

ZAGROŻENIA OBLODZENIEM SILNIKÓW TURBINOWYCH

Ryszard Chachurski
Wojskowa Akademia Techniczna

Streszczenie

W artykule, na podstawie wyników analiz i prac badawczych prowadzonych w ITL WAT, przedstawiono Czytelnikowi problematykę oblodzenia lotniczych silników turbinowych. Scharakteryzowano warunki sprzyjające oblodzeniu ze szczególnym podkreśleniem różnic między procesem obladzania płatownca a wlotu silnika. Przypomniano o konieczności ręcznego uruchamiania instalacji przeciwooblodzeniowych silników, wynikającej z rozmieszczenia czujników instalacji przeciwooblodzeniowych poza kanałami przepływowymi ich wlotów. Opisano tworzenie się osadów lodowych na elementach silnika wskutek wsysania przechłodzonych kropeł wody do wlotów, a także możliwości samoczynnego wyłączenia się silnika po zassaniu wody, śniegu lub lodu do sprężarki lub komory spalania silnika. Pokazano sposoby zapobiegania oblodzeniu stosowane w odrzutowych oraz śmigłowych i śmigłowcowych silnikach turbinowych. Podano wskazówki pozwalające na wczesne zauważenie przez pilotów objawów oblodzenia silników i sformułowano zalecenia dla nich.

Słowa kluczowe: oblodzenie, wlot, sprężarka, instalacja przeciwooblodzeniowa

Podatność lotniczych silników turbinowych na oblodzenie jest różna w zależności od rodzaju statku powietrznego, konstrukcji silnika, umiejscowienia wlotów na płatowncu itp. Wszystkie lotnicze silniki turbinowe wyposażone są w instalacje przeciwooblodzeniowe, jednak zawsze należy się liczyć z możliwością wystąpienia ich oblodzenia w określonych warunkach atmosferycznych. Znajomość zjawisk związanych z oblodzeniem lotniczych zespołów napędowych jest tym bardziej ważna, że wśród przyczyn poważnych zdarzeń lotniczych związanych z tym rodzajem oblodzenia istotną rolę odgrywa czynnik ludzki. Wynika to przede wszystkim z faktu, że w odróżnieniu od oblodzenia płatownca, oblodzenie elementów zespołów napędowych statków powietrznych może zachodzić w dodatnich temperaturach otoczenia bez żadnych objawów oblodzenia płatownca możliwych do zaobserwowania przez załogę.

W Polsce badania zjawisk oblodzeniowych lotniczych silników turbinowych prowadzone są od roku 2004 w Instytucie Techniki Lotniczej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

WARUNKI SPRZYJAJĄCE OBLODZENIU SILNIKÓW TURBINOWYCH

Czynnikiem najbardziej sprzyjającym oblodzeniu jest obecność w atmosferze przechłodzonych kropeł wody. W praktyce użytkowania lotniczych silników turbinowych okazuje się, że do ich obladzania dochodzi także w warunkach, w których nie zachodzi obladzanie płatownca i zazwyczaj przyjmuje się, że do oblodzenia silników turbinowych może dojść, jeśli temperatura otoczenia na ziemi lub podczas startu albo temperatura spiętrzenia w locie jest równa $+10^{\circ}\text{C}$ lub niższa i widoczna jest wilgoć w każdej postaci (np. jako chmury, mgła z widocznością 1 mili lub

mniejszą, deszcz, śnieg, deszcz ze śniegiem, kryształki lodu). Do oblodzenia może również dochodzić podczas pracy silników na ziemi lub podczas startu, gdy temperatura otoczenia wynosi $+10^{\circ}\text{C}$ lub jest niższa i gdy miejsca postoju, drogi kołowania i drogi startowe są pokryte śniegiem, lodem, stojącą wodą lub błotem pośniegowym - mogą one zostać zassane z powierzchni lotniska do kanałów przepływowych silników i mogą zamarzać na elementach wlotów, wlotowych częściach wentylatorów lub sprężarek oraz na osłonach lub czujnikach silników.

Podczas lotów na dużych wysokościach przyczyną oblodzenia silników jest najprawdopodobniej obecność kryształków lodu, które najczęściej pojawiają się na tych wysokościach w wyniku silnych pionowych ruchów powietrza w strefach burz.

Możliwość oblodzenia elementów silników turbinowych w dodatnich temperaturach wynika z faktu, że jeżeli silniki statku powietrznego pracują na ziemi lub prędkość jego lotu jest mniejsza od prędkości strumienia powietrza we wlocie, wówczas temperatura wewnątrz wlotu jest zawsze niższa od temperatury powietrza atmosferycznego. Jeżeli pole powierzchni przekroju poprzecznego wlotu zmniejsza się, wówczas zachodzi wzrost prędkości strumienia powietrza, co prowadzi do obniżenia temperatury powietrza, a w konsekwencji powoduje kondensację par wody i jej zamarzanie na elementach wlotu.

Wykorzystując równanie zachowania energii, równanie ciągłości przepływu oraz równanie stanu gazu doskonałego na podstawie znajomości parametrów lotu, geometrii wlotu oraz masowego natężenia przepływu powietrza można wyznaczyć temperaturę (statyczną) T_A [K] w dowolnym przekroju wlotu z zależności:

$$T_A = T_H + \frac{V^2 - c_A^2}{2c_p},$$

gdzie T_H – temperatura powietrza atmosferycznego [K], V – prędkość lotu statku powietrznego [m/s], c_A – prędkość przepływu strumienia powietrza w odpowiednim przekroju wlotu [m/s], c_p – ciepło właściwe powietrza [J/kgK] (dla $T_H=0^{\circ}\text{C}$ ma wartość 1004 J/kgK).

W zależności od konstrukcji wlotu temperatura w jego kanale przepływowym może być niższa nawet o 20°C od temperatury otoczenia.

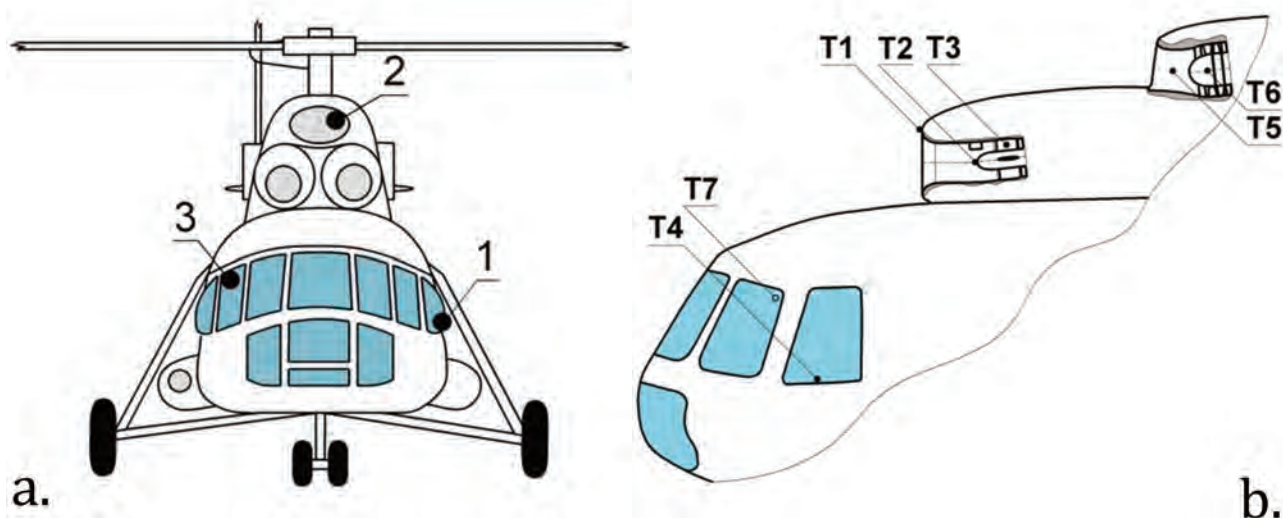
Z prawdopodobieństwem wystąpienia oblodzenia silnika turbinowego należy się liczyć szczególnie podczas pracy silnika na ziemi lub przy niewielkich prędkościach lotu (do $Ma \approx 0,5$) i dużych prędkościach obrotowych wirnika silnika, gdy nie zachodzi nagrzewanie aerodynamiczne strumienia powietrza na wlocie, a prędkości przepływu strumienia powietrza we wlocie są duże. Z kolei podczas zniżania lotu statku powietrznego także może dojść do oblodzenia silników wskutek zbyt małej wydajności instalacji przeciwooblodzeniowej, której skuteczność (w przypadku najczęściej stosowanych instalacji zasilanych powietrzem ze sprężarki) zależy od zakresu pracy silnika.

Rozpatrując możliwość wystąpienia oblodzenia silników statku powietrznego należy brać pod uwagę fakt, iż czujniki instalacji przeciwooblodzeniowej na przeważającej większości nawet nowoczesnych statków powietrznych są rozmieszczane na płatowcu, natomiast nie ma ich we wlotach silników. Takie umieszczenie czujników powoduje, że do oblodzenia elementów zespołu napędowego może dojść pomimo braku sygnalizacji, a także, co istotniejsze, instalacja przeciwooblodzeniowa silników może nie zostać włączona w odpowiednim czasie, mimo ustawienia w automatyczny tryb pracy (tryb czuwania).

Należy przy tym pamiętać, że włączenie instalacji przeciwooblodzeniowej, zwłaszcza zasilanej powietrzem pobieranym ze sprężarki, obniża osiągi silników.

Różnice pomiędzy warunkami opływu typowo rozmieszczanych czujników instalacji przeciwooblodzeniowej a warunkami panującymi w kanale przepływowym silnika można pokazać na przykładzie śmigłowca Mi-8 (rys. 1.a). Załoga śmigłowca ma do dyspozycji wizualny wskaźnik oblodzenia znajdujący się po lewej stronie kabiny (1). Instalacja przeciwooblodzeniowa (podczas

czuwania w trybie automatycznym) włączana jest po wykryciu oblodzenia przez izotopowy czujnik oblodzenia RIO-3 (2) umieszczony we wlocie wentylatora chłodzącego przekładni głównej śmigłowca. Ponadto załoga może odczytać temperaturę powietrza atmosferycznego na termometrze, którego czujnik zamocowany jest na oszkleniu kabiny po jej prawej stronie (3).

