

Mjr dr inż. Ryszard Chachurski
Dr hab. inż. Grzegorz Kowaleczko
Wojskowa Akademia Techniczna

Wpływ oblodzenia statków powietrznych na pracę silników turbinowych

Na wystąpienie oblodzenia statku powietrznego oraz jego zespołu napędowego ma wpływ wiele czynników, z których głównymi są: temperatura, względna wilgotność powietrza, wodność chmur, średnia średnica kropeł, a także poziome i pionowe rozmiary chmur oraz prędkość i wysokość lotu statku powietrznego. Meteorologiczne warunki sprzyjające oblodzeniu charakteryzują się obecnością zawieszonych w powietrzu przechłodzonych kropeł wody lub kryształków lodu w formie chmur, mgły, deszczu czy mokrego śniegu. Poruszający się statek powietrzny wyprowadza znajdujące się w opływającym go powietrzu przechłodzone krople wody ze stanu chwiejnej równowagi, powodując ich zamarzanie na powierzchniach statku. Badania oblodzenia statków powietrznych w wielu krajach prowadzone są już od lat 30. XX wieku. Wyniki tych badań oraz analizy statystyczne wskazują, że zjawisko oblodzenia samolotów podczas lotu jest zjawiskiem przypadkowym, występującym z różnym prawdopodobieństwem dla różnych rodzajów chmur, np. podczas lotu statku powietrznego wewnątrz chmur typu stratocumulus, gdy temperatura otoczenia jest ujemna, prawdopodobieństwo oblodzenia statku należy do najwyższych i wynosi 85% przy prędkości narastania powłoki lodowej od 0,5 do 2,0 mm/min. Oblodzenie statków powietrznych jest groźne nawet dla najnowocześniejszych konstrukcji, przykładem może być wyłączenie się obu silników Rolls-Royce'a *Trent 800* samolotu *Boeing 777* podczas lądowa-

nia – instalacja przeciwoblozeniowa samolotu nie włączyła się z powodu niezadziałania czujników oblodzenia.

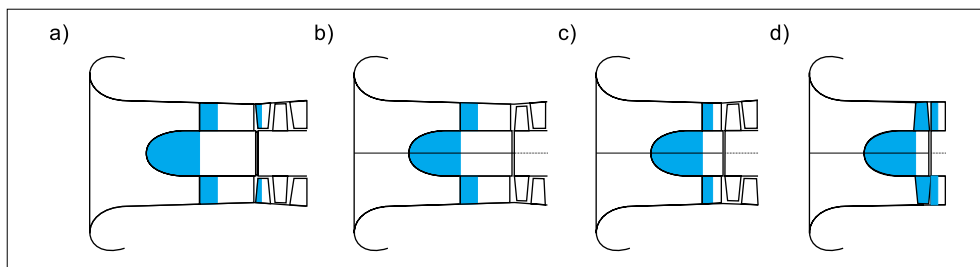
Wpływ oblodzenia na lotnicze silniki turbinowe

W warunkach sprzyjających powstawaniu oblodzenia lód tworzy się nie tylko na elementach płatowca, ale także na elementach zespołów napędowych statku powietrznego, takich jak nieruchome elementy wlotu, kanału wlotowego, łopatek wlotowego wieńca kierownic, kołpaka ciała centralnego na wlocie do sprężarki i żeber przedniej podpory, a także łopatek wirnikowych i kierowniczych pierwszego stopnia sprężarki (rysunek). Tworzenie się powłoki lodowej na żebrach wlotowych i łopatkach ma charakter podobny do charakteru obladzania powierzchni nośnych statku powietrznego, jednak z powodu znacznie mniejszych rozmiarów tych elementów konstrukcyjnych wywołuje większe skutki. Tworzenie się powłoki lodowej na powierzchni kanału wlotowego i bezpośrednio na wlocie do sprężarki silnika zmienia geometrię i przekrój poprzeczny kanału przepływowego, powodując zmianę charakteru przepływu w kanale wlotowym oraz zmianę parametrów strumienia powietrza na wlocie do sprężarki. Na wystąpienie oblodzenia szczególnie wrażliwe są silniki ze sprężarkami osiowymi ze względu na ich konstrukcję i warunki pracy. Wzrost oporów przepływu prowadzi do zmniejszenia masowego natężenia przepływu powietrza

