

Od czasu do czasu warto sobie odświeżyć podstawy lotniczej wiedzy. Przypominamy zasadę działania najpopularniejszego napędu w lotnictwie: silnika turbodrzutowego

Zamiast śmigła wentylator

fot. Michał Setlak

Od zarania lotnictwa silnikowym symbolem napędu samolotów było śmigło. Napęd śmigłowy miały myśliwce asów obu wojen światowych i kultowe samoloty pasażerskie, takie jak DC-3 czy *Lockheed Constellation*. Do lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku nad ziemią rozbrzmiewał warkot silników tłokowych. Od czasów braci Wright przeszły one niesamowitą ewolucję, której szczytowym etapem były 28-cylindrowe monstra w układzie poczwórnej gwiazdy o mocach rzędu nawet 2500 kW, takie jak *Pratt & Whitney R-4360 Wasp Major*. Drogą stopniowych udoskonaleń przy wielkiej mocy obniżano zużycie paliwa i zwiększano niezawodność, osiągając okresy międzynaaprawcze przekraczające 2000 h. Dzięki temu liniowce o masie startowej ponad 60 ton były w stanie przewieźć nawet 130 pasażerów na odległość 7-8 tys. km, lecąc z prędkością rzędu 400-500 km/h na wysokości 6000 m.

Dalsze zwiększanie osiągnięć samolotów komunikacyjnych powstrzymywały ograniczenia fizyczne - przy prędkościach ponad 0,6 Ma sprawność śmigła gwałtownie spada, więc wzrost prędkości wymagał-

by nieproporcjonalnego zwiększenia mocy silnika i wiązały się ze zmniejszeniem zasięgu i spadkiem ekonomiczności przewozów. To skupiło uwagę konstruktorów na pozbawionych tej wady silnikach odrzutowych, od pewnego czasu wykorzystywanych w lotnictwie wojskowym.

Idea

napędu odrzutowego nie była wcale nowa. W istocie pierwszy pa-

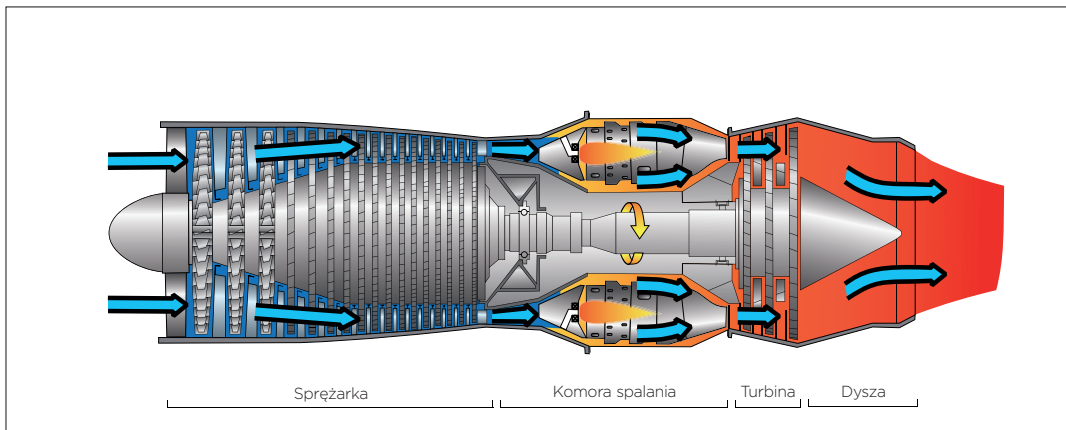
tent na lotniczy napęd turbodrzutowy uzyskał Francuz Maxime Guillaume już w 1921 r., jednak ówczesny stan techniki uniemożliwił realizację jego projektu. Kolejny patent dostał w roku 1930 Anglik Frank Whittle, następny - Niemiec Hans von Ohain w 1935. W 1936 von Ohain przeprowadził udane próby z silnikiem *Heinkel He S-1* o ciągu 245 daN, Whittle pokazał działający silnik w roku 1937. Pierwszym samolotem z napędem turbodrzutowym, który wzniósł się

Idea lotniczego napędu turbodrzutowego narodziła się kilkanaście lat po locie braci Wright...