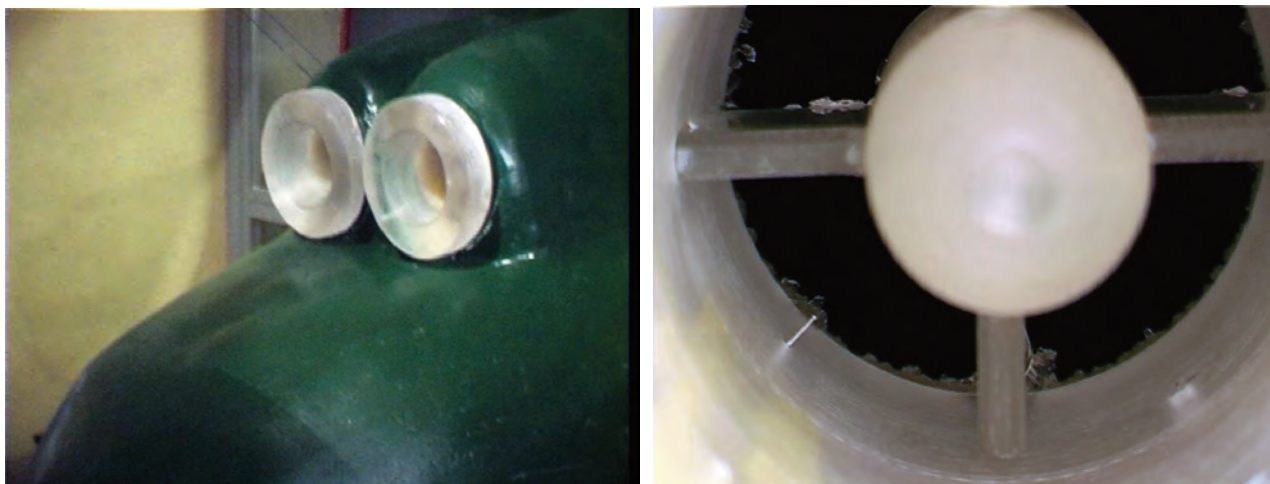


Rys.1. Rozmieszczenie czujników informujących o potencjalnym oblodzeniu śmigłowca Mi-8 (a) oraz punkty pomiaru temperatury podczas badań eksperymentalnych (b): wizualny wskaźnik oblodzenia (1), czujnik RIO-3 instalacji przeciwooblodzeniowej (2), termometr (3); T1-T7 punkty pomiaru temperatury

W ITL WAT, dla ustalenia przyczyn wypadku śmigłowca Mi-8 z premierem L. Millerem na pokładzie, przeprowadzono szereg badań mających na celu określenie różnic pomiędzy temperaturą otaczającego śmigłowiec powietrza a temperaturami w różnych charakterystycznych punktach rozmieszczonych zarówno na płatowcu, jak i we wnętrzu kanałów dolotowych silników śmigłowca (rys. 1b). W ramach badań wykonano między innymi obliczenia termogazodynamiczne wlotów podczas pracy silników śmigłowca w warunkach statycznych na ziemi, a także podczas lotu śmigłowca z prędkością 200 km/h przy wykorzystaniu uproszczonego, jednowymiarowego modelu silnika. Ponadto dokonano pomiarów rozkładu temperatur w charakterystycznych punktach kanału przepływowego silnika podczas prób silnika TW2-117AG w warunkach oblodzenia w hamowni Wojskowych Zakładów Lotniczych nr 3 w Dęblinie, natomiast w tunelu aerodynamicznym niskich temperatur ITL WAT prowadzone były badania specjalnie zbudowanego modelu śmigłowca. Pracę jednego z jego silników odtwarzano poprzez odsysanie z niego powietrza.

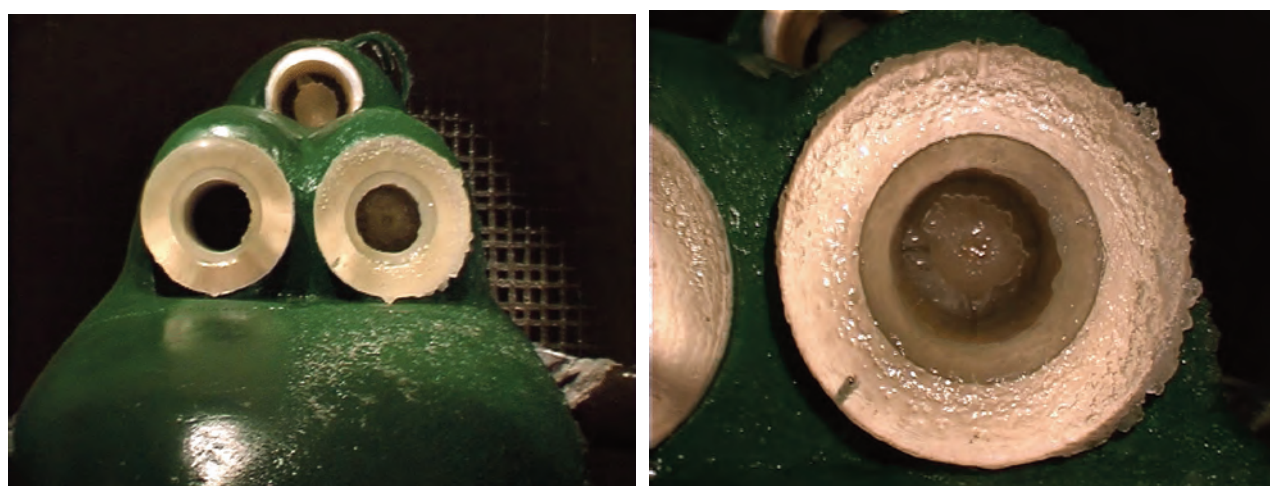
Podczas odtwarzania w tunelu aerodynamicznym warunków lotu w chmurach (wodność chmur symulowana była wtryskiwaniem przez atomizery dawek wody do tunelu) przy temperaturze otoczenia $+2^{\circ}\text{C}$ nie wystąpiło oblodzenie w rejonie czujnika instalacji przeciwooblodzeniowej oraz na powierzchni wizualnego wskaźnika oblodzenia i termometru zamontowanego na oszkleniu kabiny załogi, natomiast lód zaczął się tworzyć w końcowej części wlotu odpowiadającej przekrojowi wlotowemu sprężarki silnika ze względu na panujące tam ujemne wartości temperatury (rys. 2).

W takim przypadku instalacja przeciwooblodzeniowa nie włączy się automatycznie, a załoga nie ma możliwości zaobserwowania objawów oblodzenia, jednak - zgodnie z zapisami instrukcji eksploatacji - powinna włączyć instalację przeciwooblodzeniową w sposób ręczny, gdyż wartość temperatury wskazywana przez termometr zamontowany na oszkleniu wskazuje wartości około $+2^{\circ}\text{C}$, a instrukcja nakazuje jej włączanie w temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$ lub niższej (wg zapisu sprzed 2005 r. w temperaturze $+5^{\circ}\text{C}$ lub niższej), gdy w powietrzu znajdują się jakiegokolwiek postaci wilgoci.



Rys. 2. Badania modelu śmigłowca Mi-8 w tunelu aerodynamicznym niskich temperatur ITL WAT w temperaturze powietrza $+2^{\circ}\text{C}$ – widoczne są: brak oblodzenia na kadłubie (a) oraz początki tworzenia się lodu we wnętrzu wlotu (b) (fot. Z. Wojciechowski)

W przypadku symulacji lotu śmigłowca w chmurach w temperaturze -3°C oblodzenie pojawiło się nie tylko we wlotach silników i wentylatora, ale także i na kadłubie śmigłowca (rys. 3). W takich warunkach instalacja przeciwooblodzeniowa pracująca w trybie czuwania włączy się automatycznie, a załoga będzie mogła obserwować objawy oblodzenia.



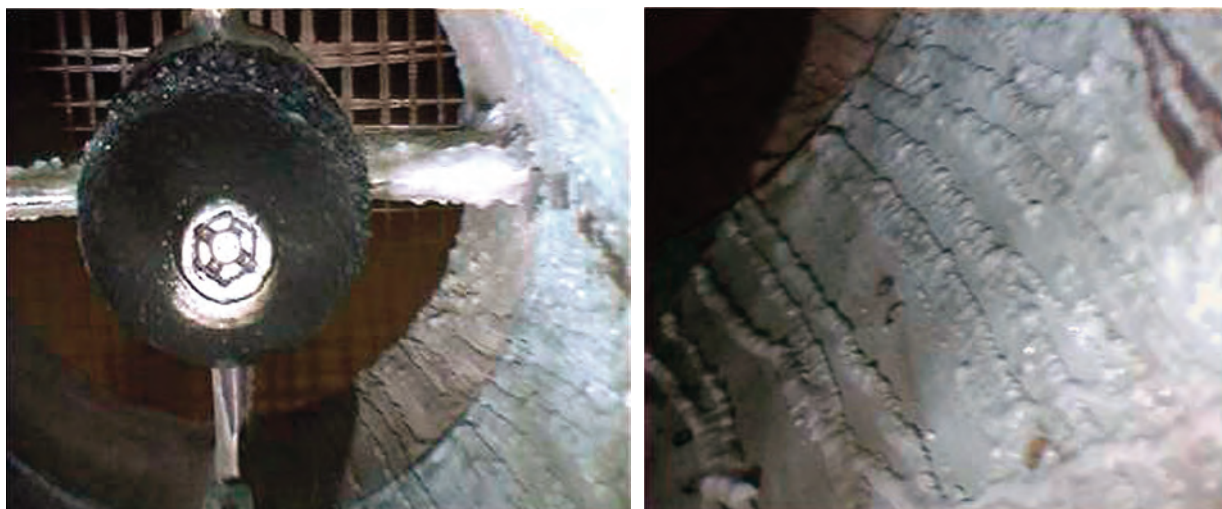
Rys. 3. Badania modelu śmigłowca Mi-8 w tunelu aerodynamicznym niskich temperatur ITL WAT w temperaturze -3°C – widoczne jest oblodzenie na kadłubie oraz zdławiony przepływ we wlocie, z którego odsysano powietrze (fot. Z. Wojciechowski)

Wobec braku czujników instalacji przeciwooblodzeniowej we wlotach silników bardzo istotna jest rola załogi statku powietrznego, która musi ściśle przestrzegać zaleceń zawartych w instrukcjach eksploatacji w locie. Zwykle nakazują one ręczne włączanie instalacji przeciwooblodzeniowych silników w temperaturach $+10^{\circ}\text{C}$ i niższych w przypadku widocznej w powietrzu wilgoci w różnej postaci (deszcz, zachmurzenie, mżawka, mgła, ograniczona widoczność itp.). Oczywiście podobnie należy postępować, jeśli komunikaty meteorologiczne wskazują na możliwość wystąpienia takich warunków.

Kolejnym czynnikiem mogącym sprzyjać oblodzeniu lotniczych zespołów napędowych jest ich eksploatacja podczas opadów atmosferycznych. Deszcz, mżawka lub padający śnieg zassane do wlotu silnika mogą spowodować jego oblodzenie, a grad bezpośrednio może powodować uszkodzenia mechaniczne.

Przeprowadzone w ITL WAT badania wlotu silnika TW2-117AG w temperaturze otoczenia -2°C pozwoliły na poznanie mechanizmu tworzenia się oblodzenia wewnątrz kanału przepływowego

wlotu lub sprężarki (rys. 4) w warunkach lotu podczas opadów marznącego deszczu. Krople przechłodzonej wody o temperaturze powietrza przechodzą ze stanu ciekłego do stałego bezpośrednio w strefie zetknięcia z powierzchnią metalu. Kolejne krople wody zasysane do wlotu spływają po jego ściankach porywane przez przepływający strumień powietrza i zamarzają w głębi kanału przepływowego, a następne zwiększają grubość warstwy lodu. Lód tworzy się nie tylko na ściankach kanału przepływowego wlotu, ale także na elementach w jego wnętrzu – kołpaku, żebrach, czujnikach itp. Dla turbinowych silników śmigłowych zakłada się, że powinny one pracować bez zakłóceń po zassaniu wody w ilości stanowiącej przynajmniej 4% masowego natężenia przepływu powietrza, tj. nieco więcej niż paliwa dostarczanego do silnika. W przypadku silników turbinowych do samolotów naddźwiękowych wymagane są testy potwierdzające ich funkcjonowanie w przypadku zassania do wlotu cząstek gradu podczas lotu z prędkością naddźwiękową.



