

Jest wiele rodzajów turbin - parowe, stosowane w elektrowniach ciepłych, wykorzystujące parę podgrzaną węglem, gazem lub energią atomową; wodne - w elektrowniach wodnych, a także ustawiane na polach - wiatrowe. Różnią się one konstrukcją ze względu na prędkość pracy i gęstość środka roboczego, który je napędza, lecz zasada ich działania jest taka sama.

SILNIK TURBINOWY

Marek Utkin

rys. Tomasz Paleczny

Turbina gazowa jest rozwinięciem tej idei, tylko że w tym przypadku źródło napędu stanowi sprężony gaz. Jednak silnik turbinowy gaz do własnego napędu wytwarza sam, a czyni to przez spalanie propanu, gazu ziemnego, nafty lub paliwa lotniczego. **Ciepło wytwarzane przez spalanie paliwa powoduje rozszerzanie powietrza, ono zaś, wprowadzone w szybki ruch, napędza turbinę, a ta z kolei napędza sprężarkę, dostarczając sprężonego powietrza, które miesza się z paliwem, spala, itd...** Proces ten można porównać z normalnym cyklem pracy silnika czterosuwowego - zasysanie, sprężanie, zapłon i wydech - lecz odbywające się STALE i JEDNOCZEŚNIE. Silniki turbinowe najczęściej są stosowane do napędu samolotów: odrzutowych, turbośmigłowych i helikopterów, a także - o czym wiedza nie jest tak powszechna - pojazdów takich, jak lokomotywy, kutry pościgowe, czołgi, a nawet... samochody.

HISTORIA

Najwcześniejszymi silnikami turboodrzutowymi były modele hybrydowe, gdzie sprężanie zapewniało zewnętrzne źródło energii - zazwyczaj silnik spalinowy. Urządzenie takie wykonał Henri Coanda w 1910 r. i Secondo Campini w latach 30. (określił je mianem silnika termoodrzutowego). W samolocie Caproni-Campini-2 silnik napędzał zestaw otunelowanych śmigieł, wtlaczających powietrze do komory spalania, a więc był to w zasadzie silnik spalinowy z dopalaczem. CC-2

był wolniejszy od standardowego samolotu napędzanego taką samą jednostką spalinową. Japończycy napędzali (również bez większych sukcesów) podobnymi urządzeniami swoje samobójcze samoloty Okha.

Kluczem do wytworzenia działającego jak należy silnika odrzutowego okazała się turbina gazowa, zastosowana do pobierania energii do napędu sprężarki z samego silnika. Prace nad takim „samozasilającym” napędem rozpoczął w Anglii w latach 30. Frank Whittle, który jednostopniową turbiną napędzał sprężarkę odśrodkową. Niezależnie badania nad podobnym urządzeniem rozpoczął w 1935 r. Hans von Ohain w Niemczech.

Anselm Franz z zakładów Junkersa zastosował turbinę osiową. Tu powietrze, wchodząc z przodu silnika, było sprężane w kanale o zmniejszającym się przekroju przez kolejne pierścienie łopatek sprężarki i łopatek nieruchomych, czyli tzw. kierownic. Silniki ze sprężarką osiową mają znacznie mniejszą średnicę, niż modele ze sprężarką odśrodkową. Taki też był Jumo 004, zastosowany m.in. w Messerschmidcie 262. W zasadzie wszelkie obecnie produkowane silniki turboodrzutowe są oparte o rozwiązania Whittle'a lub Franza, lub są ich mieszanką.