Na pierwszym planie kierownice wlotowe, w głębi wentylator silnika D-30KU (Tu-154M)



fot. Michał Setlak



Jednoprzepływowy, jednowałowy silnik turboodrzutowy ze sprężarką osiową

rys. Wikimedia Commons

w powietrze, był oblatany 27.08.1939 *Heinkel He 178* z silnikiem *He S-3*. Brytyjski *Gloster G-40* z opracowanym przez Whittle'a silnikiem *W1* o ciągu 381 daN oblatano 15.05.1941. Oba te silniki wyposażone były w prostą sprężarkę osiową. Świadomość jej ograniczeń skłoniła Niemców do prac nad trudniejszymi konstrukcyjnie, ale dającymi większe perspektywy rozwoju sprężarkami osiowymi, których ukoronowaniem był silnik *Junkers Jumo 004*, napędzający m.in. słynny myśliwiec *Mes-*

Zasada

działania napędu turboodrzutowego jest prosta - do sprężonego przez sprężarkę powietrza jest wtryskiwane paliwo, którego spalanie powoduje powstanie dużej ilości gazów o bardzo wysokiej temperaturze. Gazy te następnie poruszają turbinę, która napędza osadzoną na wspólnym wale sprężarkę, a następnie wydostając się przez dyszę, wytwarzają ciąg. Za-

Agregaty silnika dwuprzepływowego Sołowiów D-30KU (Tu-154M)

1. Podgrzew wlotu powietrza,
2. Odśrodkowy odpowietrznik oleju,
3. Wymiennik ciepła olej-paliwo,
4. Główna pompa oleju,
5. Przednia przekładnia napędu agregatów,
6. Pompa hydrauliczna odwracacza ciągu,
7. Pompa paliwa,
8. Dajnik obrotów,
9. Pompa cieczy hydraulicznej,
10. Ciśnieniowa pompa paliwa,
11. Dajnik temperatury,
12. Odśrodkowy regulator sprężarki NC,
13. Dajnik obrotów NC,
14. Generator elektryczny,
15. Tylne przekładnie napędu agregatów,
16. Napęd stałych obrotów,
17. Regulator prędkości obrotowej,
18. Turbina napędu stałych obrotów,
19. Rozrusznik pneumatyczny,
20. Zawór rozrusznika,
21. Pompa olejowa.