Rys. 4. Badania wlotu silnika TW2-117AG śmigłowca Mi-8 w tunelu aerodynamicznym niskich temperatur ITL WAT w temperaturze -2°C – widoczna jest struktura oblodzenia wnętrza kanału przepływowego wlotu [3] (fot. Z. Wojciechowski)

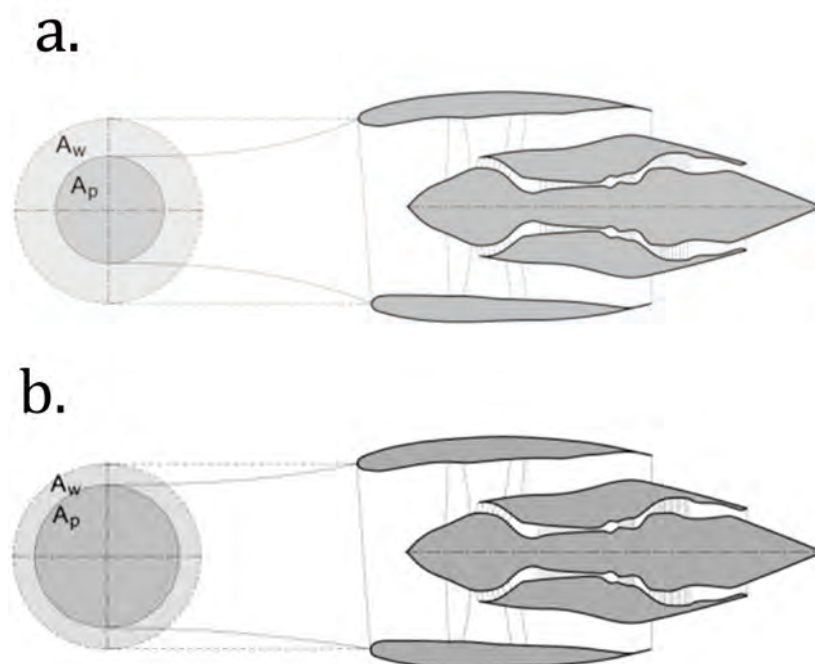
Podsumowując, warto raz jeszcze przypomnieć, że brak oznak oblodzenia na płatowcu, nieświadomość załóg o możliwości wystąpienia oblodzenia silników w dodatnich temperaturach, brak szczegółowej wiedzy dotyczącej ograniczeń działania instalacji przeciwooblodzeniowych powoduje, że ciągle się zdarzają przypadki, gdy załogi nie włączają instalacji przeciwooblodzeniowych w warunkach, które tego wymagają. W związku z tym podczas szkoleń (zarówno ogólnych, jak i na konkretny typ statku powietrznego) załóg i personelu technicznego mającego uprawnienia do uruchamiania silników **należy zwracać szczególną uwagę na fakt, że oblodzenie silników może występować w dodatnich temperaturach otoczenia bez oznak oblodzenia płatowca.**

OSADZANIE SIĘ LODU NA ELEMENTACH LOTNICZYCH SILNIKÓW TURBINOWYCH

Podczas lotu statku powietrznego elementy jego zespołu napędowego stykają się z kroplami mżawki lub deszczu, a także z bryłkami gradu lub kryształkami lodu. W zależności od bezwładności tych cząstek, wynikającej przede wszystkim z ich rozmiarów, wzajemne oddziaływanie między nimi a elementami silnika (zespołu napędowego) jest różne.

W przypadku kropeł mżawki lub deszczu o małych średnicach, a także kryształków lodu, ze względu na małą masę i bezwładność można przyjąć, że ich tory pokrywają się z liniami prądu (strug) powietrza zasysanego do wlotu silnika i stosunek masowy dostających się do silnika wody i powietrza pozostaje bez zmian. Natomiast w trakcie lotu podczas opadów deszczu o dużych średnicach kropeł lub gradu stosunek masy wody dostającej się do wlotu w postaci kropeł wody lub bryłek gradu do masy zasysanego powietrza ulega zmianie w zależności od

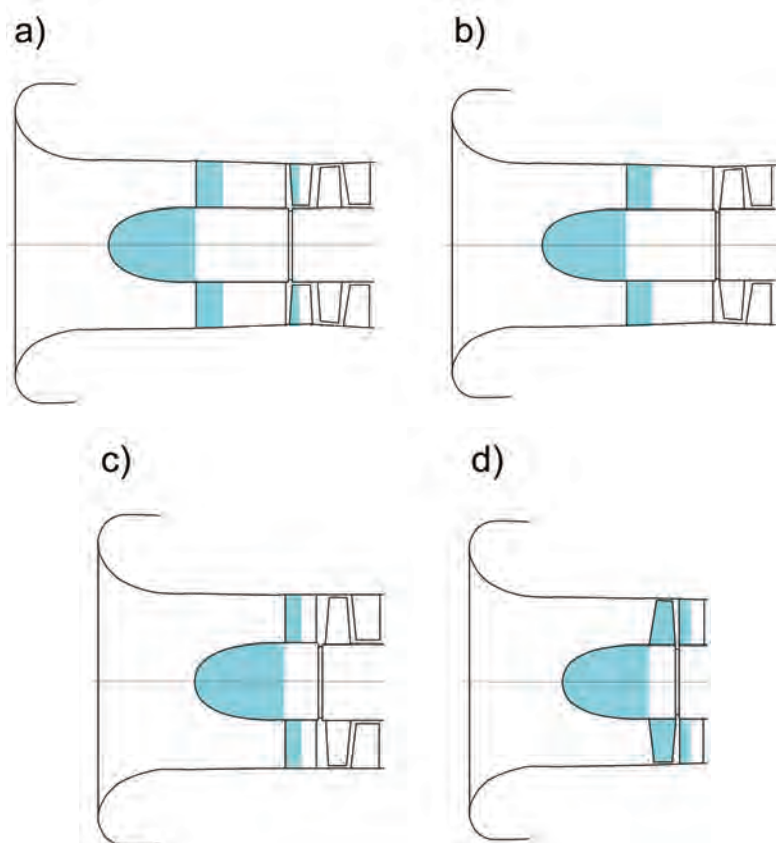
prędkości lotu statku powietrznego i zakresu pracy jego silnika, mimo niezmiennych warunków atmosferycznych. Rozpatrując ten przypadek przyjmuje się, że bryłki gradu (duże krople deszczu) poruszają się względem wlotu z prędkością niewiele mniejszą od prędkości lotu samolotu po torach równoległych do kierunku lotu. Zakłada się ponadto, że względu na stosunkowo dużą bezwładność cząstek, że do wlotu dostają się wszystkie cząstki zawarte w polu powierzchni A_w ograniczonej chwytem powietrza (rys. 5) niezależnie od zakresu pracy silnika i prędkości lotu. Wiadomo natomiast, że pole powierzchni przekroju A_p strumienia powietrza zasysanego do wlotu uzależnione jest zarówno od prędkości lotu statku powietrznego, jak i od zakresu pracy silnika i może zmieniać się w szerokim zakresie. Stosunek mas wody i powietrza dostających się do silnika jest proporcjonalny do stosunku pól powierzchni A_w i A_p . W przypadku, gdy zakres pracy silnika jest niewielki, a prędkość lotu duża (np. podczas zniżania) wówczas strumień powietrza zasysanego do silnika ma stosunkowo niedużą powierzchnię przekroju.



Rys. 5. Proporcje pola powierzchni pochłaniania wody (A_w) do pola powierzchni zasysanego powietrza (A_p) przy dużej prędkości lotu i małej prędkości obrotowej wirnika – zniżanie (a) oraz małej prędkości lotu i dużej prędkości obrotowej wirnika – wznoszenie (b)

Znaczna część strug powietrza odchyła się w takim przypadku od osi silnika i opływa jego wlot z zewnątrz, a wraz z nim, na skutek małej bezwładności, omijają wlot krople mżawki lub deszczu o niewielkiej średnicy, a także kryształki lodu. Ponieważ jednocześnie mające większą bezwładność krople deszczu o dużej średnicy, a także bryłki lodu, wpadają do wlotu na całej powierzchni jego przekroju poprzecznego, więc zwiększa się stosunek pól powierzchni A_w i A_p zwiększając koncentrację wody we wlocie. Pamiętać należy, że gęstość powietrza w warunkach normalnych wynosi $1,225 \text{ kg/m}^3$, gęstość wody 1000 kg/m^3 , a gęstość lodu $916,8 \text{ kg/m}^3$. Dodatkowo efekt ten może być jeszcze silniejszy w niektórych silnikach dwuprzepływowych o dużym stopniu podziału natężeń masowego przepływu powietrza ze względu na występowanie w nich w opisywanych warunkach odchylenia strumienia powietrza od wlotu do gondoli silnika do wlotu do sprężarki niskiego ciśnienia znajdującego się za wentylatorem. Wzrost zakresu pracy silnika przy małej prędkości lotu (np. podczas wznoszenia) przynosi zmniejszenie koncentracji wody we wlocie. Można z tego wnioskować, że w tworzeniu powłoki lodowej na zewnętrznych powierzchniach wlotu biorą udział krople deszczu o mniejszych średnicach, natomiast wewnątrz kanału przepływowego silnika większy udział mają krople o średnicach większych.

Miejsca, w których może tworzyć się powłoka lodowa są bardzo uzależnione od konstrukcji silnika, a także od usytuowania jego wlotów na płatowcu oraz ich konstrukcji. Przykładowo w jednoprzepływowych turbinowych silnikach odrzutowych, a także śmigłowcowych i śmigłowych, lód może powstać tworząc się zarówno na elementach nieruchomych wlotu i kanału wlotowego, na łopatkach wlotowego wieńca kierownic, kołpaku, żebrach przedniej podpory, a także na łopatkach wirnikowych i kierowniczych pierwszego stopnia sprężarki (rys. 6). Kolejne stopnie sprężarki zazwyczaj są bezpieczne, jeśli chodzi o oblodzenie, z powodu wzrostu temperatury powietrza w pierwszym stopniu.