TROCHĘ TEORII

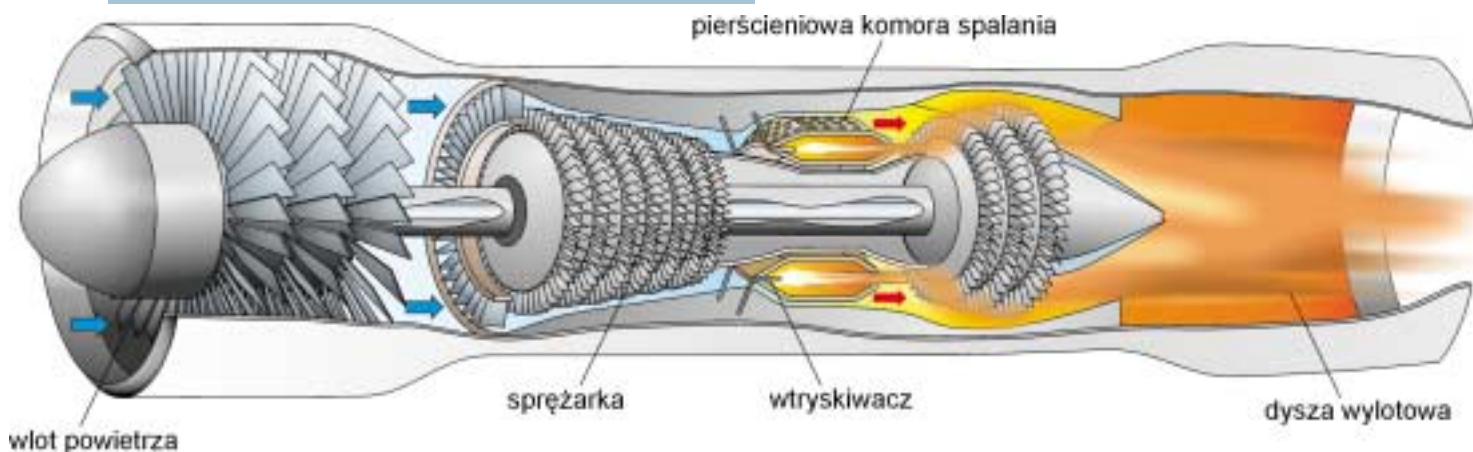
Turbiny gazowe (teoretycznie) są bardzo proste. Składają się z trzech części:

- **Sprężarki** - sprężającej powietrze do wysokiego ciśnienia.
- **Komory spalania** - w której spala się paliwo, wytwarzając gaz o wysokim ciśnieniu i temperaturze.
- **Turbiny** - pobierającej energię ze strumienia gazów opuszczających komorę spalania.

Wszystkie silniki odrzutowe działają, wtlaczając chwytną powietrze do rury, w której jest ono sprężane, mieszane z paliwem, podpalane i wyrzucane z dużą prędkością, aby wytworzyć ciąg.

Kluczowym zagadnieniem sprawiającym, że silnik odrzutowy działa, jest sprężenie powietrza wlotowego. Mieszanka paliwowo-powietrzna, gdyby nie była sprężona, nie zapaliłaby się i silnik nie wytworzyłby ciągu. W większości silników odrzutowych wykorzystuje się sekcję sprężarek zbudowanych z wirujących łopatek, które nadają powietrzu wlotowemu wysokie ciśnienie. Zostaje ono wtłoczone do komór

Zasada działania silnika turboodrzutowego



spalania, gdzie miesza się z paliwem i podpala. Gdy gazy są wyrzucane pod wysokim ciśnieniem, przechodzą przez część turbinową, złożoną z kilku rzędów obracających się łopatek. W tym miejscu gazy wydechowe obracają turbiną, która jest połączona wałem ze sprężarką z przodu silnika. Gazy wydechowe wydobywają się z dyszy, aby zapewnić ciąg (ewentualnie większość ich energii jest przeznaczana do napędzania śmigieł, wirników i innych urządzeń).

Jak we wszystkich silnikach cieplnych, wydajność silnika odrzutowego jest

zależna od temperatury gazów wydechowych - wyższa temperatura oznacza więcej energii z paliwa. Zgodnie z fizyką gazów, gdzie ciśnienie i temperatura są odwrotnie proporcjonalne, można w uproszczeniu powiedzieć, że proporcja objętości gazu pobranego do objętości gazów po spalaniu (wydechu) stanowi współczynnik sprężania.

