

WLOTY POWIETRZA TURBINOWYCH SILNIKÓW ODRZUTOWYCH I ICH WPŁYW NA WŁAŚCIWOŚCI LOTNE SAMOLOTÓW ORAZ ZAGROŻENIA BEZPIECZEŃSTWA LATANIA

WŁODZIMIERZ BALICKI, STEFAN SZCZECIŃSKI

Instytut Lotnictwa

RYSZARD CHACHURSKI, ADAM KOZAKIEWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna

JERZY SZCZECIŃSKI

General Electric Poland

PAWEŁ GŁOWACKI

Urząd Lotnictwa Cywilnego

Streszczenie

W pracy starano się opisać kompleksowo specyfikę dopływu i przepływu powietrza przed wlotami i w kanałach wlotowych silników odrzutowych w różnych warunkach lotu oraz startu i lądowania samolotów. Zwrócono uwagę na zagrożenia uszkodzeń silników przez zderzenia łopatek wirników sprężarek (i wentylatorów silników dwuprzepływowych) z ciałami ptaków, bryłkami lodu osadzającego się na krawędziach wlotu oraz „ciał obcych” zasysanych z nawierzchni lotniska podczas startu i lądowania z włączonym odwracaczem ciągu. Wskazano na wpływ ukształtowania kanałów wlotowych powietrza do silników samolotów bojowych na intensywność echa radarowego.

Słowa kluczowe: prędkość lotu, prędkość we wlocie, ciśnienie spiętrzenia, wir wlotowy, oblodzenie wlotów

WSTĘP

Wprowadzenie do lotnictwa turbinowych silników spalinowych (a zwłaszcza odrzutowych) zrewolucjonizowało poglądy na temat wzajemnego oddziaływania aerodynamicznego zespołu napędowego i samolotu. Stosowane uprzednio napędy samolotów stanowiły śmigła napędzane spalinowymi silnikami tłokowymi. Główną cechą tej symbiozy jest mała zależność mocy silnika od prędkości lotu - przy małym zapotrzebowaniu powietrza przez silniki (statystycznie z 1kg/s powietrza uzyskiwano ok. 700 kW mocy) przy wielokrotnie (blisko 2 rzędy wielkości) większym zapotrzebowaniu strumienia powietrza przyspieszanego w płaszczyźnie obracającego się śmigła dla uzyskania ciągu niezbędnego do lotu samolotu. Zapotrzebowanie powietrza przez, nawet największej mocy, silniki II Wojny Światowej, rzadko przekraczało 2 kg/s.

Pojawienie się turbinowych silników napędzających śmigła spowodowało blisko 4 - krotne zwiększenie zapotrzebowania powietrza przez te silniki¹ w porównaniu z silnikami tłokowymi o podobnej mocy.

Jednak prawdziwie skokowy wzrost zapotrzebowania powietrza przez turbinowe silniki odrzutowe (tj. maszyny bezpośrednio wytwarzające ciąg) nastąpił po wprowadzeniu dwuprzepływowych wentylatorowych silników odrzutowych do lotnictwa transportowego i pasażerskiego trans- i międzykontynentalnego. O ile pierwsze seryjnie produkowane turbinowe silniki odrzutowe pobierały z atmosfery kilkanaście kg/s powietrza, to współcześnie skonstruowane wentylatorowe silniki odrzutowe do samolotów pasażerskich, jak np. Airbus 380 czy Boeing 787 pobierają ponad 1 000 kg/s powietrza (silnik GE90 – ponad 1 400 kg/s – Boeing 777) podczas startu samolotu. Stwarza to ogromne problemy z powodu zbierania z dużego obszaru nawierzchni lotniska przed wlotami silników wszelkich zanieczyszczeń (silnik działa jak gigantyczny odkurzacz), a za wylotem - także z włączonym odwracaczem ciągu – strumień spalin wydmuchuje i wyrывa słabiej związane z nawierzchnią okruchy betonu, żwiru czy asfaltu, rozrzucając je po znacznym obszarze za samolotem. Podczas lotu należy się liczyć z wpadnięciem do wlotu silnikowego już nie pojedynczych ptaków, lecz całych ich stad, a także zderzeń z łopatkami wirników sprężarek czy łopat wentylatorów obrywających się z krawędzi wlotu kawałków lodu, zwłaszcza w przypadku zbyt późnego włączenia instalacji przeciwblo-dzeniowej.