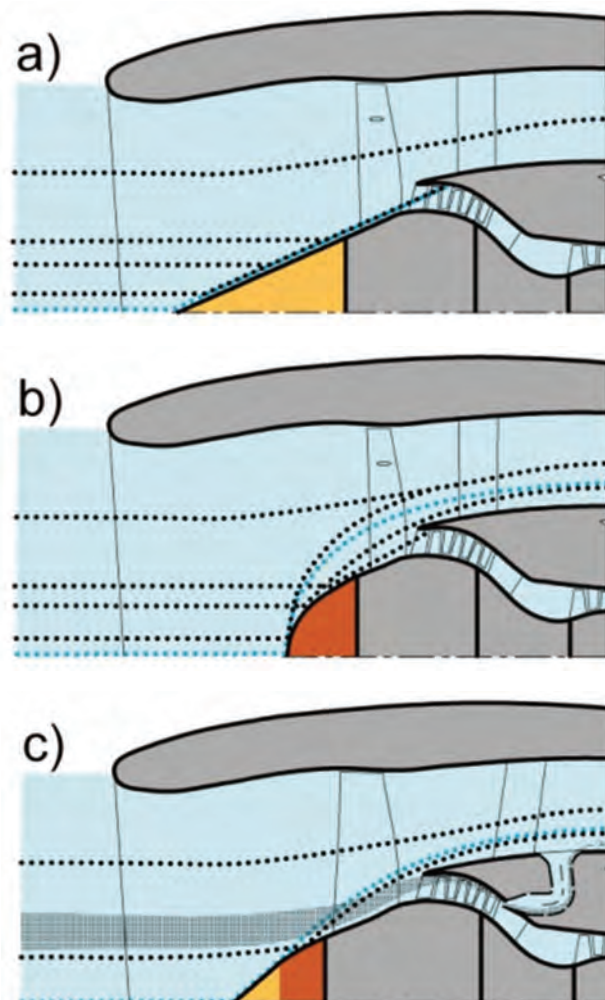


Rys.6. Elementy jednoprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego najbardziej narażone na oblodzenie (części zacienione) w zależności od jego konfiguracji: a) nieruchomy kołpak, żebra wlotowe, wlotowy wieńec kierownic; b) nieruchomy kołpak, żebra wlotowe; c) nieruchomy kołpak wlotowy wieńec kierownic; d) wirujący kołpak, wieńec wirnikowy, wieńec kierownic

We wlotach dwuprzepływowych turbinowych silnikach odrzutowych o dużym stopniu podziału masowego natężenia przepływu powietrza istotny wpływ na ich podatność na oblodzenie ma kształt kołpaka wentylatora (rys. 7).

Powszechnie stosowane są w tego rodzaju silnikach kołpaki o kształcie stożkowym (np. w silniku CFM-56-5A) lub eliptycznym (np. w silniku CFM-56-3). Doświadczenie dowodzi, że kołpaki stożkowe (rys. 7.a) są mniej podatne na osadzanie się na nich lodu. Ich wadą jest natomiast to, że tory kropeł wody (i bryłek lodu) napływających w trakcie pracy silnika na kołpak odchylane są w taki sposób, że trafiają one do kanału wewnętrznego silnika mogąc prowadzić do poważnych zakłóceń w pracy silnika i uszkodzeń mechanicznych jego części. Z kolei kołpaki eliptyczne (rys. 7.b) są bardziej podatne na osadzanie się lodu bezpośrednio na nich, ale ich kształt powoduje odchylenie torów kropeł o większej średnicy, a także bryłek lodu, kierując je do kanału zewnętrznego, w którym zagrożenia stwarzane przez potencjalne oblodzenie jest znacznie mniejsze ze względu na większe wymiary geometryczne łopatek wirnikowych i kierowniczych wentylatora. Podobnie kształt kołpaka wpływa na tor, po którym przemieszczają się kawałki lodu, który już osadził się na kołpaku, a następnie został z niego zerwany, np. po zbyt późnym

włączeniu instalacji przeciwooblodzeniowej. W przypadku kołpaków stożkowych kawałki te trafiają do kanału wewnętrznego, a w przypadku kołpaków eliptycznych do kanału zewnętrznego. Próbę połączenia zalet obu kształtów kołpaków podjęto w silnikach GE-90 i GENx (rys. 7c). Przednia część kołpaka tych silników ma kształt stożka (utrudnia tworzenie się powłoki lodowej), a tylna kształt eliptyczny (odchyla tory cząstek o większych średnicach oraz tory kawałków lodu). Optymalne właściwości uzyskuje się poprzez dobór właściwych proporcji obu części kołpaka oraz długości strefy przejściowej między nimi.



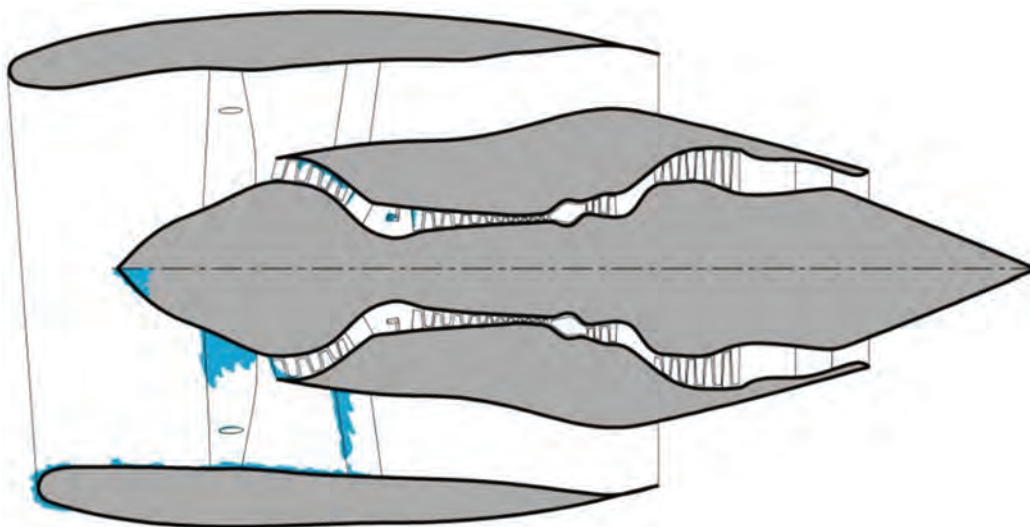
Rys.7. Wpływ kształtu kołpaka na trajektorie kropli i zerwanych fragmentów powłoki lodowej – kołpak stożkowy (a), eliptyczny (b), stożkowo – eliptyczny (c)

W tego rodzaju silnikach istotne jest także ustalenie odpowiedniej odległości między łopatom wentylatora, a wlotem do kanału wewnętrznego, a także kształt tego kanału. Mniej wrażliwe na oblodzenie są silniki, mające krzywoliniowe kanały wewnętrzne, jak na rys. 7 i rys. 8. Woda, w różnej postaci, dostając się do takiego kanału odrzucana jest pod wpływem siły odśrodkowej na ścianki zewnętrzne, a następnie może być przez zawory upustu usuwana do kanału zewnętrznego. W silniku GE-90 w krzywoliniowej części kanału wewnętrznego za sprężarką niskiego ciśnienia umieszczone są specjalne zawory upustu, których zadaniem jest usuwanie z tego kanału wody, a także zanieczyszczeń (o średnicach ok. 100 μm). Zawory te pozostają otwarte przy niewielkich zakresach pracy silnika (rys. 7.c).

Podczas lotu samolotu napędzanego dwuprzepływowymi turbinowymi silnikami odrzutowymi o dużym stopniu podziału masowego natężenia powietrza (wentylatorowymi) w warunkach występowania przechłodzonych kropli wody lód może osadzać się (rys. 8) na krawędzi natarcia wlotu, ściankach kanału wlotowego, kołpaku i łopatach wentylatora, łopatkach kierowniczych wentylatora oraz łopatkach wlotowego wieńca kierownic sprężarki niskiego ciśnienia

i łopatkach wirnikowych pierwszego stopnia tej sprężarki. W silnikach trójwrotnikowych podczas lotu w takich warunkach lód może tworzyć się również na elementach pierwszego stopnia sprężarki średniego ciśnienia.

W przypadku eksploatacji silników turbinowych w atmosferze zawierającej kryształki lodu mechanizm oblodzenia jest odmienny. Należy przypomnieć, że kryształki lodu występują najczęściej na bardzo dużych wysokościach, a więc w bardzo niskich temperaturach oraz, że mają małą bezwładność ze względu na ich niewielkie wymiary. W takich warunkach powłoka lodowa nie tworzy się na elementach wlotu, kanału wlotowego oraz wentylatora, ale dopiero w kanale wewnętrznym silnika w określonym miejscu sprężarki niskiego (dla silników trójwrotnikowych - średniego) ciśnienia, gdzie występują około zerowe ($^{\circ}\text{C}$) temperatury powietrza (rys. 8). Dzieje się tak dlatego, że powietrze zawierające kryształki lodu ulega podgrzaniu w wentylatorze oraz kolejnych stopniach sprężarki w kanale wewnętrznym. Zachodzi wówczas zjawisko topnienia kryształków lodu, a następnie ponownego zamrażania utworzonej z nich wody na znajdujących się w kanale wewnętrznym łopatkach, żebrach, czujnikach, a także na jego ściankach.

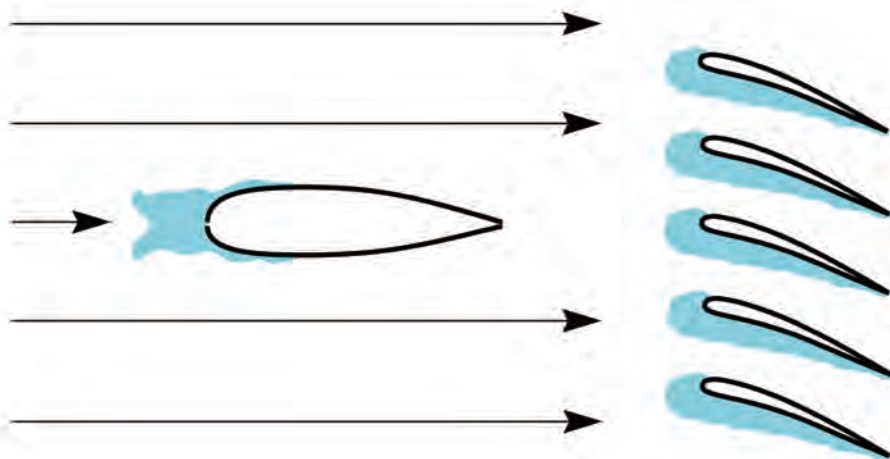


Rys.8. Strefy oblodzenia elementów dwuprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego podczas lotu w atmosferze zawierającej przechłodzone krople wody (dolny półprzekrój) oraz lotu w atmosferze zawierającej kryształki lodu (górny półprzekrój)

Tworzenie się powłoki lodowej na żebrach wlotowych i łopatkach ma podobny charakter jak w przypadku oblodzenia powierzchni nośnych statku powietrznego, jednak z powodu znacznie mniejszych rozmiarów tych elementów konstrukcyjnych wywołuje większe skutki. Duże prędkości względne sprzyjają szczególnie silnemu oblodzeniu łopatek wlotowego wieńca kierownic, w niektórych przypadkach lód może osadzać się na całej wklęsłej powierzchni profilu łopatki (rys. 9). Możliwości oblodzenia łopatek kierowniczych kolejnych stopni sprężarki są znacznie mniejsze z powodu znacznego wzrostu temperatury powietrza już za pierwszym stopniem. Może do nich dochodzić jedynie na dużych wysokościach, na których temperatury przyjmują już szczególnie niskie wartości, w obecności kryształków lodu w atmosferze.