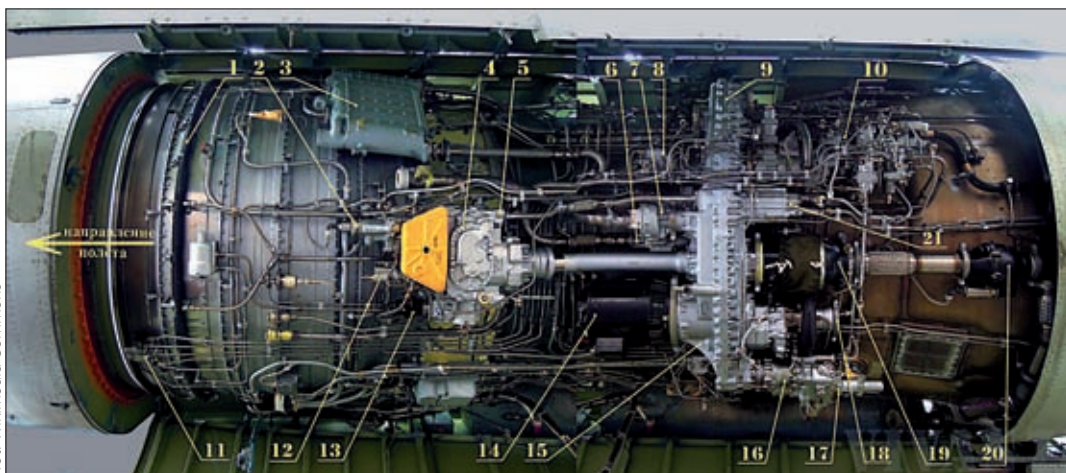


foto. Wikimedia Commons

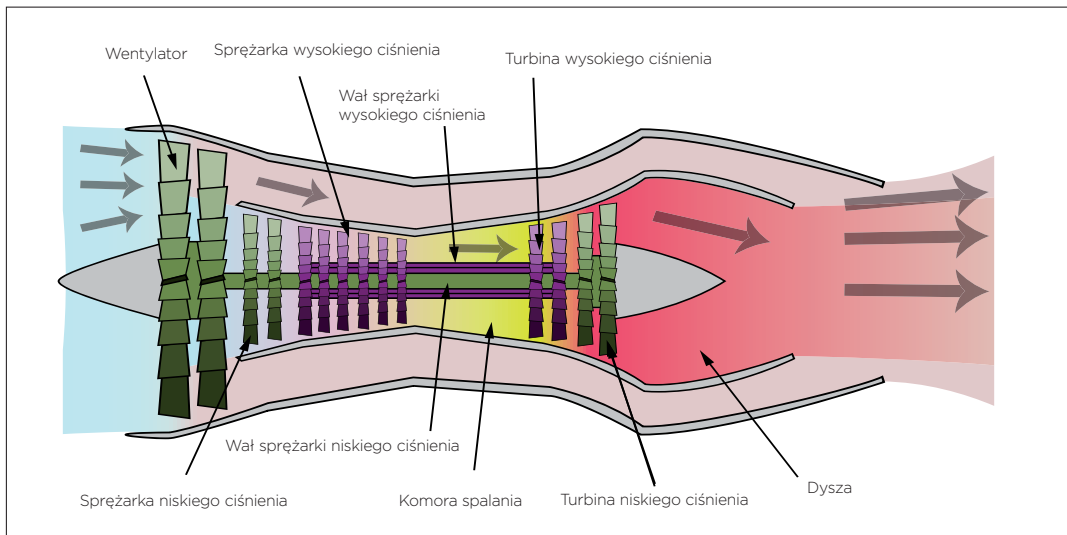
sada ta przekłada się na niewielką - zwłaszcza w porównaniu ze wspomnianymi na początku wyrafinowanymi silnikami tłokowymi - liczbę elementów ruchomych, wykonujących w dodatku jedynie ruch obrotowy, co ma kapitalne znaczenie dla trwałości mechanizmów i obniżenia poziomu wibracji.

W praktyce jednak procesy fizyczne zachodzące w silniku turbinowym stwarzają przed konstruktorami szereg problemów. Jednym z największych - i przez długie lata uniemożliwiających zbudowanie działającego silnika - jest wysoka temperatura gazów powstających w komorze spalania, sięgająca 2200-2400 K, którą muszą wytrzymać ścianki samej komory oraz łopatki turbiny. Rozwiązaniem okazało się z jednej strony opracowanie odpowiednich stopów, zdolnych przez długi czas wytrzymać wysokie temperatury bez pogorszenia parametrów, zaś z drugiej - chłodzenie wspomnianych elementów powietrzem. Umożliwia to odpowiednia konstrukcja komór spalania o podwójnych ściankach, gdzie zewnętrzny płaszcz zapewnia wytrzymałość na ciśnienie, zaś wewnętrzna tzw. rura ogniowa opływana jest od zewnątrz i od wewnątrz (poprzez odpowiednie otwory) warstwą powietrza pobranego ze sprężarki. Zmieszanie gorących spalin z powietrzem pozwala także obniżyć temperaturę gazów trafiających na łopatki turbiny (do ok. 1100-1700 K), które są dodatkowo chłodzone powietrzem. Dostarczane przez wydrążone wewnątrz łopatek kanały, wypływa ono przez małe otworki znajdujące się na ich powierzchni, tworząc ochronną warstewkę.

