemów związanych z produkcją i dystrybucją. Przykładowo, biopaliwa drugiej generacji produkowane z odpadów rolniczych stanowią bardziej zrównoważoną alternatywę, ale wciąż mierzą się z ograniczeniami produkcyjnymi.

Podsumowując, jakość i rodzaj paliwa są kluczowe dla efektywnego działania silników turbinowych. Wdrożenie paliw alternatywnych wymaga dalszych badań, inwestycji i współpracy między przemysłem, nauką oraz rządami państw, co pozwoli sprostać wyzwaniom technologicznym, ekologicznym i ekonomicznym współczesnego świata.

Bibliografia:

- [1] Górka, K., Górski, W. (1986). *Materiały pędne i smary*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [2] Janeba-Bartoszewicz, E. (2019). Analiza właściwości paliw stosowanych współcześnie w silnikach statków powietrznych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, 20(1-2), s. 251-254. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-af49730e-0643-4069-b931-d430c6f818be> [dostęp: 25.06.2025].
- [3] Łysoń, M. (2025, 19 stycznia). *Historyczna misja norweskich F-35. Świat patrzy z niedowierzaniem* <https://www.chip.pl/2025/01/wojskowy-samolot-mysliwski-f-35-paliwo-satf> [dostęp: 25.06.2025].
- [4] Placha-Hetman, K. (2017, 14 listopada). *O paliwach lotniczych dla osób ciekawych* <https://polot.net/pl/paliwa-lotnicze-2017r-556> [dostęp: 25.06.2025].