Powstawanie powłoki lodowej na powierzchni kanału wlotowego i bezpośrednio na wlocie do sprężarki silnika zmienia geometrię i przekrój poprzeczny kanału przepływowego wywołując zmianę charakteru przepływu w kanale wlotowym oraz parametrów strumienia powietrza na wlocie do sprężarki. Powszechnie stosowane w silnikach lotniczych sprężarki osiowe mają dużą liczbę łopatek, których cienkie pióra o dużej powierzchni ułatwiają odbieranie od nich ciepła przez strumień przepływającego powietrza. Łopatki kierownic wlotowych oraz wirników sprężarek promieniowych są zwykle grubsze i mają znacznie mniejszą powierzchnię styku ze strumieniem powietrza. Ze względu na konstrukcję oraz warunki pracy, szczególnie wrażliwe na wystąpienie oblodzenia są silniki ze sprężarkami osiowymi. Wzrost oporów przepływu prowadzi

do zmniejszenia masowego natężenia przepływu powietrza oraz sprężu, co powoduje spadek ciągu lub mocy silnika, a przy dłuższej pracy grozi niestateczną pracą sprężarki prowadzącą do wyłączenia silnika.



Rys.9. Oblodzenie żeber i łopatek wlotowego wieńca kierownic silnika turbinowego

Zmniejszanie się masowego przepływu powietrza przez wlot na skutek osadzania się lodu, wymaga (dla zachowania niezbędnego ciągu/mocy silnika,) zwiększenia ilości paliwa podawanego do komory spalania. Prowadzi to z kolei do znacznego wzrostu temperatury gazów przed turbiną. Przykładowo, prowadzone w Związku Radzieckim badania w locie turbinowego silnika odrzutowego (nieujawnionego typu) wykazały, że przy zmniejszeniu masowego natężenia przepływu przez sprężarkę o 10% temperatura spalin przed turbiną rośnie o około 60°C, a przy zmniejszeniu masowego natężenia przepływu o 20% temperatura rośnie o około 140°C. Taki wzrost temperatury może w konsekwencji spowodować przegrzanie elementów turbiny i ich zniszczenie lub wyłączenie silnika przez układ ograniczający temperaturę przed turbiną.

Łopatki wirnikowe wentylatorów i sprężarek silników odrzutowych są mniej narażone na oblodzenie od łopatek kierowniczych ze względu na odrzucanie przez nie kropel wody w stronę ich wierzchołków i dalej na ścianki kanału przepływowego. W przypadku turbinowych silników śmigłowych efekt odrzucania kropli wody lub bryłek gradu pod wpływem sił odśrodkowych jest mniejszy niż w przypadku wentylatorów dwuprzepływowych turbinowych silników odrzutowych. Wynika to z mniejszej liczby łopat śmigieł w stosunku do liczby łopat wentylatorów, a także z faktu, że prędkość obrotowa śmigła zmienia się nieznacznie w zależności od warunków lotu i jest mniejsza niż prędkość obrotowa wentylatorów dwuprzepływowych silników odrzutowych. Zwiększenie ilości kropli wody usuwanych przed dostaniem się ich do sprężarki można uzyskać poprzez zastosowanie bezwładnościowych odpylaczy powietrza wlotowego, a także odpowiednie ukształtowanie kołpaka śmigła.

Turbinowe silniki śmigłowcowe charakteryzują się niższymi wartościami stosunku pól powierzchni A_w i A_p (por. rys.5) co zmniejsza koncentrację wody we wlocie z powodu wyższych zakresów pracy silnika oraz małych prędkości lotu podczas zniżania. Silniki te nie mają żadnych elementów wirujących, które mogłyby (wskutek działania sił odśrodkowych) ograniczać ilość kropli wody lub bryłek gradu dostających się do wlotu, ale obecnie zazwyczaj wyposażone są w bezwładnościowe odpylacze powietrza wlotowego spełniających podobną rolę.

Niektóre statki powietrzne (głównie śmigłowce) mają wloty wyposażone w ekrany (najczęściej siatki) zabezpieczające przed zasysaniem ciał obcych większych od ziaren pyłów. Jeśli ekrany te nie są ogrzewane, wówczas łatwo pokrywają się lodem, co praktycznie uniemożliwia eksploatację takich statków powietrznych w warunkach oblodzenia.

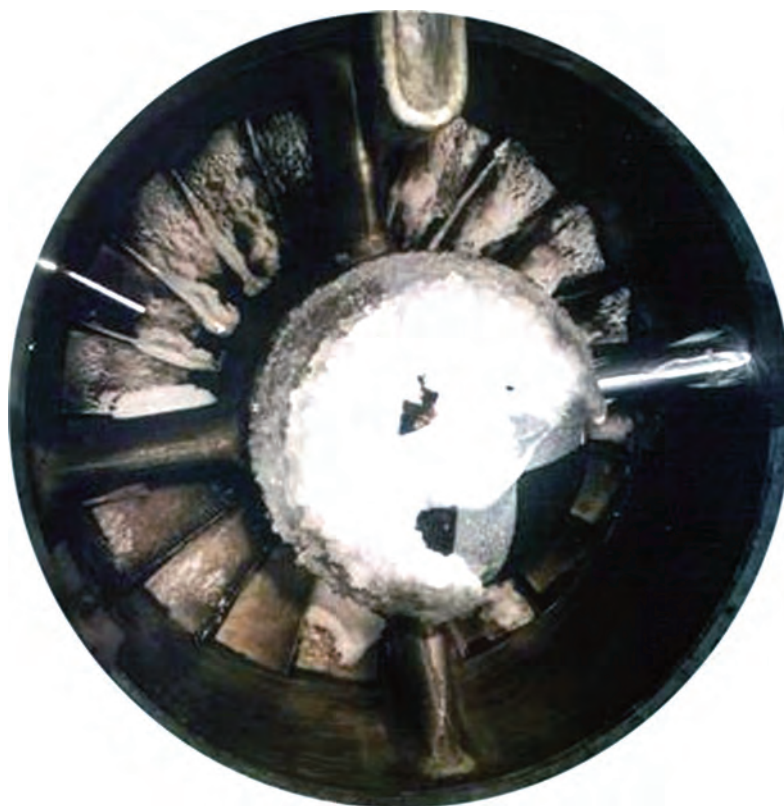
Lód może także osadzać się na czujnikach temperatury i ciśnienia na wlocie wykorzystywanych w układzie sterowania silnikami. Jest to przyczyną błędnych sygnałów wykorzystywanych np. do obliczania ciągu przez cyfrowe układy sterowania (FADEC, DEEC, itp.).

ZASYSANIE WODY, ŚNIEGU LUB LODU DO SPRĘŻARKI LUB KOMORY SPALANIA SILNIKA TURBINOWEGO

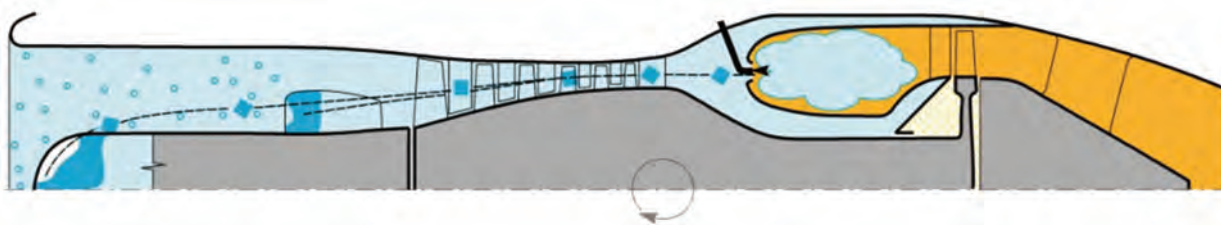
Woda, która w postaci ciekłej lub jako śnieg, lód czy błoto pośniegowe, która dostaje się do kanału przepływowego każdego rodzaju silnika turbinowego, może doprowadzić do poważnych zakłóceń w jego pracy, mimo, że wtrysnięcie niewielkiej ilości wody poprawia sprawność silników i zwiększa ich moc (ciąg) dzięki poprawie sprawności obiegu termodynamicznego i wzrostowi masy przepływającego przez silnik strumienia czynnika roboczego.

W kolejnych stopniach sprężarki temperatura powietrza rośnie na skutek wzrostu ciśnienia, co powoduje, że woda zassana do kanału przepływowego sprężarki stopniowo odparowuje. Dopóki całość wody nie odparuje, w każdym następnym stopniu część wody znajduje się już w postaci gazowej, a część w ciekłej (lub jeszcze stałej). Typowym zjawiskiem jest, że woda w postaci ciekłej jest odrzucana na skutek oddziaływania siły odśrodkowej przez łopatki wirnikowe na ścianki kanału przepływowego i spływa po nich w stronę komory spalania. Woda ta może dostawać się do zaworów upustu, a także do kolektorów lub zaworów, z których powietrze ze sprężarki jest odbierane na potrzeby płatowca lub silnika.

Jeżeli całość wody nie odparuje w sprężarce oraz nie zostanie usunięta przez zawory upustu, wówczas dostaje się ona do komory spalania i może doprowadzić do niespodziewanego wyłączenia silnika. Dzieje się tak, ponieważ woda może gwałtownie, pseudetonacyjnie, odparować w komorze spalania i zerwać płomień. Badania silników samolotu Boeing B767 pokazały, że do zgaszenia płomienia w komorze spalania wystarcza dostanie się do niego lodu w ilości równoważnej 350 cm³ wody (co odpowiada objętości mieszczącej się w niepełnych dwu szklankach), natomiast wykonane w 1968 roku badania silników Allison 250-C18 (których odpowiednikiem są silniki GTD-350) wykazały, że 20 gramów śniegu zassanego jednorazowo do wlotu powoduje niestateczną pracę sprężarki, a 30 gramów śniegu prowadzi każdorazowo do wyłączenia silnika.



Rys. 10. Oblodzenie wlotu turbinowego silnika śmigłowego - zerwana część powłoki lodowej z kołpaka centralnego doprowadziła do zgaśnięcia silnika (fot. A. Panas)



Rys.11. Zgaszenie płomienia w komorze spalania silnika turbinowego wskutek pseudodetonacji fragmentu miękkiego lodu zerwanego z elementów wlotu

Lód do wnętrza kanału przepływowego silnika może także zostać zassany z powodu zbyt późnego włączenia instalacji przeciwooblodzeniowej. W takim przypadku ciepło dostarczane do ogrzewanych elementów wlotu silnika powoduje odrywanie się od nich osadzonego uprzednio lodu, który może spowodować uszkodzenie łopatek (lód twardy) lub wyłączenie się silnika na skutek zerwania płomienia w komorze spalania przy gwałtownym odparowaniu lodu (lub wody) w komorze spalania (rys. 10, 11). Obecność kropeł wody lub bryłek gradu w powietrzu zassanym do sprężarki zmienia jej charakterystykę w taki sposób, że może to prowadzić do wystąpienia jej niestatecznej pracy.