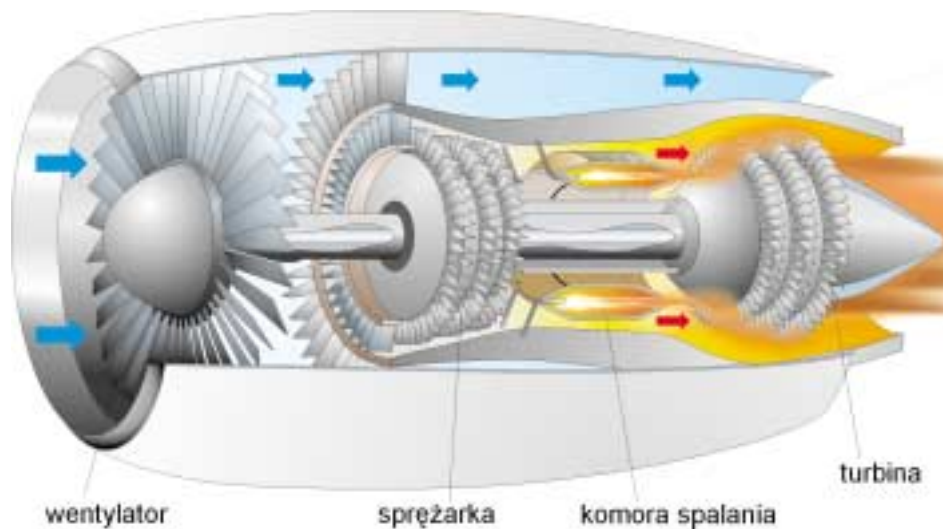
Wczesne silniki odrzutowe miały współczynnik sprężania 5:1, co w porównaniu z normalnym silnikiem o cyklu Otto, osiągającym od 6:1 do 9:1, było wartością raczej niewysoką. Czynnikiem ograniczającym jest temperatura na początku turbiny. Zwiększanie stopnia sprężania sprawia, że znacznie więcej mieszanki paliwowo-powietrznej jest tłoczona do komór spalania, i osiąga ona znacznie wyższą temperaturę. Ten problem występuje przy starcie, gdy samolot zwiększa pułap, ciśnienie zewnętrzne spada i sprężarka pracuje na wyższych obrotach. Rozwiązaniem tego problemu jest odprowadzenie pewnej ilości powietrza ze sprężarki, przepompowanie go wzdłuż wału i wypuszczenie przez puste w środku łopatki turbiny. Takie łopatki są dosyć drogie w produkcji, co jest jednym z powodów, dla którego silniki odrzutowe nigdy nie stały się tak powszechne, jak sądzono. Jednak jakość i sprawność systemów odprowadzania powietrza rośnie, co sprawia, że najnowszy Rolls-Royce Trent działa przy współczynniku sprężania 44:1, znacznie powyżej możliwości silników tłokowych.

W DETALACH...

Sprężarka

W turbinie gazowej sprężania powietrza dokonuje się za pomocą dwóch podstawowych typów sprężarek - odśrodkowej i osiowej. Oba rodzaje sprężarek napędzane są przez turbinę silnika i zazwyczaj połączone bezpośrednio z wałem turbiny.

W sprężarkach odśrodkowych stosuje się wirnik przyspieszający powietrze i dyfuzor, hamujący je, aby wytworzyć wysokie ciśnienie. Powietrze przepływa przez sprężarkę odśrodkową promieniowo (pod kątem 90° do kierunku lotu) i musi zostać przekierowane z powrotem w stronę komory spalania, co powoduje



obniżenie efektywności. W sprężarkach osiowych stosuje się naprzemiennie rzędy wirujących łopatek, przyspieszających przepływ, i łopatek nieruchomych (kierownic), hamujących powietrze aż do osiągnięcia właściwego ciśnienia.

Przyrost ciśnienia, jaki można uzyskać na jednym stopniu sprężarki osiowej, jest dużo mniejszy niż na jednym wirniku sprężarki odśrodkowej. To znaczy, że dla uzyskania takiego samego ciśnienia, sprężarka osiowa wymaga wielu stopni, lecz może ich być naprawdę dużo, co zapewnia wzrost ciśnienia nieosiągalny dla sprężarek odśrodkowych.