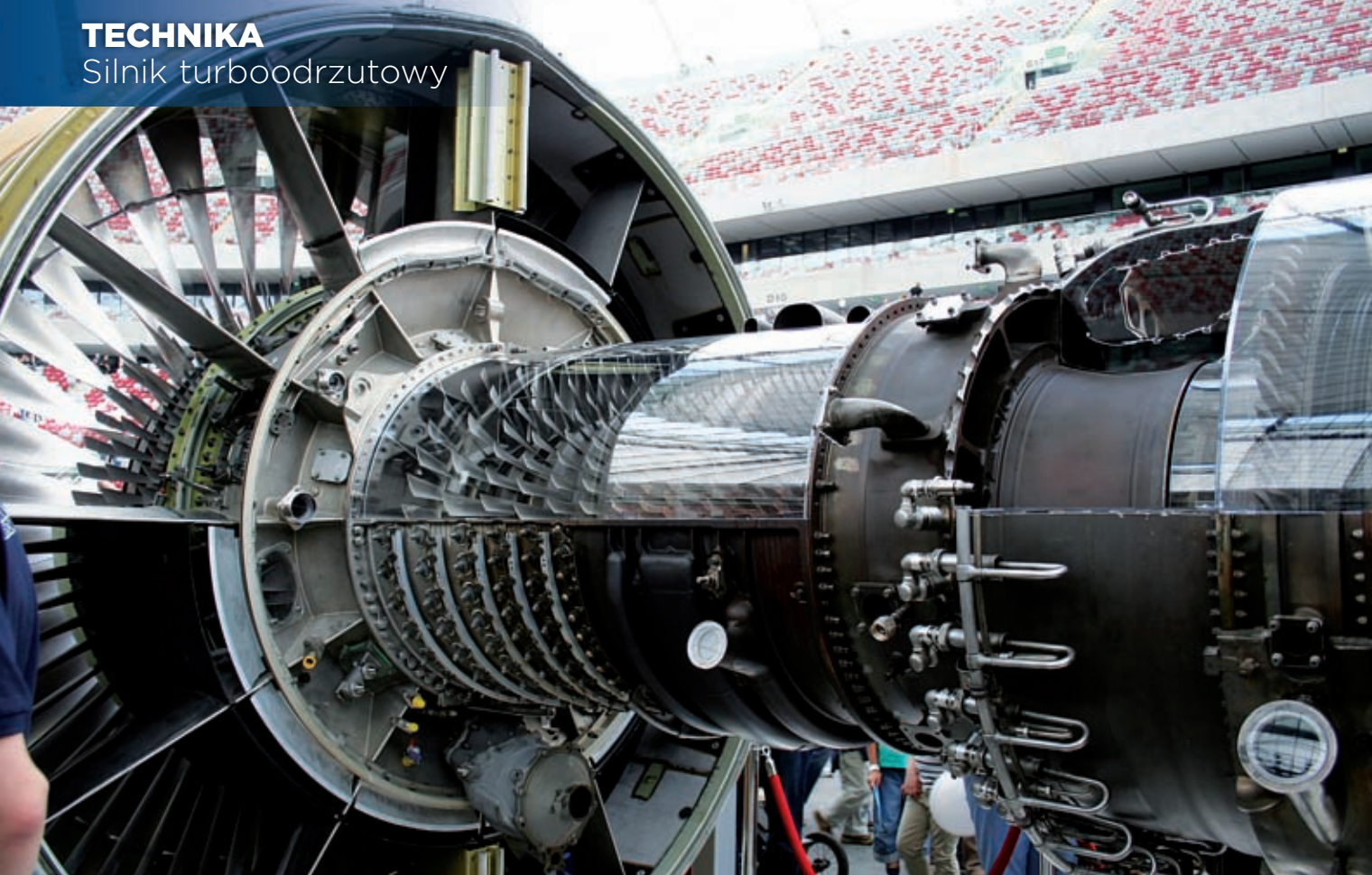
serschmitt Me 262 - Anglicy na długo pozostali wierni sprężarkom odśrodkowym. Koniec wojny wyeliminował Niemców z wyścigu technicznego, zaś ośrodkiem innowacji na długie lata stała się Anglia.

Prace nad cywilnym wykorzystaniem napędu turbinowego rozpoczęto w Wielkiej Brytanii już w 1943 roku, gdy specjalnie w tym celu powołana została komisja pod przewodnictwem lorda Brabazon of Tara. Efektem jej prac był szereg pionierskich konstrukcji samolotów odrzutowych i turbośmigłowych, w szczególności pierwszy turboodrzutowy samolot pasażerski świata - oblatany 27 lipca 1949 *de Havilland DH-106 Comet*.

Dwuwałowy, dwuprzepływowy silnik turboodrzutowy o małym stopniu dwuprzepływowości



rys. Wikimedia Commons



fol. Michal Setiak

GE CF-6 - pierwszy silnik o bardzo dużym stopniu dwuprzepływowości. Od lewej widoczne: wentylator, sprężarki niskiego i wysokiego ciśnienia, komora spalania, turbina wysokiego ciśnienia

Postępy

We wczesnych silnikach turbino- wych stosowano kilka dzbanowych (rurowych) komór spalania, roz- mieszczonych wokół korpusu. Były one proste w produkcji i naprawach, pozwalały łatwiej uzyskać stabilność płomienia. Z czasem wprowadzono komory dzbanowo-pierścieniowe o wspólnym płaszczu, zaś obecnie stosuje się najczęściej komory pierścieniowe, bardziej zwarte, dające bardziej równomierny rozkład tem- peratur i lepsze spalanie paliwa.