SPOSOBY PRZECIWDZIAŁANIA OBLODZENIU LOTNICZYCH SILNIKÓW TURBINOWYCH

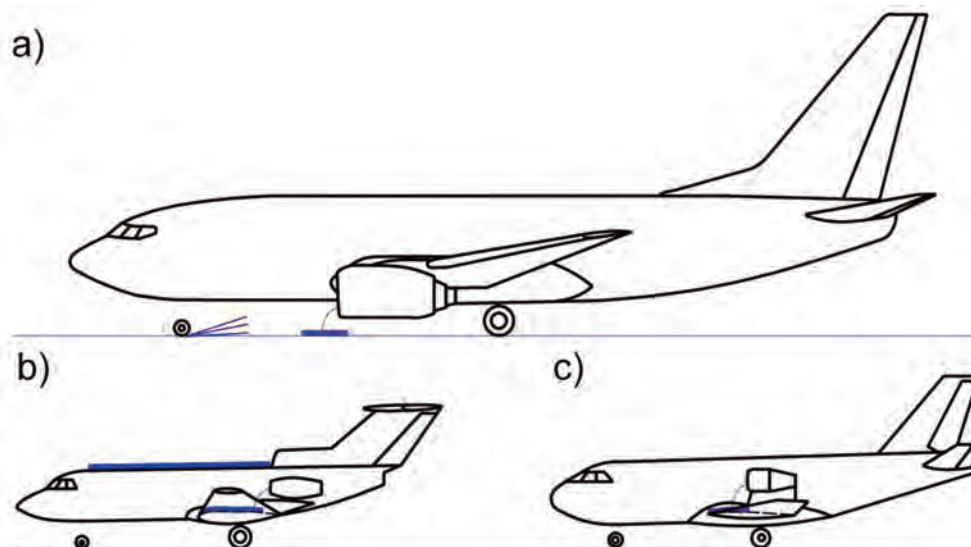
Dla uniknięcia oblodzenia lotniczych zespołów napędowych stosowane są różnego rodzaju rozwiązania konstrukcyjne oraz przedsięwzięcia organizacyjne.

Przepisy certyfikacji statków powietrznych wymagają udowodnienia, że każdy silnik i jego wlot (kanał wlotowy) działa na wszystkich zakresach pracy w locie (w tym na biegu jałowym) bez osadzania się lodu na elementach silnika lub wlotu w takiej ilości, która może zakłócić pracę silnika lub wywołać znaczną utratę ciągu (lub mocy) w warunkach oblodzenia wyszczególnionych w dodatku C do tych przepisów, a także podczas opadów śniegu lub zamieci śnieżnej, w których jest dopuszczalna eksploatacja danego statku powietrznego. Ponadto każdy silnik musi zapewniać co najmniej 30 minut bezawaryjnej pracy na ziemi w krytycznych dla danego typu warunkach na zakresie biegu jałowego poprzedzającego osiągnięcie zakresu startowego ciągu (lub mocy) przy włączonej instalacji przeciwooblodzeniowej silnika. Podczas tych 30 minut pracy silnika dopuszczalne jest chwilowe zwiększanie zakresu pracy silnika do wartości średnich ciągów (lub mocy). Podczas certyfikacji temperatura powietrza atmosferycznego powinna mieścić się w zakresie $-1...-9^{\circ}\text{C}$, a zawartość ciekłej wody w postaci kropeł o średniej średnicy efektywnej nie mniejszej niż 20 mikrometrów nie może być mniejsza niż $0,3\text{ g/m}^3$.

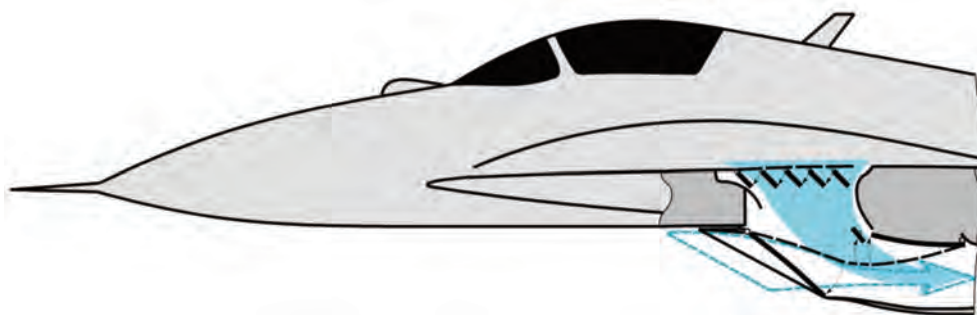
Wrażliwość silników lotniczych na oblodzenie zależy między innymi od ich usytuowania na płatowcu (rys. 12). Większość samolotów pasażerskich średniego i dużego zasięgu (np. Airbus A319, A320, A330, Boeing B737, B767, B777, Embraer ERJ170, ERJ190 i in.) ma 2 silniki umieszczone pod skrzydłami, a dolne krawędzie ich wlotów znajdują się w niewielkiej odległości od powierzchni lotniska (rys. 12a). Przy takim rozmieszczeniu silników są one szczególnie narażone na powstanie wiru wlotowego i zasysanie wody, śniegu lub błota pośniegowego z powierzchni lotniska, a także może się do nich dostawać woda rozbryzgiwana przez koła przedniej goleni podwozia. Podobne zagrożenie występuje w przypadku samolotów bojowych, które mają nisko umieszczone wloty, np. w samolocie F-16, który ma wlot podkadłubowy, czy MiG-29. W tym ostatnim podczas pracy silników na ziemi wloty zasadnicze są zamykane specjalnymi przesłonami, a powietrze pobierane jest przez wloty dodatkowe znajdujące się na górnej powierzchni skrzydeł (rys. 13).

W przypadku samolotów dyspozycyjnych oraz komunikacji regionalnej (np. Embraer ERJ135, ERJ145, Falcon 2000, Gulfstream G550 i in.), których silniki usytuowane są w tylnej części kadłuba, w większej odległości od powierzchni lotniska są one znacznie mniej narażone na zasysanie z niej wody w różnej postaci. Silniki niektórych samolotów są całkowicie zabezpieczone

przed zasysaniem wody z płaszczyzny lotniska, np. w samolocie Jak-40 wir wlotowy do silników bocznych tworzy się na górnej powierzchni skrzydeł (podobnie jest w przypadku silników amerykańskiego samolotu szturmowego A-10), natomiast do silnika środkowego może dostać się jedynie woda znajdująca się na górnej powierzchni kadłuba (rys. 12b). Korzystne jest także montowanie silników na pylonach nad skrzydłami, jak np. w samolocie VFW-614, ponieważ wówczas wir wlotowy również tworzy się na górnej powierzchni skrzydeł (rys. 12c).

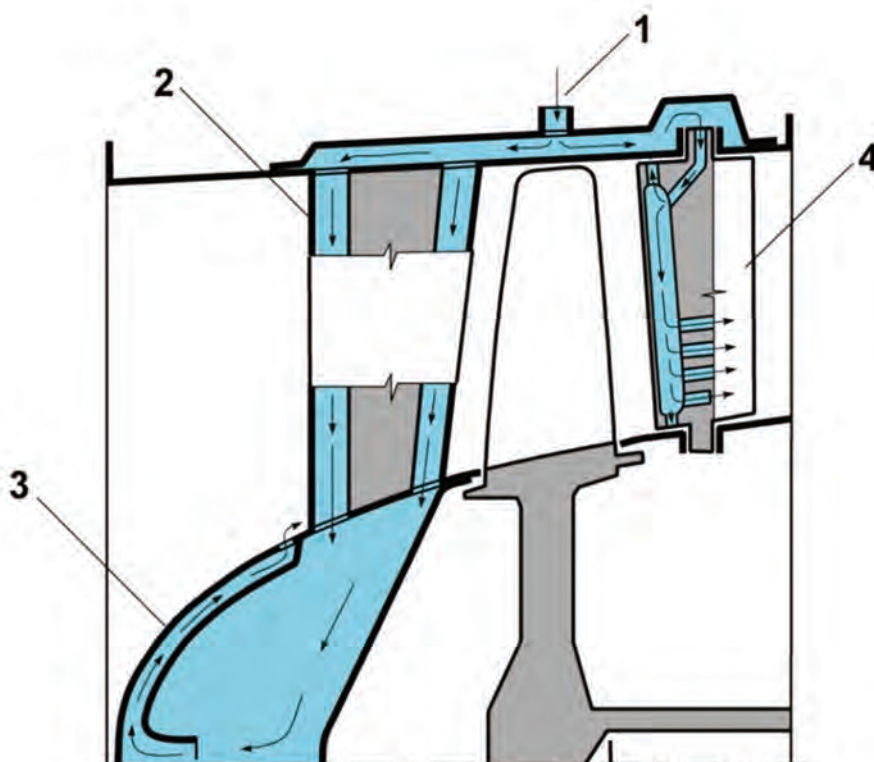


Rys.12. Zagrożenie zasysaniem wody, śniegu lub lodu do wlotów samolotów z silnikami usytuowanymi pod skrzydłami (a), w tylnej części kadłuba i nad kadłubem (b), nad skrzydłami (c)



Rys.13. Pobieranie powietrza przez wloty dodatkowe samolotu MiG-29 podczas pracy silnika na ziemi przy prędkości 0 - 200 km/h (liniami przerywanymi zaznaczono położenie elementów wlotu przy prędkościach większych od 200 km/h)

Dla silników zamontowanych w tylnej części kadłuba należy jednak brać pod uwagę konieczność usunięcia przed ich uruchomieniem śniegu lub lodu z powierzchni skrzydeł (i kadłuba), jak również fakt, że lód może się tam utworzyć w określonych warunkach lotu, a następnie może zostać zerwany i zassany do wlotów silników. Szklisty, trudny do zauważenia, lód może utworzyć się na górnej powierzchni skrzydeł w temperaturach wyższych od 0°C, np. w przypadku, gdy przechłodzone w wyniku długotrwałego lotu na dużej wysokości paliwo styka się z górną powierzchnią umieszczonych w skrzydłach zbiorników paliwa, a jednocześnie w atmosferze w której odbywa lot samolot, znajduje się wilgoć w różnej postaci (mgła, chmury, strefy wilgotnego powietrza). Tego rodzaju oblodzenie powierzchni nośnych może także powstawać podczas długotrwałego lotu dopóki skrzydłowe zbiorniki paliwa są napełnione powyżej 70% całkowitej pojemności. W takich warunkach wilgoć może zamarzać w zetknięciu z zimną powierzchnią skrzydeł, natomiast powstały lód może zostać jednocześnie zerwany z obu skrzydeł wskutek odkształcenia skrzydeł w momencie oderwania samolotu od drogi startowej i zassany do wlotów silników.



Rys.14. Schemat ogrzewania wlotu do sprężarki silnika turbinowego (1 - dopływ gorącego powietrza z za sprężarki, 2 - łopatki wlotowego wieńca kierownic, 3 - kołpak, 4 - łopatki nastawnego wieńca kierownic)

Oblodzeniu elementów zespołów napędowych statków powietrznych zapobiega się poprzez stosowanie instalacji przeciwooblodzeniowych. W przypadku silników odrzutowych zwykle stosowane są instalacje zasilane powietrzem pobieranym ze sprężarki. W silnikach śmigłowych oraz śmigłowcowych, które mają mniejsze wartości masowego natężenia przepływu powietrza, pobieranie większych ilości powietrza ze sprężarki wiązałoby się ze stosunkowo dużym spadkiem mocy, dlatego też stosuje się inne rodzaje instalacji przeciwooblodzeniowych, np. elektryczne, pneumatyczne, olejowe lub mieszane.

W silnikach wyposażonych w cieplne instalacje przeciwooblodzeniowe zasilane powietrzem pobieranym ze sprężarki elementy wlotu, kanału wlotowego oraz wlotowej części sprężarki najczęściej są ogrzewane za pomocą powietrza o temperaturze do 250°C pobieranego ze sprężarki (rys. 14).