Silniki ze sprężarką odśrodkową mają zazwyczaj większą powierzchnię czołową, za to silniki ze sprężarką osiową są dłuższe i węższe. To, plus możliwość dodania większej ilości stopni sprężania, powoduje, że są stosowane częściej, poza niewielkimi silnikami, w których prostota, wytrzymałość i łatwość produkcji przeważają wymienione wyżej wady.

Sprężarka zużywa 60 do 65% mocy wytwarzanej przez silnik odrzutowy. To jest także jeden z powodów, dla których turbiny nie są powszechnie spotykane w transporcie lądowym.

Komora spalania

Komora spalania ma niełatwe zadanie spalania wielkich ilości paliwa, podawanego przez wtryskiwacze, z wielkimi ilościami powietrza, tłoczonymi przez sprężarkę i wyzwalania otrzymanego ciepła, tak aby podgrzane powietrze rozszerzało się i przyspieszało w celu wytworzenia jednorodnego strumienia równomiernie podgrzanego gazu. To trzeba wykonać przy minimalnej utracie ciśnienia i maksymalnej wydajności cieplnej w ograniczonej przestrzeni. Jednak tu pojawia się problem - huraganowy strumień powietrza nie może zgasić płomienia, musi on być stabilny. Temu służą rury ogniowe, zawirowywacze powietrza i stateczniki płomienia.

Ilość paliwa zmieszanego z powietrzem zależy od wymaganego przyrostu temperatury. Jednak materiały zastosowane do budowy łopatek i dysz ograniczają maksymalną temperaturę do ok. 850 do 1700 °C. Ponieważ powietrze zostało podgrzane w wyniku sprężenia do 200 - 550 °C, wymagany przyrost temperatury

przy spalaniu wynosi ok. 650 - 1150 °C. Ponieważ temperatura gazów determinuje ciąg silnika, komora spalania musi być w stanie zapewnić stabilność płomienia w różnych warunkach pracy.

Temperatura gazów po spalaniu wynosi 1800 - 2000 °C, a to jest zbyt dużo dla łopatek kierujących turbiny. W związku z tym powietrze nie biorące udziału w spalaniu (tzw. powietrze wtórne, ok. 60% całości) wtłacza się do rur ogniowych. Jedna trzecia z tego służy obniżeniu temperatury wewnątrz komory spalania, reszta chłodzi ścianki rury ogniowej.

Komory spalania dzielą się na dzbanowe, pierścieniowe i rurowo-pierścieniowe. Komory dzbanowe są bezpośrednim spadkiem po wcześniejszych projektach

Tu pojawia się problem - gazy dostające się do turbiny mają temperaturę 850 - 1700 °C, co przekracza punkt topnienia obecnie stosowanych materiałów. Wymaga się, aby łopatki turbiny pracowały rozżarzone do czerwoności i wytrzymały wysokie siły odśrodkowe. Aby ominąć ten problem, do wydrążonych łopatek wprowadza się zimne powietrze, które wydostaje się przez wiele małych otworków w łopatce. Powietrze to tworzy warstwę laminarną, izolującą od rozpalonych gazów, lecz nie obniżającą sprawności silnika. Do wytwarzania łopatek stosuje się stopy o dużej zawartości niklu.

Oczywiście jest to obraz uproszczony - nie omawiamy tu łożysk, smarowania, zawieszania silnika, rozkładu ciśnień, technologii materiałów itd., czyli wszystkiego, co jest niezbędne do stworzenia silnika.

Dysza

W przypadku turbiny w elektrowni lub czołgu, gazy spalinowe są odprowadzane na zewnątrz, niekiedy przez wymiennik ciepła, podgrzewający powietrze tłoczone do komory spalania.

W samolotach rozgrzane, rozpędzone spaliny stanowią źródło napędu, a silnik turbinowy tak naprawdę umożliwia pozyskiwanie ich w ilości hurtowej. Turbiny gazowe w samolotach są wyposażone w system wydechowy, który wyrzuca do atmosfery spaliny z dużą prędkością i w pożądanym kierunku. Problemy projektowe są tu związane z zapobieganiem przeniesieniu ciepła na samolot, tłumieniem hałasu i odwracaniem ciągu przy lądowaniu.