1. SPECYFIKA KSZTAŁTOWANIA WLOTÓW W SAMOLOTACH BOJOWYCH ORAZ SAMOLOTACH PASAŻERSKICH I TRANSPORTOWYCH

Główne zadanie wlotu to zapewnienie równomiernego rozkładu prędkości i ciśnienia strumienia powietrza bezpośrednio przed wlotem do palisady łopatek sprężarki lub wentylatora silnika dwuprzepływowego z minimalnymi stratami. Podstawową trudność stanowi tu jednak fakt, że spełnienie tego wymogu jest bardzo utrudnione ze względu na specyfikę lotnictwa. Każdy statek powietrzny przemieszcza się przestrzennie, z bardzo zróżnicowanymi i dużymi prędkościami oraz wysokościami lotu, w atmosferze o określonych właściwościach i cechach fizycznych powietrza atmosferycznego, jak np. gęstość, lepkość i prędkość dźwięku. Wymienione tu przykładowo cechy zależące od strefy klimatycznej, wysokości nad poziomem morza, czy pory roku, muszą być uwzględniane podczas projektowania wlotów do silników samolotów odrzutowych przewidywanych do użytkowania w określonym zakresie prędkości i wysokości lotów.

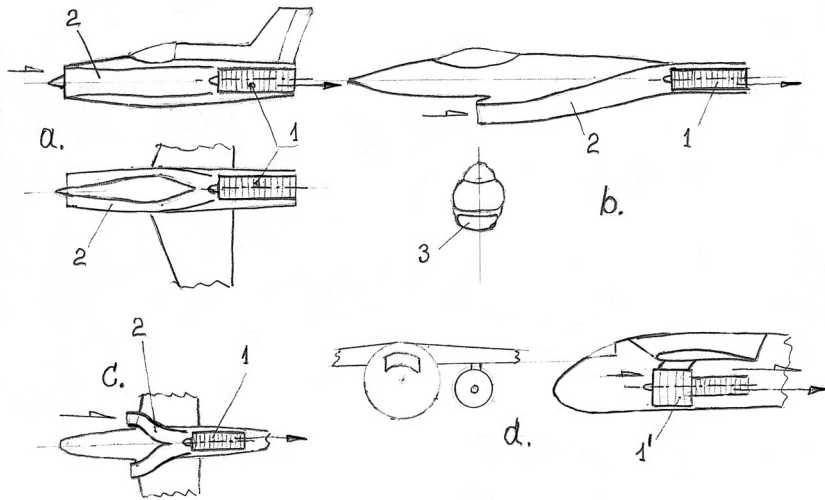
Od początku stosowania silników odrzutowych w samolotach bojowych wybrano dla nich miejsce w tylnej części kadłuba – tak, aby wektor ciągu od wypływających spalin układał się wzdłuż osi kadłuba (i kierunku lotu) przechodząc przez środek masy samolotu. Powodowało to spore komplikacje w doprowadzaniu powietrza do silnika kanałami zapewniającymi jak najmniejsze opory przepływu z jednoczesnym naporem powietrza do wlotu – wynikającym z prędkości lotu samolotu.

Natomiast w samolotach pasażerskich wykształtował się sposób podskrzydłowego mocowania silników w indywidualnych gondolach. Umożliwia to swobodny dopływ powietrza do krótkich wlotów 2 lub 4 silników o łatwym dostępie dla mechaników dokonujących na lotnisku niezbędnych przeglądów i czynności eksploatacyjnych.