Pierwsze silniki turboodrzutowe wyposażone były w jednostopniową turbinę i jednostopniową sprężarkę odśrodkową. Sprężarka odśrodkowa ma dwie istotne wady - ma dużą średnicę, dającą dużą powierzchnię czołową silnika, i choć zapewnia spręż na jednym stopniu sięgający ok. 5,5, budowanie wielostopni-owych sprężarek odśrodkowych po- woduje nieracjonalny wzrost kompli- kacji i masy silnika. Duży spręż su- maryczny (od którego zależy moc i sprawność silnika) znacznie efek- tywniej uzyskuje się stosując wielo- stopniowe sprężarki osiowe - i wła- śnie takie układy mają współczesne silniki turboodrzutowe.

Każdy ze stopni sprężarki składa się z osadzonego na wale potężo-

nym z turbiną dysku z łopatkami oraz towarzyszącego mu wieńca łopatek kierownic, osadzonych na nie- ruchomym korpusie. Dążenie do uzyskania wysokiego sprężu, liczbę stopni sprężarki stopniowo zwięk- szano aż do niemal 20 (*Rolls-Royce Avon RA.29* miał 17), co spowodowało trudności z zapewnieniem optymalnego zakresu pracy dla każ- dego stopnia. Rozwiązaniem okaza- ła się mechanizacja sprężarek po- przez automatyczne regulowanie kąta zaklinowania kierownic przez

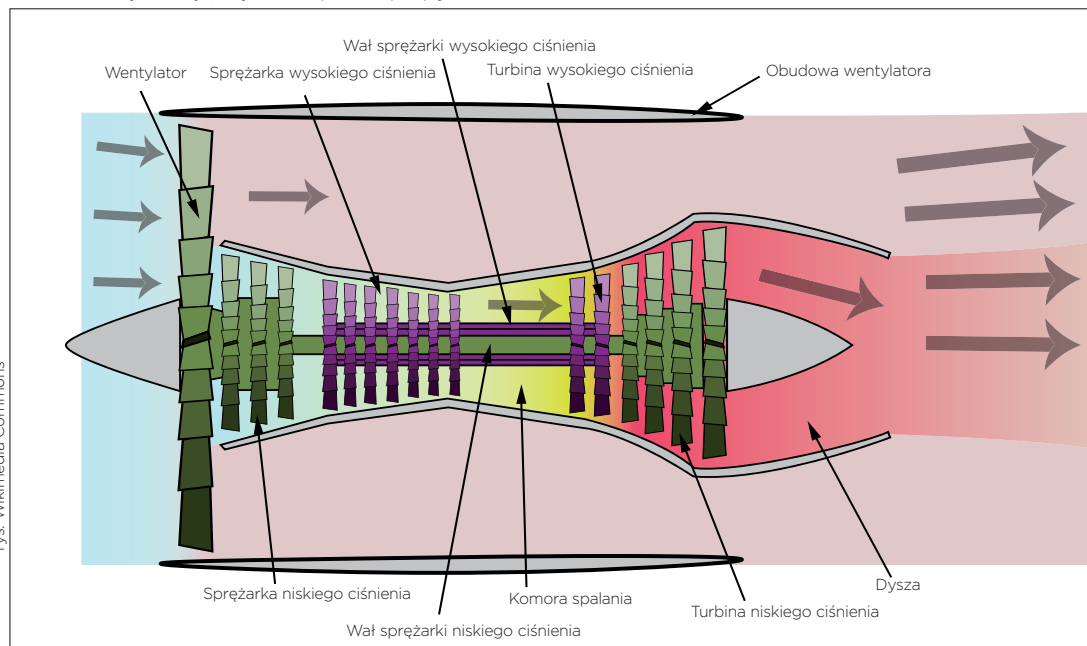
Sprężarki odśrodkowe zostały szybko wyparte przez sprężarki osiowe

układ sterujący silnikiem oraz wpro- wadzenie międzystopniowych za- worów upustowych.