oraz sprężu, powodując spadek mocy silnika. Po zmniejszeniu masowego natężenia przepływu powietrza, aby zachować moc silnika śmigłowca niezbędną do utrzymywania stałej prędkości obrotowej wirnika nośnego, następuje zwiększenie ilości paliwa podawanego do komory spalania, co prowadzi do znacznego wzrostu temperatury gazów przed turbiną. Może to spowodować przegrzanie elementów turbiny lub wyłączenie silnika przez układ ograniczający temperaturę przed turbiną. Ponadto asymetryczne oblodzenie łopatek wlotowego wieńca kierownic może zwiększyć nierównomierność pola temperatur przed turbiną. Zwiększenie ilości paliwa podawanego do komory spalania w połączeniu ze zmniejszeniem masowego natężenia przepływu powietrza powoduje zwiększenie strat ciepłych w wyniku nagrzewania się konstrukcji oraz zwiększenie ilości niespalonego paliwa unoszonego z gazami wylotowymi, co zwiększa jednostkowe zużycie paliwa. Zmniejszenie masowego natężenia przepływu, nierównomierność obwodowa kanału przepływowego, zmiana geometrii wlotu i profilu łopatek wlotowego wieńca kierownic oraz wzrost temperatury gazów przed turbiną mogą spowodować niestateczną pracę sprężarki, a w konsekwencji – niebezpieczny wzrost drgań silnika i zerwanie płomienia w komorze spalania.

Łopatki wirnikowe, ze względu na działanie sił odśrodkowych, w pewnym stopniu są zabezpieczone przed oblodzeniem. Lód jednak może odkładać się na nich i tworzyć po-

włoki o znacznej grubości. Zjawisko to może występować zwłaszcza wtedy, kiedy wirnik pracuje z niewielkimi prędkościami obrotowymi. Nierównomierne tworzenie się powłoki lodowej na powierzchni łopatek wirnikowych pierwszego stopnia sprężarki i nierównomierne odrywanie się tej powłoki zwiększa niewyrównoważenie wirnika i zmienia charakter opływu strumieniem powietrza, co może spowodować wzrost drgań silnika i w następstwie uszkodzenie łożysk. Maleją też luzy wierzchołkowe, co powoduje uszkodzenia łopatek wskutek zaczeplania ich wierzchołków o ścianki kadłuba sprężarki. Narośla lodowe na łopatkach wirnikowych lub kierowniczych, gdy osiągną znaczną grubość, mogą uszkadzać krawędzie natarcia poprzedzających wieńców łopatek lub krawędzie spływu następnych. Odrywające się od elementów wlotu kawałki twardego lodu, porywane przez strumień powietrza, powodują wgniecenia na krawędziach natarcia łopatek wirnikowych. Wgniecenia te pod wpływem drgań mogą się zmienić w pęknięcia, a działające siły odśrodkowe mogą doprowadzić do urwania się łopatek i zniszczenia silnika. Przyczyną odrywania się kawałków lodu od powierzchni może być także zbyt późne włączenie instalacji przeciwołodziwej – zwiększanie się temperatury ogrzewanych elementów wlotu powoduje zmniejszenie przyczepności powłoki lodowej do ich powierzchni. Lód może tworzyć się także na czujnikach instalacji sterowania silnikami. Wpływa to na powstawanie błędnych sygna-



Najbardziej narażone na oblodzenie elementy silnika turbinowego w zależności od konfiguracji silnika:
a – nieruchome ciało centralne, żebra wlotowe, wlotowy wieńec kierownic, wieńec wirnikowy, wieńec kierownic;
b – nieruchome ciało centralne, żebra wlotowe, wieńec wirnikowy, wieńec kierownic,
c – nieruchome ciało centralne, wlotowy wieńec kierownic, wieńec wirnikowy, wieńec kierownic,
d – wirujący kołpak, wieńec wirnikowy, wieńec kierownic

łów, wykorzystywanych np. do obliczania ciągu niezbędnego do lotu przez systemy typu FADEC.