Na rysunku 1 przedstawiono schematy kilku charakterystycznych rozmieszczeń wlotów, kanałów doprowadzających powietrze do silników oraz samych silników w kadłubach samolotów

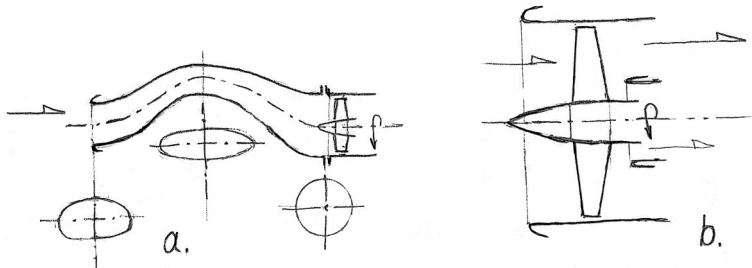
¹ Wynika to z konieczności zapewnienia temperatury spalin kierowanych do turbiny na poziomie dopuszczalnym dla bezpiecznej (ze względów wytrzymałościowych) pracy tego zespołu.

bojowych oraz położenie silników we współczesnych samolotach pasażerskich. Ten sposób rozmieszczania silników w dużych samolotach pasażerskich wyparł (chyba już całkowicie) mocowanie przykadłubowe silników².



Rys. 1. Charakterystyczne położenia wlotów i kanałów przepływowych powietrza do silników odrzutowych samolotów bojowych (a, b, c) oraz pasażerskich (d): 1 – silnik, 1' – wentylatorowy dwuprzepływowy silnik o dużym stosunku natężenia przepływu, 2 – kanał przepływowy, 3 - wlot

Oddalenie silników od kadłuba samolotu, w porównaniu z silnikami mocowanymi przykadłubowo, ułatwia dostępność eksploatacyjną do silników i poprawia komfort pasażerów przewożonych w kadłubie.



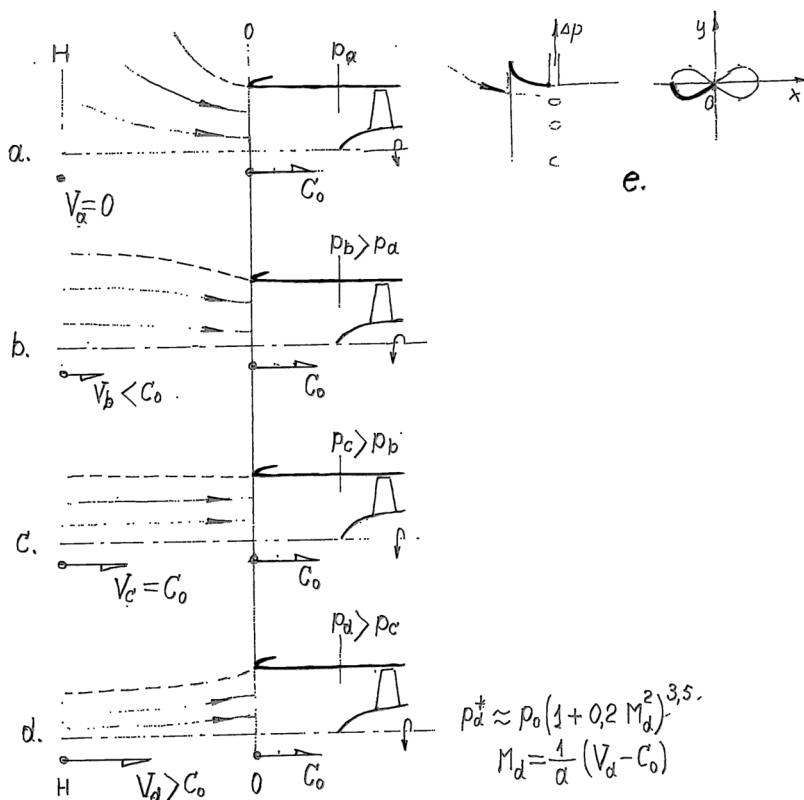
Rys. 2. Specyficzne ukształtowanie wlotu i wewnątrzkadłubowego kanału dolotowego do silnika samolotu bojowego (a) oraz wlotu do podskrzydłowego wentylatorowego silnika odrzutowego samolotu pasażerskiego (b)