Silnik wytwarza ciąg, ponieważ przyspieszając w sobie powietrze, generuje siłę - równą i skierowaną przeciwnie do kierunku ruchu tegoż powietrza (zgodnie z III zasadą termodynamiki Newtona). Wbrew powszechnemu przekonaniu, gazy wyrzucane z tyłu silnika nie „odpychają się od powietrza”. Silnik odrzutowy przemieszcza relatywnie małą ilość powietrza, za to przyspiesza je w bardzo dużym stopniu.

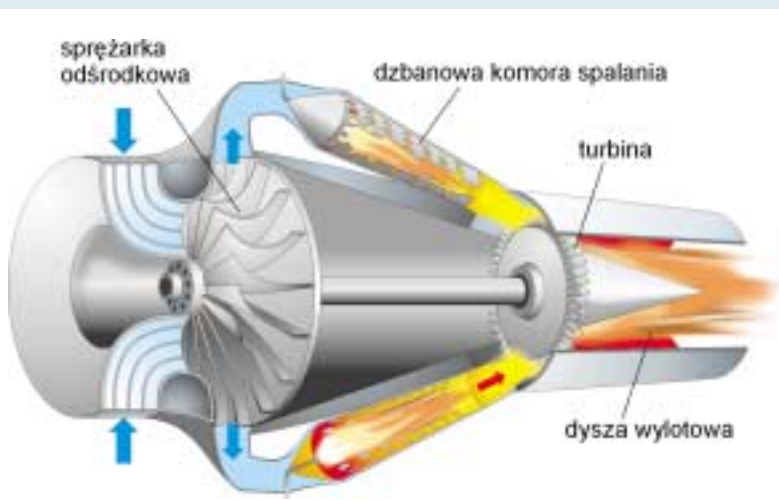
RODZAJE SILNIKÓW

Powyżej opisano prosty silnik turboodrztutowy, lecz rzeczywistość nie jest tak prosta, jak teoria.

Silnik turbowentylatorowy

Jeśli śmigło jest lepsze przy niskich prędkościach, a silnik turboodrztutowy - przy dużych, dla prędkości średnich istnieje rozwiązanie optymalne, będące skrzyżowaniem tych dwóch. Jest to silnik dwuprzepływowy, czyli turbowentylatorowy (turbofan). W silnikach turbowentylatorowych pierwszy stopień sprężarki został powiększony do tego stopnia, że stał się on otunelowanym śmigłem. Zakres prędkości najbardziej wskazany dla silników tego typu to 400 - 1050 km/h, co wyjaśnia, dlaczego silnik turbowentylatorowy jest najczęściej spotykanym silnikiem w lotnictwie.

Rdzeń silnika turbowentylatorowego stanowi normalny silnik turbinowy. Różnica polega na tym, że ostatnie stopnie turbiny napędzają wał, prowadzący przez cały silnik do przodu i napędzający wentylator. Zastosowanie wielu współosiowych wałów jest w silni-