Uważa się, że działanie instalacji przeciwooblodzeniowej jest w pełni efektywne przy nagrzewaniu odladzanych powierzchni do temperatury 80...100°C. Elementy wlotu płatowcowego mogą być także ogrzewane za pomocą instalacji elektrycznej. Instalacje przeciwooblodzeniowe włączane są automatycznie (po otrzymaniu przez mechanizm wykonawczy sygnału z czujnika oblodzenia) lub ręcznie po stwierdzeniu przez załogę warunków do wystąpienia oblodzenia lub zaświeceniu się lampki sygnalizacyjnej w kabinie załogi.

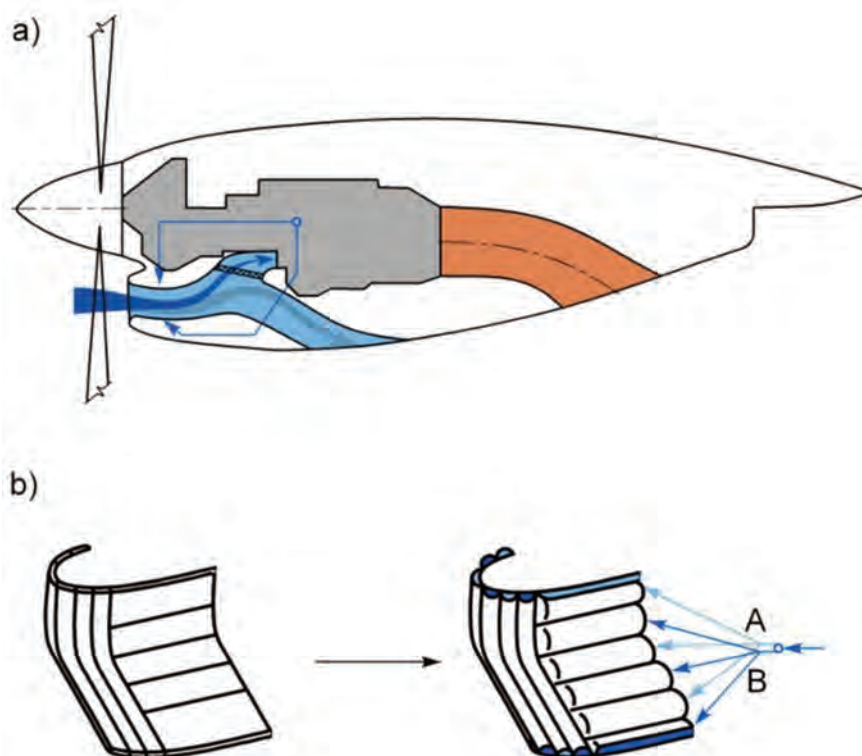
Podczas lotu w warunkach oblodzenia instalacja przeciwooblodzeniowa silników powinna być włączona, przy czym należy ją włączać przed wejściem w strefę oblodzenia i wyłączyć po wyjściu statku powietrznego z tej strefy. Najczęściej stosowane instalacje, zasilane powietrzem pobieranym ze sprężarki, mają dużą bezwładność cieplną (w porównaniu z instalacją elektryczną) z powodu powolnego nagrzewania się chronionych powierzchni. Dlatego nieodzwonne jest ich wcześniejsze włączenie, jeżeli można spodziewać się oblodzenia.

Efektywność powietrznej instalacji przeciwooblodzeniowej uzależniona jest od zakresu pracy silnika. Z tego powodu przy małej efektywności jej działania może zachodzić konieczność zwiększenia zakresu pracy silnika.

W przypadku późnego włączenia instalacji przeciwooblodzeniowej może również zachodzić zjawisko topnienia lodu na ogrzewanych powierzchniach, spływania powstałej wody po ściankach kanału przepływowego silnika i ponowne jej zamarzanie w nieogrzewanej już części tego kanału.

Należy pamiętać, że włączanie instalacji przeciwooblodzeniowej powoduje jednocześnie obniżenie mocy (ciągu) silnika z powodu pobierania sprężonego (i podgrzanego) powietrza do instalacji przeciwooblodzeniowej, które wracając do kanału przepływowego podnosi temperaturę powietrza na wlocie zmniejszając jego masowe natężenie przepływu. Nieuzasadnione używanie instalacji przeciwooblodzeniowej może także w niektórych przypadkach, w zależności od stosowanych materiałów konstrukcyjnych, prowadzić do przegrzewania odladzanych elementów zmniejszając ich wytrzymałość. Na wielosilnikowych statkach powietrznych nie wolno włączać instalacji przeciwooblodzeniowej silnika, który nie pracuje.

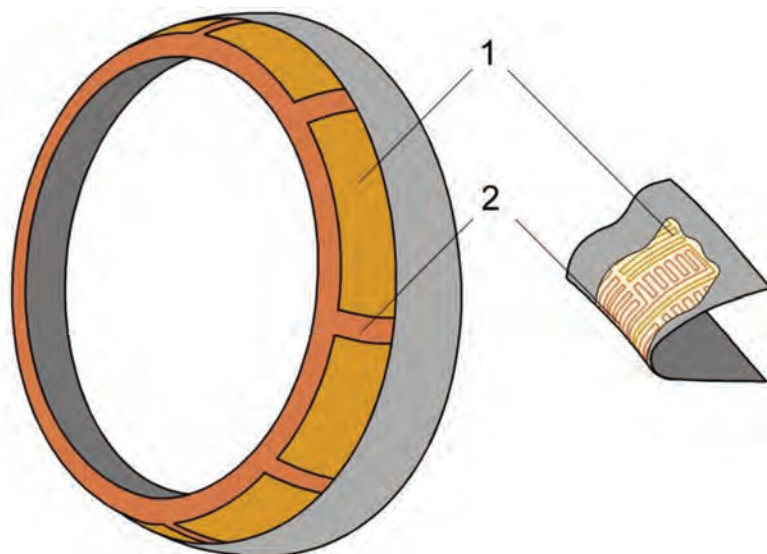
Na wielu samolotach z turbinowymi silnikami śmigłowymi, zarówno pasażerskich, jak i transportowych (np. ATR 42, ATR72, CASA C-295, SAAB 340 i in.), stosuje się pneumatyczne instalacje odladzające. Wykorzystywane są one zarówno do odladzania elementów płatowca, jak i wlotów silników (rys. 15). W przypadku zespołu napędowego zarówno krawędź wlotu, jak i wewnętrzna powierzchnia kanału wlotowego wyposażona jest w system elastycznych kanałów, do których, w przypadku wykrycia oblodzenia, cyklicznie doprowadzane jest powietrze ze sprężarki. Dla uniknięcia zasysania kawałków pokruszonego lodu, jak również kropeł deszczu do silnika, kanał wlotowy ma kształt spłaszczonej litery „S”, co powoduje, że spełnia on rolę separatora (a jednocześnie odpylacza) bezwładnościowego. W efekcie kawałki pokruszonego lodu poruszające się w kanale krzywolinowym są pod wpływem oddziaływującej na nie siły odśrodkowej usuwane z powrotem do atmosfery i nie dostają się do silnika (rys. 15a). Dla zapewnienia niezawodności działania instalacji powietrze ze sprężarki doprowadzane jest niezależnymi przewodami do narzemiennie rozmieszczonych kanałów (rys. 15b).



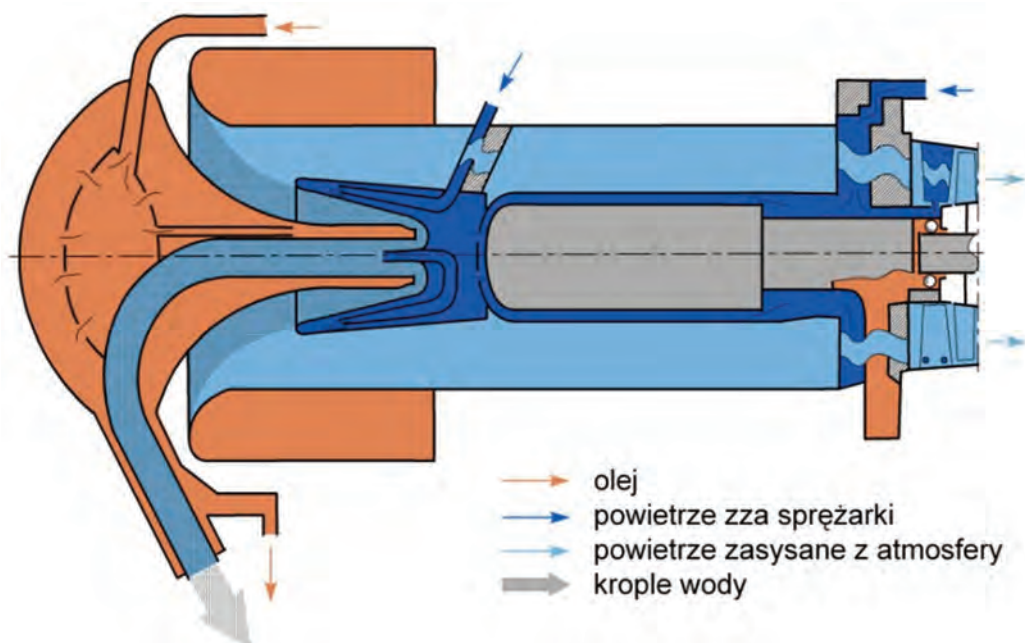
Rys.15. Schemat zabezpieczenia przed oblodzeniem wlotu turbinowego silnika śmigłowego przy zastosowaniu bezwładnościowego odpylacza powietrza wlotowego (a) oraz instalacji pneumatycznej (b)

W czasie, gdy kanały instalacji odladzającej nie są wypełnione powietrzem ich ścianki są przysysane do ścianek wlotu (kanału wlotowego) pod wpływem odsysania z nich powietrza na zasadzie ejekcji. Zasilanie pneumatycznej instalacji odladzającej powietrzem ze sprężarki sterowane jest ręcznie lub automatycznie w zależności od temperatury otoczenia. Przykładowo, cykl pracy instalacji samolotu ATR 72 powtarzany jest co 60 sekund przy temperaturze zewnętrznej powyżej -20°C (cykl szybki) lub co 180 sekund przy temperaturze zewnętrznej niższej od -20°C [4, 5, 7]. Należy pamiętać, że w tak niskich temperaturach zagrożenie oblodzeniem jest mniejsze z powodu niewielkiej wilgotności powietrza (!).

Niektóre silniki wyposażone są w elektryczne instalacje przeciwooblodzeniowe wlotów. W takim przypadku między warstwami laminatu szklanego umieszczane są elementy grzejne, z których część po włączeniu instalacji zasilana jest w trybie ciągłym (krawędź wlotu), a część w trybie przerywanym (rys. 16).



Rys.16. Schemat ogrzewania wlotu silnika turbinowego przy zastosowaniu elektrycznej instalacji przeciwooblodzeniowej – elementy ogrzewane w sposób ciągły (1) i przerywany (2)



Rys.17. Schemat mieszanego ogrzewania wlotu do sprężarki turbinowego silnika śmigłowego wyposażonego w bezwładnościowy osiowo-symetryczny promieniowy odpylacz powietrza wlotowego

Pewnym i ekonomicznym sposobem ogrzewania niektórych elementów zespołu napędowego jest wykorzystanie gorącego oleju odsysanego z podpór wirników silnika oraz zaprojektowanie integralnego zbiornika oleju, którego ścianki stanowią wewnętrzne ścianki kanału wlotowego, jak np. w śmigłowcach Mi – 2, PZL W-3 Sokół (rys. 17).