Na rysunku 2 pokazano charakterystyczne ukształtowanie kanałów wlotowych powietrza do wewnątrzkadłubowego silnika samolotu bojowego oraz podskrzydłowego silnika samolotu pasażerskiego. W pierwszym przypadku rzuca się w oczy bardzo skomplikowany kształt osi kanału i jego przekrojów poprzecznych. Stanowi to skutek kompromisu między wystarczającą sprawnością i jednorodnością rozkładu prędkości napływu i ciśnień bezpośrednio przed wlo-

²Przykadłubowe usytuowanie silników zapoczątkowano we francuskich samolotach „Caravelle”. Jest ono nadal stosowane w samolotach dyspozycyjnych oraz nielicznych mniejszych samolotach pasażerskich, np. ERJ145 czy Fokker 100, natomiast w dużych samolotach pasażerskich zrezygnowano z niego na rzecz układu podskrzydłowego po wprowadzeniu do eksploatacji samolotów szerokokadłubowych.

tem do sprężarki silnika, a zachowaniem poprawnej aerodynamiki kadłuba samolotu i dostatku miejsca w kabinie dla pilota i urządzeń wewnętrznych samolotu. Natomiast wloty do podskrzydłowych silników samolotów pasażerskich cechuje wręcz wzorcowa prostota tak pod względem napływu powietrza z przestrzeni (oddalonych od kadłuba samolotu i jego podwozia podczas startu i lądowania), jak i niezakłóconego geometrycznie osiowoosymetrycznego bardzo krótkiego kanału dolotowego do obu kanałów wentylatorowego silnika odrzutowego.

W tym artykule nastawne wloty silników naddźwiękowych samolotów bojowych, ich opisy i działanie w różnych warunkach lotu całkowicie pominięto – tak ze względu na obecną dostępność bardzo wielu pozycji literaturowych, jak i obserwowane zmiany taktyki lotniczej ograniczającej potrzeby wykonywania lotów z prędkością naddźwiękową³. W tej pracy natomiast zdecydowaliśmy się przedstawić opisy zmian cech przepływowych wlotów powietrza do silników podczas lotu z różnymi prędkościami i osiągow silnika traktowanego jako zespół napędowy wraz z wlotem.



Rys. 3. Wpływ prędkości lotu na efektywność pracy wlotu powietrza do silnika i opór aerodynamiczny gondoli silnikowej:

a - podczas pracy silnika na postoju samolotu, b - podczas lotu z bardzo małą prędkością, c - w warunkach przelotowych, d - z dużą prędkością lotu, e - ukształtowanie wlotu wg lemniskaty,

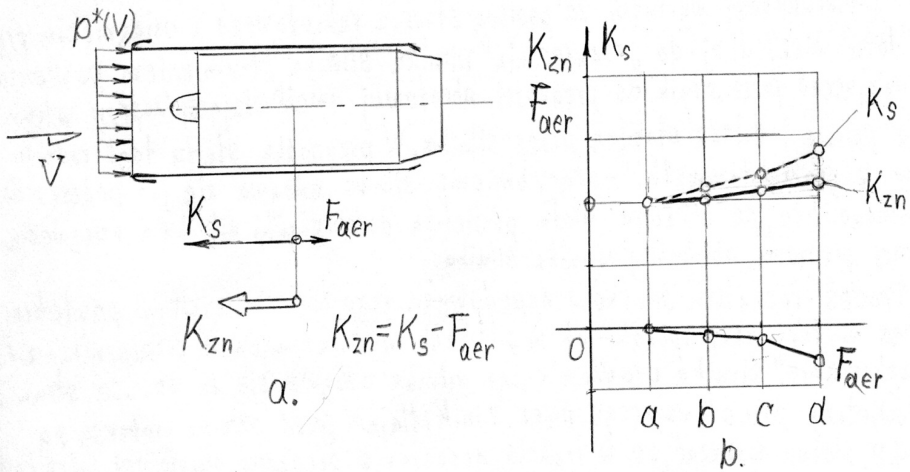
V, C_0 - prędkość lotu i prędkość przepływu powietrza we wlocie, p - ciśnienie przed wlotem do silnika,