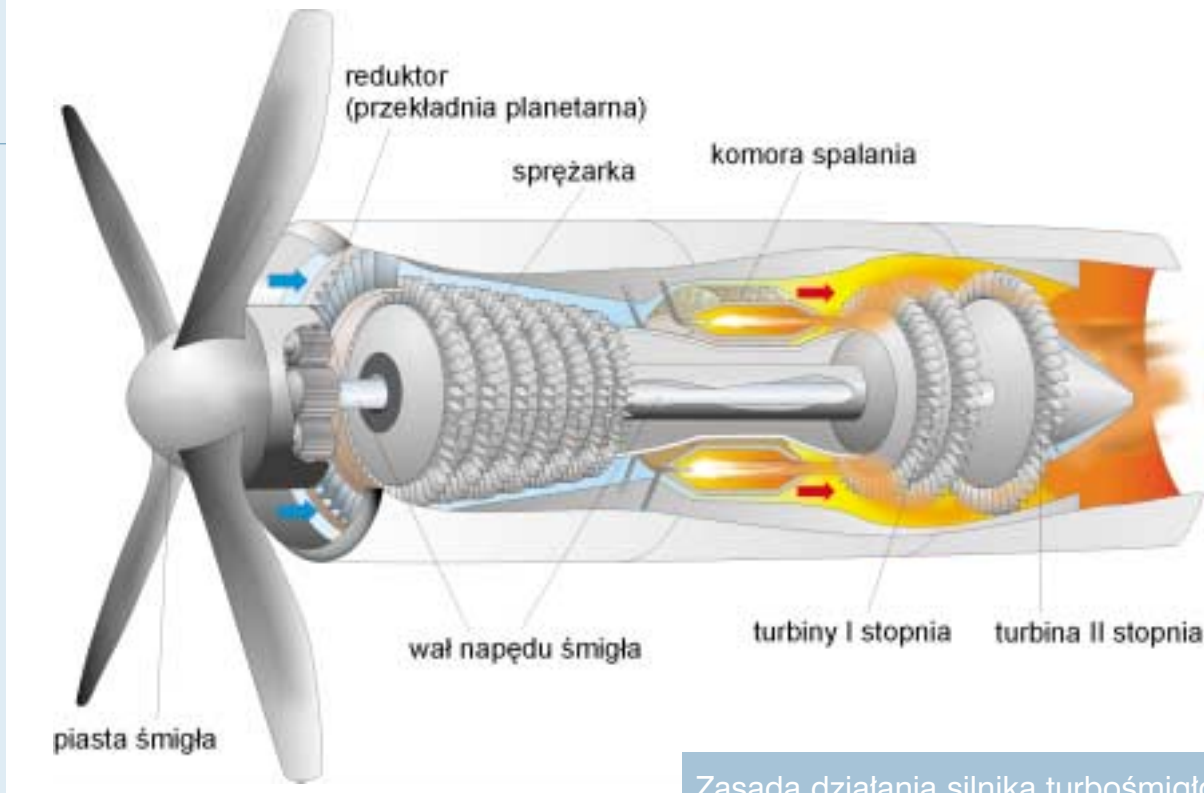


Zasada działania silnika turboodrztutowego ze sprężarką odśrodkową

Whittle'a. Są rozmieszczone wokół silnika i powietrze ze sprężarki jest do nich dostarczane osobnymi kanałami. Są one połączone wzajemnie w celu wyrównania ciśnienia i rozprowadzenia zapłonu. Komory rurowo-pierścieniowe to modele pośrednie pomiędzy dzbanowymi i pierścieniowymi. Komory pierścieniowe tworzy przestrzeń pierścieniowa ograniczona przez zewnętrzne i wewnętrzne ścianki rury ogniowej, umieszczonej wokół wału turbiny, a modele rurowo-pierścieniowe są to modele pośrednie. Obecnie stosuje się głównie komory pierścieniowe, gdyż przy takiej samej mocy ich długość stanowi jedynie 75% modeli rurowo-pierścieniowych o tej samej średnicy, co redukuje wagę i koszt.

Turbina

Dalej znajdują się turbiny, przechwytyjące energię gorących gazów z komory spalania. Pierwszy stopień napędza bezpośrednio sprężarkę. Drugi stopień turbiny, umieszczony na jednej osi, lecz niesprzęgnięty z pierwszym, napędza wał napędowy. Drugi stopień turbiny może obracać się swobodnie bez połączenia z resztą silnika - i to jest właśnie zadziwiające w silnikach turbinowych - gorące gazy przepływające między łopatkami ostatniego stopnia turbiny niosą tyle energii, że może ona wytworzyć moc 1500 KM i napędzać 63-tonowego Abramsa.



Zasada działania silnika turbośmigłowego

kach turbinowych bardzo popularne. Bywa nawet, że są dwa całkowicie oddzielone stopnie sprężania, napędzane osobnymi turbinami, oraz wentylator, napędzany jak wyżej. Wszystkie trzy wały kręcą się jeden w drugim.