W przypadku silników śmigłowcowych lub śmigłowych efektywnym środkiem zabezpieczającym przed dostawaniem się do kanału przepływowego bryłek lodu i płatów miękkiego lodu (oraz śniegu, wody, gradu itp.) są bezwładnościowe odpylacze powietrza wlotowego lub wielofunkcyjne układy dolotowe, które pracując w trybie przeciwooblodzeniowym, tzn. z włączonym ogrzewaniem, separują z powietrza wlotowego większość cząstek lodu lub kropli wody usuwając je na zewnątrz.

Niebezpieczeństwo oblodzenia elementów zespołu napędowego zachodzi również podczas uruchamiania silnika w warunkach sprzyjających oblodzeniu. Jeśli elementy silnika ogrzewane są powietrzem pobieranym ze sprężarki lub olejem, wówczas oblodzenie może nastąpić zanim ogrzewane powierzchnie osiągną niezbędną temperaturę – powietrze w sprężarce lub olej nie zdąży się nagrzać. Jest to szczególnie groźne, gdy silnik pracuje na zakresie biegu jałowego. W takich warunkach należy ograniczać czas pracy silnika na tym zakresie.

Podczas długotrwałej pracy silnika na ziemi w czasie opadów mrozącego deszczu lub we mgle lodowej, pomimo niewielkiej wodności atmosfery, lód może gromadzić się na elementach wlotowych silników turbinowych. W takich przypadkach skutecznym sposobem walki z oblodzeniem jest okresowe zwiększanie zakresu pracy silnika.

OBJAWY OBLODZENIA SILNIKÓW TURBINOWYCH I ZALECENIA DLA PILOTÓW

Z faktu, że podatność silników turbinowych na oblodzenie zależy od wielu czynników (rodzaj i budowa silnika, geometria wlotu lub kanału wlotowego, rozmieszczenie silników, czy prędkość statku powietrznego i in.) wynika, że nie można podać uniwersalnych objawów i zaleceń dla pilotów. Dla uniknięcia skutków oblodzenia należy przede wszystkim przestrzegać zaleceń zawartych w instrukcji eksploatacji danego statku powietrznego oraz znać działanie i ograniczenia jego instalacji przeciwooblodzeniowej.

Należy zdawać sobie sprawę, że producenci poszczególnych statków powietrznych nakazują włączanie instalacji przeciwooblodzeniowych silników zazwyczaj już w dodatnich temperaturach otoczenia (+10°C i niższych) przed wejściem w strefę oblodzenia, a wyłączenie w odpowiednim czasie po wyjściu z tej strefy. Zbyt późne włączenie instalacji przeciwooblodzeniowej, podobnie jak i zbyt wczesne jej wyłączenie po wyjściu ze strefy oblodzenia może spowodować zassanie oderwanego z ogrzewanych powierzchni wlotu lodu do wnętrza silnika i jego samoczynne wyłączenie. W niektórych przypadkach podają dokładniejsze warunki sprzyjające oblodzeniu silników uzależniając je od temperatury otoczenia i prędkości lotu. Podczas lotu w takich warunkach należy zwracać szczególną uwagę na symptomy wskazujące na możliwość wystąpienia oblodzenia, takie jak np. występujące przy kilkustopniowej dodatniej temperaturze otoczenia ([°C]) zamglenie, deszcz, woda na oszkleniu kabiny itp. Pojawienie się oblodzenia silnika, a także awarię lub nieefektywne działanie instalacji przeciwooblodzeniowej silnika można rozpoznać po wzroście temperatury za turbiną, zmniejszeniu prędkości obrotowej wirnika, wzroście drgań lub wystąpieniu objawów niestatecznej pracy sprężarki. W takim przypadku zaleca się możliwie szybkie wyjście ze strefy oblodzenia, a w przypadku niestatecznej pracy sprężarki lub przekroczenia granicznych wartości drgań wyłączenie silnika (w przypadku wielosilnikowych statków powietrznych).

Podczas lotu w warunkach sprzyjających oblodzeniu należy zwracać uwagę, aby zakres pracy silnika (określany na podstawie wartości stosunku ciśnienia za turbiną do ciśnienia na wlocie do sprężarki lub prędkości obrotowej wirnika) nie był niższy niż wynika to z konieczności zapewnienia odpowiedniej temperatury powietrza pobieranego ze sprężarki do instalacji przeciwooblodzeniowej. Należy także pamiętać, że włączenie cieplnej instalacji przeciwooblodzeniowej

zasilanej powietrzem pobieranym ze sprężarki wiąże się ze wzrostem temperatury przed turbiną oraz zmniejszeniem ciągu (lub mocy) silnika. Jednocześnie w niektórych przypadkach instrukcje eksploatacji zawierają górny limit prędkości obrotowej wirnika, wynikający np. z zagrożenia niestateczną pracą sprężarki, mogącej wystąpić przy uszkodzeniu jej łopatek twardymi kawałkami zassanego lodu. Objawy niestatecznej pracy sprężarki mogą być niezauważalne podczas lotu na mniejszym zakresie pracy silnika lub gdy pilot nie zmienia położenia dźwigni sterowania silnikiem, natomiast mogą wystąpić gwałtownie na wyższych zakresach pracy silnika oraz w przypadku nagłego przesunięcia tej dźwigni.

W przypadku wystąpienia niestatecznej pracy sprężarki zaleca się przesunięcie dźwigni sterowania silnikiem w położenie biegu jałowego w powietrzu, a następnie powolne zwiększanie zakresu pracy silnika do chwili pojawienia się objawów niestatecznej pracy. W przypadku wyłączenia się silnika należy przeprowadzić procedurę jego uruchamiania.

Jeżeli silnik jest wyposażony w instalację zapłonową mającą tryb pracy ciągłej, instrukcja eksploatacji zazwyczaj nakazuje jej używanie w warunkach sprzyjających oblodzeniu, podczas intensywnych opadów deszczu itp.

PODSUMOWANIE

Coraz bardziej nowoczesne sposoby zabezpieczania silników okazują się czasami być nieskuteczne w skrajnie niesprzyjających warunkach atmosferycznych. Zdarzają się warunki, w których instalacje przeciwołodziwowe nie są w stanie dostarczyć wystarczająco dużo ciepła, aby zapobiec utworzeniu się powłok lodowych na elementach wlotów silników turbinowych. W miarę rozszerzania się obszarów użytkowania statków powietrznych poznawane są nowe zjawiska, których skutków wcześniej nie przewidywano. O ile czujniki instalacji przeciwołodziwowych zwykle pozwalają w odpowiednim czasie wykryć oblodzenie płatowców, to występują duże trudności z opracowaniem skutecznych czujników ostrzegających przed oblodzeniem zespołów napędowych. Nie ma znaczenia kraj, w którym wyprodukowano statek powietrzny czy jego silnik – problem ten jednakowo dotyczy zarówno statków powietrznych produkowanych w Europie, Azji, czy w uważanych przez wielu za najbardziej zaawansowane technologicznie Stany Zjednoczone. Nie ma też znaczenia wiek samolotu czy śmigłowca – silniki wyłączają się na skutek oblodzenia zarówno w starych poradzieckich Mi-8, jak i najnowszych samolotach Airbus A340 czy Boeing 777. Jeśli silniki wyłączają się na większych wysokościach, wówczas zazwyczaj automatycznie udaje się je uruchomić, natomiast sytuacje, w których do wyłączenia się silników dochodzi na małych wysokościach, często podczas podejścia do lądowania, konsekwencje bywają poważne.

Powtórzymy raz jeszcze - trzeba pamiętać, że **oblodzenie silników turbinowych może wystąpić w temperaturach +10°C i niższych przy obecności w powietrzu wody w postaci chmur, mgły, mżawki, deszczu, śniegu czy gradu.**

Analizy wypadków i katastrof spowodowanych oblodzeniem silników pokazują, że najczęściej jednak ich przyczyną były różnego rodzaju błędy popełnione przez ludzi. Nieznajomość lub nieprzestrzeżenie instrukcji użytkowania silnika w powietrzu, nie włączona lub włączona zbyt późno instalacja przeciwołodziwowa, nieprzełączona w tryb pracy ciągłej instalacja zapłonowa, nieświadomość możliwości wystąpienia oblodzenia wlotu silnika turbinowego w dodatniej temperaturze otoczenia, nieprzekazanie informacji załodze przez służby meteorologiczne, czy mający na celu umycie śmigłowca lot poprzez strumienie wody tryskającej ze zraszaczy... Nawet najlepsze zabezpieczenia nie będą działać, jeśli załogi lub personel naziemny nie dadzą im szansy.

Zapisy w instrukcjach użytkowania w wielu przypadkach pisane były lotniczą krwią i należy ich bezwzględnie przestrzegać, ponieważ „*my, ludzie lotnictwa, w odróżnieniu od użytkowników szos i autostrad, nie mamy pobocza, na którym można spokojnie poczekać na pomoc drogową*” (prof. S. Szczeciński).

LITERATURA

- [1] *Analiza i badania związane z wypadkiem śmigłowca Mi-8P dla potrzeb KBWL MON*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2004
- [2] **Chachurski R.**: *Analysis of aircraft powerplants icing possibility*, Journal of KONES 2007, Vol. 14, Warszawa, 2007
- [3] **Chachurski R., Drozdowski Z., Jasiński J., Kowaleczko G., Kroszczyński K., Michałowski R., Panas A., Pietrek S., Sobieraj W., Wrzesień S.**: *Oblodzenie statków powietrznych*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2005
- [4] **Chachurski R.**: *Oblodzenie lotniczych silników turbinowych*, załącznik do sprawozdania z realizacji pracy badawczej nr 4 T12D 016 30, WAT, Warszawa, 2009
- [5] **Chachurski R., Panas A.J., Preiskorn M.**: *Wstępne badania laboratoryjne miniaturowego turbinowego silnika odrzutowego GTM-120 do analiz oblodzeniowych*, XIII Ogólnopolska konferencja *Mechanika w lotnictwie*, Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Kazimierz Dolny, 2008
- [6] **Dzierżanowski P., Kordziński W., Otyś J., Szczeciński S., Wiatrek R.**: *Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe, Napędy Lotnicze*, WKiŁ, Warszawa 1983
- [7] **Gajewski T.**, *Turbinowe Napędy Lotnicze. Podstawy teorii i eksploatacji dla pilota. Podręcznik*, DWL, Poznań, 1984
- [8] **Mason J.**: *Engine Power Loss In Ice Crystal Conditions*, Aero Quartely, 04/2007, Boeing, 2007
- [9] **McVey, Oliver, Puller, Ramani**: *Inclement Weather & Aircraft Engine Icing*, General Electric Company, GE Aviation, 2007
- [10] **Striebel E. E.**: *Zapobieganie obladzaniu silników turbinowych*, Aircraft Ice Protection Symposium, Washington, 1969
- [11] **Szczeciński S.**: *Odpylanie powietrza wlotowego*, Wojskowy Przegląd Techniczny, vol. 6/1983, Wydawnictwo MON, Warszawa

Przedstawione wyniki uzyskano w ramach pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2006 – 2008 jako projekt badawczy nr 4 T12D 016 30.