$M=V/a$ - prędkość lotu wyrażona liczbą Macha, a - prędkość dźwięku

³Nasze naddźwiękowe F-16 nie mają nastawnych wlotów powietrza do silników ale, ponieważ użytkownik może wybrać silnik GE albo PW, które mają zbliżone osiągi przy nieco różnych natężeniach przepływu powietrza, to płatowcowe wloty powietrza różnią się polami powierzchni.

Na rysunku 3 przedstawiono wloty z zaznaczeniem wektorów prędkości przepływu w kanale dolotowym oraz wektorów prędkości napływu powietrza V w przestrzeni przedwlotowej (tutaj równej prędkości lotu samolotu). Przedstawiono także charakter napływu powietrza zasysanego z otoczenia podczas pracy silnika nieruchomego samolotu na ziemi. W każdym z przypadków przyjęto jednakowe prędkości C_0 w kanale dolotowym silnika, natomiast różne prędkości V lotu samolotu!

Pierwszy przypadek (a) zachodzi podczas pracy silnika samolotu na postoju, co oznacza, że dopływ powietrza do silnika jest wyłącznie skutkiem ssącego działania sprężarki napędzanej energią turbiny. Dla tego zakresu warunków pracy silnika uważa się za najlepsze ukształtowanie wlotu w postaci odcinka lemniskaty⁴. Drugi przypadek (b) zachodzi podczas lotu z niewielką prędkością – mniejszą niż we wlocie silnika, ale już „wspomagającą” zasysanie powietrza przez sprężarkę silnika. Trzeci przypadek (c) to występowanie jednakowych wartości prędkości w kanale dolotowym silnika i prędkości lotu. W tym przypadku ciśnienie spiętrzenia p_c^* strumienia wynikające z prędkości lotu V_c pokrywa straty dolotowe strumienia zasysanego przez sprężarkę, a na wlocie do sprężarki panuje ciśnienie bliskie ciśnieniu otoczenia. Natomiast czwarty przypadek (d) przedstawia warunek lotu z większą prędkością niż we wlocie silnikowym. Wówczas występuje „dynamiczne doładowanie” silnika powietrzem o ciśnieniu całkowitym p_d^* wynikającym z nadwyżki prędkości lotu V_d nad prędkością we wlocie silnika C_0 . Wpływa to oczywiście na wzrost ciągu silnika ze względu na wzrost masowego natężenia przepływu powietrza przez silnik⁵, jednak zwiększone ciśnienie w płaszczyźnie wlotu silnika wywołuje powstanie siły oporu aerodynamicznego F_{aer} skierowanego przeciwnie do kierunku lotu samolotu.



Rys. 4. Schemat dolotu powietrza do silnika (a) oraz zależność ciągu silnika K_s , oporu aerodynamicznego F_{aer} oraz ciągu zespołu napędowego K_{zn} od prędkości lotu V samolotu (b): a, b, c oraz d – charakterystyczne przypadki prędkości lotu odpowiadające oznaczeniom z rys. 3

Na rysunku 4 pokazano schemat dolotu powietrza do silnika (z prędkością V lotu samolotu) z zaznaczeniem układu sił ciągu silnika K_s , oporu aerodynamicznego F_{aer} i wypadkowego ciągu K_{zn} zespołu napędowego dla charakterystycznych przypadków prędkości lotu V , jak na rys. 3.

⁴Tak ukształtowane wloty są wykorzystywane w badaniach stacjonarnych silników turbinowych, co umożliwia jednocześnie pomiar natężenia przepływu powietrza, a także stosowane są w samolotach poddźwiękowych.