Wentylator ma za zadanie znacznie zwiększyć ilość powietrza przechodzącego przez silnik, a więc zwiększyć ciąg silnika. Gdy ogląda się silnik odrzutowca na lotnisku, tym, co się przede wszystkim widzi, jest właśnie wentylator z przodu silnika. Jest duży - przeciętnie ma ok. 3 metrów średnicy i może przemieszczać wielkie masy powietrza. Powietrze wciągane przez wentylator jest to powietrze przepływu zewnętrznego, ponieważ opływa po powierzchni części turbinowej i przemieszcza się do wylotu, aby zapewnić ciąg.

Ciąg silnika turbowentylatorowego składa się z dwóch składników:

- Ciągu wytwarzanego przez turbinę gazową, z której dyszy jest wyrzucany strumień spalin o bardzo wysokiej prędkości (ok. 2100 km/h).
- Powietrza przepływu zewnętrznego, wytwarzanego przez wentylator (turbowentylator lub sprężarkę niskiego ciśnienia). Powietrze przepływu zewnętrznego porusza się wolniej niż gazy wyrzucane przez turbinę, lecz jest go znacznie więcej.

Współczynnik przepływu (zewnętrznego do wewnętrznego) jest ważnym parametrem silników dwuprzepływowych. Większość współczesnych myśliwców ma silniki dwuprzepływowe o niskim przepływie zewnętrznym, z współczynnikiem poniżej 1. Z kolei silniki o wielkim wlocie, widywane we wszystkich niemal cywilnych odrzutowcach, są wersjami o wysokim przepływie zewnętrznym, o współczynniku powyżej 3.

Silniki turbowentylatorowe (szczególnie o wysokim przepływie zewnętrznym) są również dosyć ciche. Hałas silnika odrzutowego jest w dużym stopniu związany z temperaturą powietrza wylotowego. W silniku dwuprzepływowym gorące powietrze miesza się z zimnym, opływającym silnik, co w rezultacie znacznie ob-

niża temperaturę. Oczywiście, samoloty odrzutowe są hałaśliwe, lecz jeśli wziąć pod uwagę, że wytwarzają one moc wielu dziesiątków tysięcy koni mechanicznych, to silnik tłokowy tej samej mocy byłby znacznie głośniejszy.

Silnik turbośmigłowy

Silnik turbośmigłowy jest podobny do silnika turbowentylatorowego, lecz zamiast otunelowanego wentylatora ma zainstalowane normalne śmigło. Dodany kolejny stopień turbiny zamienia niemal całą energię silnika odrzutowego w ruch obrotowy, zamiast w ciąg. Poruszany w ten sposób wał napędowy łączy się z przekładnią redukcyjną, zmniejszającą prędkość obrotową z ok. 16,000 obr./min. do ok. 1000 obr./min., a stąd napęd przekazywany jest do śmigła.

Silniki turbośmigłowe są powszechnie stosowane w samolotach pasażerskich, działających na krótszych dystansach, w ciężkich samolotach transportowych (poza tym wentylatory nie mają takiej odporności jak śmigła na zanieczyszczenia np. w postaci ziemi na lotniskach polowych), a także w helikopterach.

Silnik turbośmigłowy jest atrakcyjny w tych zastosowaniach z powodu dużej ekonomiczności w konsumpcji paliwa, nawet większej niż silnika turbowentylatorowego. Jednak hałas i wibracje wytwarzane przez śmigło stanowią znaczną wadę, ponadto nadaje się on do stosowania jedynie przy prędkościach poddźwiękowych. W typowym silniku turbośmigłowym silnik odrzutowy wytwarza ok. 15% ciągu, a śmigło - pozostałe 85%.

Podobne silniki turbinowe, w których energia gazów zamienia się w ruch obrotowy, znajdują się w wielu miejscach samolotów. Napędzają generator i stanowią lekkie i niezawodne źródło energii dla samolotu, gdy np. stoi on na lotnisku. Jest to tzw. APU (Auxiliary Power Unit, dodatkowa jednostka mocy). Większe wersje takich urządzeń są spotykane w elektrowniach szczytowych i na okrętach. ●