Pojawienie się oblodzenia silnika lub nieefektywnego działania instalacji przeciwo-
blodzeniowej silnika można rozpoznać po znacznym wzroście temperatury przed turbiną, zmniejszeniu prędkości obrotowej wirnika oraz zwiększeniu drgań lub wystąpieniu objawów niestatecznej pracy sprężarki. Należy wtedy jak najszybciej wyjść ze strefy oblodzenia lub wyłączyć silnik.

Przeciwdziałanie oblodzeniu lotniczych silników turbinowych

Opisane oddziaływanie oblodzenia na zespoły napędowe statków powietrznych jest od dawna znane, a stosowane współcześnie instalacje przeciwo-
blodzeniowe skutecznie zapobiegają oblodzeniu. Elementy wlotu, kanału wlotowego i wlotowej części sprężarki najczęściej są ogrzewane powietrzem o temperaturze do 250°C pobieranym ze sprężarki. Uważa się, że działanie instalacji przeciwo-
blodzeniowej jest w pełni efektywne, gdy od-
ladzane powierzchnie nagrzewane są do temperatury 80 - 100°C. Elementy wlotu płatowca mogą być ogrzewane także za pomocą instalacji elektrycznej. Instalacje przeciwo-
blodzeniowe włączane są automatycznie – po otrzymaniu przez mechanizm wykonawczy sygnału z czujnika oblodzenia, lub ręcznie – po stwierdzeniu przez załogę zaistnienia warunków do wystąpienia oblodzenia lub po zaświeceniu się lampki sygnalizacyjnej w kabine załogi. Podczas lotu w warunkach oblodzenia instalacja przeciwo-
blodzeniowa silników powinna być włączona, przy czym należy ją wyłączyć przed wejściem w strefę oblodzenia i wyłączyć po opuszczeniu tej strefy. Najczęściej stosowane instalacje przeciwo-
blodzeniowe zasilane powietrzem pobieranym ze sprężarki mają (w porównaniu z instalacją elektryczną) dużą bezwładność cieplną z powodu powolnego nagrzewania się chronionych powierzchni, dlatego, przewidując możliwość wystąpienia warunków umożliwiają-

cych oblodzenie, trzeba je włączać wcześniej. Efektywność powietrznej instalacji przeciwo-
blodzeniowej uzależniona jest od zakresu pracy silnika, konieczne może być zatem zwiększenie zakresu pracy silnika, jeśli efektywność działania instalacji jest niewielka.

Należy pamiętać, że włączanie instalacji przeciwo-
blodzeniowej powoduje jednocześnie obniżenie mocy silnika z powodu podwyższenia temperatury powietrza na wlocie, co zmniejsza jego masowe natężenie przepływu. Nieuzasadnione używanie instalacji przeciwo-
blodzeniowej może prowadzić do przegrzewania odładzanych elementów i w konsekwencji do zmniejszenia ich wytrzymałości. Pewnym, a zarazem ekonomicznym sposobem ogrzewania niektórych elementów zespołu napędowego jest wykorzystanie gorącego oleju odsysanego z podpór silnika do integralnego zbiornika oleju, którego ścianki stanowią wewnętrzne ścianki kanału wlotowego. Ponadto na elementach wlotu silnika i przedniej części sprężarki stosuje się specjalne powłoki ograniczające możliwość osadzania się lodu. W niektórych statkach powietrznych płatowcowe wloty do silników wyposażone są w pneumatyczną instalację przeciwo-
blodzeniową, której działanie polega na kruszeniu powstającej powłoki lodowej podczas odkształcania elastycznego pokrycia wlotu.