⁵Ze względu na większe ciśnienie w strumieniu powietrza wlotowego i jego gęstość.

Przedstawiona problematyka związków prędkości V lotu samolotu z ciągiem K_{zn} zespołu napędowego, zależnym także od zakresu pracy silnika (przede wszystkim od prędkości obrotowych jego wirników) oraz wysokości lotu H , wskazuje na potrzebę równoległego wyboru (i w następstwie konstruowania) osiągow samolotu i silnika. Jest to zadanie bardzo trudne: wybrać optymalne proporcje ciągu zespołu napędowego i prędkości lotu koniecznych do spełnienia wymogów przewidywanych misji lotniczych samolotu. Oczywiście, jest to zadanie skomplikowane, ale konieczne do spełnienia w samolotach bojowych bezpośredniego wsparcia pola walki, ale względnie łatwe i korzystne w samolotach lotnictwa pasażerskiego i transportowego dalekiego zasięgu⁶.

2. ZAGROŻENIA USZKODZENIA SILNIKÓW I ICH WLOTÓW POWIETRZA

Wloty i kanały wlotowe do turbinowych silników odrzutowych, jak i same silniki „od zawsze” są narażone na uszkodzenia mechaniczne na skutek zassania z podłoża tzw. ciał obcych podczas pracy silników na ziemi, a w locie wskutek wpadnięcia ptaka (lub nawet ich stada), bryłek gradu czy kawałków lodu oderwanych z krawędzi wlotu. Powyższe zagrożenia intensyfikują się wraz ze wzrostem ciągu silników (i wzrostem natężenia przepływu powietrza przez ich wloty). Szczególnie narażone są wentylatorowe silniki dwuprzepływowe zamocowane na płatowcu podskrzydłowo.

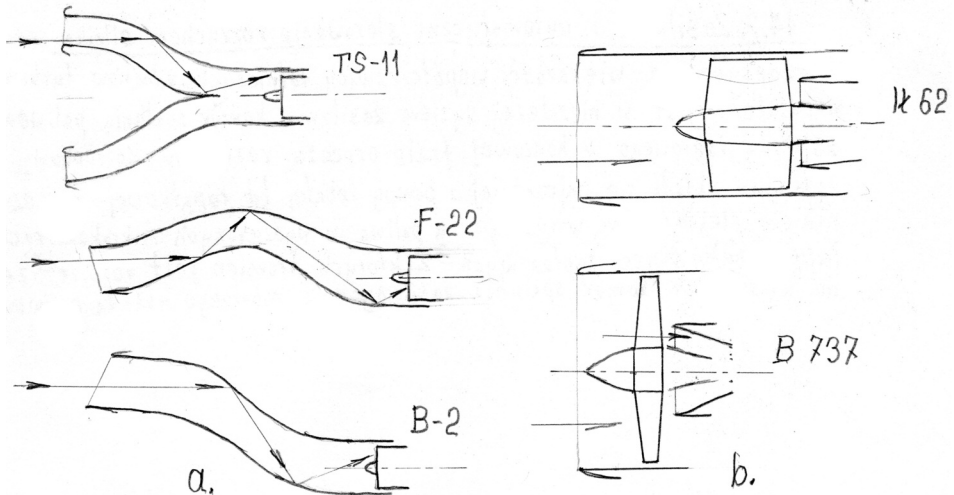
Występuje wówczas zbieg okoliczności: bardzo duże natężenie przepływu, bliskość krawędzi wlotu względem nawierzchni lotniska oraz duże prawdopodobieństwo wywołania intensywnego wiru wlotowego spowodowanego ruchem łopat obracającego się wentylatora. Środki przeciwdziałania temu zjawisku to zastosowanie wyłożonych na ziemi przeszkód ograniczających możliwość powstania wiru, w postaci klinów, ostrosłupów i krutek, czy nawet sztucznej trawy. Natomiast **podczas lotu zachodzi absolutna konieczność wyprzedzającego włączenia systemu ogrzewania** uniemożliwiającego powstanie oblodzenia krawędzi wlotu do kanału doprowadzającego powietrze do silnika. Dostatecznie pewnego zabezpieczenia przed wpadnięciem ptaków do wlotów silników nie ma. W silnikach Rolls-Royce Derwent i Nene oraz ich „licencyjnych” wersjach rozwojowych stosowano na wlotach do sprężarek stalowe siatki (o oczkach rzędu kilku milimetrów) skutecznie chroniące łopatki zabieraków ich wirników, ale niestety pogarszających sprawność tych zespołów. W sprężarkach osiowych i wentylatorowych silników dwuprzepływowych ochronę przed uszkodzeniami wirników mogą stanowić palisady kierownic przed ich stopniami wlotowymi⁷.

Pod względem cech ochronnych samych wlotów oraz ich kanałów dolotowych silników wyraźnie zarysowuje się podział na osiowosymetryczne krótkie wloty silników samolotów pasażerskich i transportowych (instalowanych na samolotach zarówno podskrzydłowo, jak i przykadłubowo) oraz długie, krzywoliniowe kanały do wewnątrzkadłubowych silników samolotów bojowych, a także szkolno-bojowych. W tej grupie samolotów ukształtowanie kanałów (zwykle w formie bardzo spłaszczonej litery „S”) ma wady w postaci oporów przepływu, ale i zalety – utrudniona obserwacja echa radarowego wirujących wlotowych łopatek wirnika sprężarki lub wentylatora oraz ewentualne wpadnięcia ptaka do silnika już w postaci bezwładnego ciała z pogruchotanymi kośćmi – wskutek wielokrotnych zderzeń ze ścianami kanału z prędkością rzędu 200 m/s. Podobnie następuje rozdrabnianie bryłek gradu lub kawałków lodu oderwanego z krawędzi natarcia wlotu kanału - dolotowego.

⁶Długotrwałe loty z pełnym obciążeniem oraz ustaloną prędkością V i wysokością H .

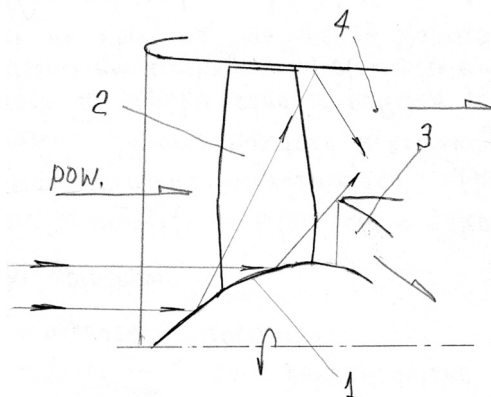
⁷W silnikach wentylatorowych powszechnie stosuje się malowanie spiralnych smug na stożkach stopni wlotowych ich wirników w kolorach „błyskających” podczas ruchu obrotowego – imitujących blask oczu ptaków drapieżnych.

Na rysunku 5 przedstawiono szkice opisanych wyżej wlotów i kanałów dolotowych powietrza do silników. Wydawać się może, że powyższe opisy wyczerpują problematykę istoty roli, jaką spełniają wloty powietrza do turbinowych silników samolotów odrzutowych wykorzystywanych w specyficznych obszarach współczesnego lotnictwa, ale okazuje się, że wymogi bezpieczeństwa latania wręcz narzucają konieczność permanentnego poszukiwania sposobów poprawy konstrukcji wlotów.