Skutki zassania wody, śniegu lub lodu do silnika turbinowego

Mniej znanym zjawiskiem mogącym się pojawić na skutek oblodzenia zespołów napędowych jest nagłe zassanie do wnętrza kanału przepływowego silnika turbinowego płata śryżu (początkowe stadium powstawania pokrywy lodowej – błoto pośniegowe) i śniegu, wody czy gradu, co może zgasić płomień w komorze spalania i spowodować niespodziewane wyłączenie silnika, a nawet wszystkich silników. I choć zassanie niewielkiej ilości wody zwiększa sprawność silników oraz ich moc dzięki usprawnieniu obiegu termodynamicznego i zwiększeniu masowego natężenia przepływu, to zassanie większej ilo-

ści wody powoduje niebezpieczeństwo zgaśnięcia silnika, gdyż woda, która nie odparuje w sprężarce, może odparować w sposób gwałtowny, pseudodetonacyjny i zgasić płomień w komorze spalania. Badania silników samolotu *Boeing B767* pozwoliły dowiedzieć, że do zgaszenia płomienia w komorze spalania wystarcza przedostanie się lodu w ilości równoważnej 350 cm³ wody. Wykonane w 1968 roku badania silników *Allison 250* (których odpowiednikiem są silniki *GTD 350*) wykazały, że zassanie do wlotu 20 gramów śniegu powoduje niestateczną pracę sprężarki, a zassanie 30 gramów śniegu i więcej zawsze powoduje wyłączenie silnika. Efektywnymi urządzeniami zabezpieczającymi przed dostawaniem się do kanału przepływowego silnika bryłek lodu i płatów sryżu (oraz śniegu, wody czy gradu) są bezwładnościowe odpylacze powietrza wlotowego lub wielofunkcyjne układy dolotowe, które, pracując w trybie przeciwołodziowym, usuwają z powietrza wlotowego na zewnątrz wszystkie cząstki lodu.

Śmigłowce eksploatowane podczas opadów śniegu muszą być wyposażone w specjalne deflektory zabezpieczające wloty do silników. Instalacje zapłonowe niektórych silników podczas lotu w warunkach oblodzenia mogą pracować w trybie ciągłym, aby natychmiast rozplomienić paliwo w przypadku przerwania spalania na skutek zassania lodu.

Warunki sprzyjające oblodzeniu silników turbinowych

Należy pamiętać, że w odróżnieniu od oblodzenia płatowca, które następuje w ujemnych temperaturach otaczającego powietrza, oblodzenie zespołów napędowych może się pojawić już w dodatnich temperaturach otoczenia, wynoszących od +5 do +10°C. Przyczyną tego są duże prędkości przepływu powietrza w kanale wlotowym i zachodzące z tego powodu obniżanie temperatury powietrza w tym kanale. Jest to szczególnie istotne podczas pracy silnika na ziemi lub przy niewielkich prędkościach statku powietrznego i du-

żych prędkościach obrotowych wirnika (w przypadku silników śmigłowców). Z tego względu, w celu zwiększenia bezpieczeństwa lotu, w kanałach wlotowych silników należy umieszczać sygnalizatory oblodzenia działające niezależnie od sygnalizatorów płatowca, a ponadto, jeśli to możliwe, sygnalizatory oblodzenia należy ustawiać w kanałach wlotowych silników. Przepisy FAR definiują bowiem warunki oblodzenia dla zespołów napędowych jako takie, w których temperatura otoczenia (OAT) na ziemi lub podczas startu, albo temperatura spiętrzenia w locie (TAT) wynosi 10°C lub mniej i widoczna jest wilgoć w każdej postaci (np. chmury, mgła z widocznością do 1 mili lub mniejszą, deszcz, śnieg, deszcz ze śniegiem, kryształki lodu). Warunki sprzyjające oblodzeniu zachodzą także na ziemi lub podczas startu, gdy temperatura otoczenia wynosi 10°C lub jest niższa i gdy płaszczyzny postojowe, drogi kołowania i drogi startowe są pokryte śniegiem, lodem, stojącą wodą lub błotem pośniegowym, które mogą zostać zassane do kanałów przepływowych silników lub mogą zamarać na silnikach, osłonach lub czujnikach silników.