Rys. 5. Charakterystyczne kształty kanałów dolotowych powietrza do silników odrzutowych samolotów bojowych (a) oraz podskrzydłowych i przykadłubowych silników samolotów pasażerskich (b)

Jednym z zaskakujących skutków poszukiwań jest skonstruowanie przez firmę General Electric „urządzenia” spełniającego rolę bezwładnościowego odpylacza powietrza wlotowego w wentylatorowym dwuprzepływowym silniku odrzutowym. Polega ono na takim ukształtowaniu wlotowego stożka wirnika wentylatora, aby „ugięty” strumień powietrza wyniósł mniejsze ziarna pyłu do kanału zewnętrznego, a większe – odbite od ściany stożka „wrzucił” do tego kanału. Schemat wyjaśniający ideę takiego „odpylacza” przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. „Odpylacz” powietrza wlotowego wg idei firmy General Electric:
1 – stożek wlotowy, 2 – wentylator, 3 – kanał wewnętrzny silnika, 4 – kanał zewnętrzny

Jest to niewątpliwie zaskakujące (ze względu na skalę wymiarów) wykorzystanie zasady działania bezwładnościowego odpylacza zintegrowanego ze śmigłowcowym silnikiem T700 tej samej firmy, od dawna wykorzystywanego jako napęd śmigłowców bojowych. Konstruktor zastosował dodatkowo uchylne kłapy w zewnętrznej ścianie kanału wewnętrznego, aby usunąć ze strumienia wewnętrznego pozostałe resztki małych ziaren pyłu, które jak dotąd usuwa się podczas okresowego mycia kanałów strumieniem wody.

Odpylacz taki skutecznie chroni także delikatne łopatki wirników i kierownic przed zderzeniami z ziarnami gradu i kawałkami lodu mogącego się osadzać na krawędzi wlotu przy zbyt późnym włączeniu ich ogrzewania.

PODSUMOWANIE

Największe zagrożenia uszkodzeń silników odrzutowych i ich skutków stanowią zderzenia łopatek ich wirników z przedmiotami o znacznej masie, które znalazły się w kanale przepływowym wytwornicy spalin. Wynika stąd jednoznacznie, że takie przypadki mogą występować w przypadku:

- wpadnięcia do wlotu silnikowego pojedynczego ptaka lub nawet sporego stada podczas lotu samolotu⁸
- wpadania do wlotu bryłek gradu – w znacznej części możliwe do przewidzenia przez załogę
- wpadnięcia do kanału dolotowego silnika kawałków lodu osadzającego się na krawędziach wlotu przy nie włączeniu instalacji przeciwołodziowej lub po zbyt późnym jej włączeniu
- konieczne jest wyprzedzające włączenie instalacji przeciwołodziowej przez odpowiednio dokształconą załogę
- zassanie z nawierzchni lotniska ciał obcych przez powstały wir wlotowy – możliwe jest utrudnienie tworzenia się wiru przez zastosowanie odpowiednich przeszkód naziemnych oraz zachowanie absolutnej czystości nawierzchni w strefie wyczekiwania na start i miejscach obsługi silników.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W., Chachurski R., Głowacki P., Kozakiewicz A., Szczeciński J., Szczeciński S., *Problematyka filtracji powietrza wlotowego do turbinowych silników śmigłowcowych*, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 199, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 2009;
- [2] Balicki W., Głowacki P., Szczeciński S., *Uszkodzenia silników odrzutowych*, Przegląd Sił Powietrznych, nr 2 (008), Warszawa, 2008;
- [3] Chachurski R., *Zagrożenia oblodzeniem silników tłokowych*, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 199, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 2009;
- [4] Gajewski T., *Analiza zgodności współpracy turbinowego silnika odrzutowego z wlotem*, Technika Lotnicza i Astronautyczna, nr 9, Warszawa, 1975;
- [5] Głowacki P., *GENx – nowe technologie i ich wpływ na obsługę techniczną*, Seminarium Lotnicze silniki turbinowe, Poznań, 2009;
- [6] Kazimierski Z., *Ruch wirowy płynów w przyrodzie oraz w maszynach i urządzeniach*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2007.

⁸Średnica wlotu już znacznej liczby wentylatorowych dwuprzepływowych silników odrzutowych dochodzi do 3 m lub nawet przekracza tę wartość, a prędkość osiowa strumienia we wlocie 200 m/s. Zdarzenia takie są dość częste, ale zupełnie przypadkowe – zaskakujące pilotów.