Wnioski z badań prowadzonych w WAT

W ekspertyzie dotyczącej możliwości oblodzenia elementów zespołów napędowych statków powietrznych, wykonanej w Instytucie Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej na przełomie 2003 i 2004 roku, stwierdzono, że oblodzenie wlotów do silników nie jest zjawiskiem odosobnionym i wielokrotnie było przyczyną wyłączeń silników turbinowych w czasie lotu statków powietrznych, co prowadziło do wypadków i katastrof. Uznano, że działanie czujnika oblodzenia *RIO-3* może być wiarygodne dla silnika śmigłowca jedynie wtedy, gdy czujnik znajduje się we wlocie silnika. W instrukcjach eksploatacji w powietrzu statków powietrznych wyposażonych w silniki turbinowe (dotyczy to statków powietrznych wszystkich typów) zaproponowa-



Oblodzenie wlotu turbinowego silnika śmigłowca. Zerwanie części powłoki lodowej z ciała centralnego doprowadziło do zgaśnięcia silnika

no rozgraniczenie temperatury początku oblodzenia dla płatowca i silnika (płatowiec +5°C, silnik +10°C). Wskazano, że pożądane jest zainstalowanie czujnika temperatury w okolicy centralnego ciała wlotu silnika. Czujnik powinien współpracować z instalacją przeciwooblodzeniową, a jeżeli jest to niemożliwe – może być on autonomicznym, dodatkowym źródłem informacji o oblodzeniu (np. lampka sygnalizacyjna w kabinie pilota). Instytut Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej może zaprojektować i wykonać prototyp takiego czujnika. Zasugerowano rozważenie możliwości wyposażenia w odpylacze powietrza wlotowego tych śmigłowców, które ich

nie mają, a także przebadanie odpylaczy pod kątem separowania lodu i śniegu zasysanego do wlotów. Projekt i prototyp takiego odpylacza można wykonać w ITL WAT. Zaproponowano także prowadzenie w ITL WAT szkoleń dla personelu latającego i technicznego, np. w formie kursów doskonalących na tematy dotyczące oblodzenia statków powietrznych i jego skutków (zdjęcie).

Pracownicy Instytutu Techniki Lotniczej Wydziału Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej są gotowi do opracowania instrukcji dotyczącej oblodzenia statków powietrznych, a także do uczestniczenia w badaniach oblodzenia statków powietrznych w locie.

Bibliografia

1. *Aircraft Icing Handbook*. Civil Aviation Authority of New Zealand, 2000.
2. Braithwaite G. i in.: *Aviation Meteorology*. Materiały University of New South Wales, Australia.
3. Domotenko N. T.: *Awiacyonnyje silowyje ustanowki*. Transport. Moskwa 1970.
4. *Flight in Icing Conditions. Pilot Guide*. Federal Aviation Administration, 2002.
5. Fieldman E. L.: *Osnovy konstrukcyj awiacyonnych dwigatelej*. Transport. Moskwa 1970.
6. Gajewski T.: *Turbinowe napędy lotnicze. Podstawy teorii i eksploatacji dla pilota. Podręcznik*. DWL, Poznań 1984.
7. *Ice Ingestion Causes Both Engines to Flame Out During Air-taxi Turboprop's Final Approach*. Flight Safety Foundation, Vol. 56. No 2, 1999.
8. Mazin I. P.: *Fizyceskije osnovy obledienienija samolotow*. Gidromieteorologičeskoje izdatielstwo, Moskwa 1957.
9. *Subpart E – Powerplant. Section 6. Induction System*. Federal Aviation Regulation.
10. Tieniszew R. H.: *Protiwooblodienitielnyje sistemy letatielnych apparatow. Osnovy projektirowanija i metody ispytanij*. Maszynostrojenie, Moskwa 1967.
12. *2002-NM-318-AD Docket No.; Amendment 39-13027; AD 2003-03-03*. Rules and Regulations, Federal Aviation Administration, 2003.

Icing of intakes of turbine engines has often been the reason for the engines disengaging during flights, which led to accidents. Scientists from the Institute of Aviation Technology at the Military University of Technology have declared their readiness to design a sensor which would record temperature in the intake and at the same time it would cooperate with the anti-icing system.