Dwa wały

Zwiększanie liczby stopni sprężarki uwydatniło kolejny problem: kolejne stopnie osiągają optymalny zakres pracy przy coraz wyższych obrotach, tymczasem nie sposób zapewnić innej prędkości obrotowej dla każdego ze stopni. Wystarczają- cym rozwiązaniem okazało się jed-

Silnik turbowentylatorowy (o wysokim stopniu dwuprzepływowości)



rys. Wikimedia Commons

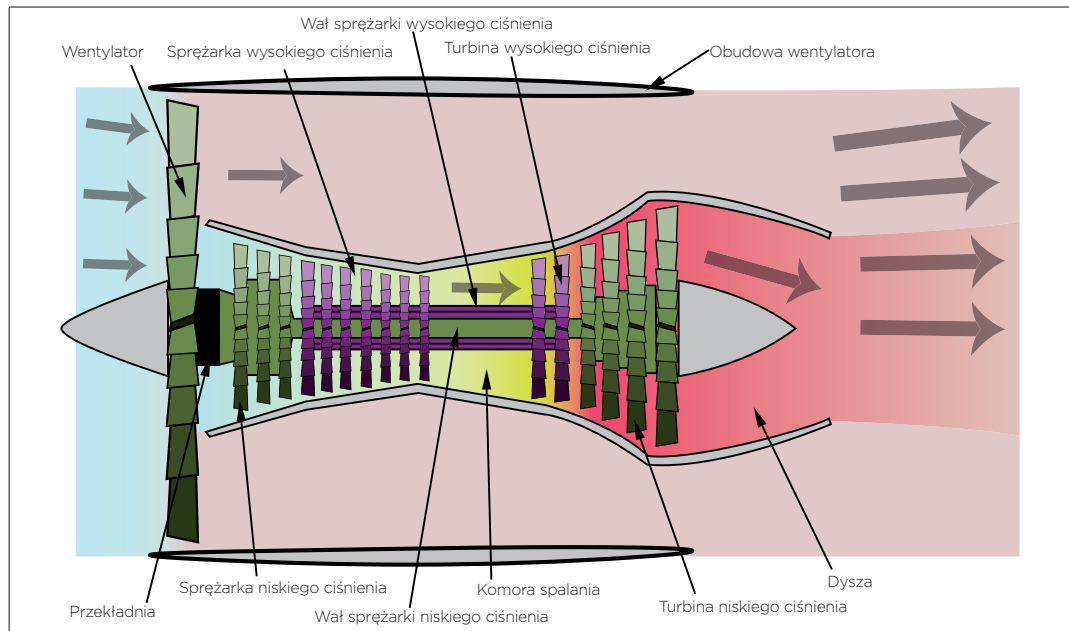
nak zastosowanie dwóch koncentrycznych wałów i podział na połączone zewnętrznym wałem sprężarkę i turbinę wysokiego ciśnienia oraz osadzone na wale wewnętrznym sprężarkę i turbinę niskiego ciśnienia. Takie rozwiązanie poprawiło elastyczność silników, a dzięki zwiększeniu sprężu również ich sprawność i ekonomiczność. Pierwszym silnikiem dwuwałowym był *Bristol Olympus*, zastosowany w bombowcach *Vulcan*, a w wersji rozwojowej – w naddźwiękowym *Concorde*.

Bypass

Ciąg silnika odrzutowego zależy m.in. od prędkości gazów wylotowych, z drugiej strony fizyka mówi, że sprawność napędowa jest tym większa, im mniejsza różnica między prędkością gazów wylotowych, a prędkością lotu. Te fakty w połączeniu z obserwacją, że gazy opuszczające silnik odrzutowy mają wciąż bardzo dużą energię, która ulega rozproszeniu w atmosferze, doprowadziły do stworzenia silników dwuprzepływowych. Nadmiarową energię gazów napędzających turbinę niskiego ciśnienia wykorzystano do napędu sprężarki niskiego ciśnienia o znacznie powiększonej średnicy, która część powietrza tłoczyła kanałem otaczającym „rdzeń” silnika (ang. core – sprężarkę wysokiego ciśnienia, komory spalania oraz turbiny). W ten sposób uzyskano zwiększenie przepływu czynnika roboczego (czyli powietrza) przez silnik, a jednocześnie, dzięki zmieszaniu obu strumieni („gorącego” i „zimnego”) obniżono prędkość i temperaturę gazów wylotowych, co przyczyniło się do znacznego obniżenia poziomu hałasu. Pierwszym silnikiem dwuprzepływowym (ang. bypass) był *Rolls Royce Conway*, zastosowany w *DC-8*, *Boeing 707* i *VC-10*.

Wentylator

Zalety silników dwuprzepływowych oraz rosnąca, m.in. dzięki postępowi technologii materiałowej, wydajność wytwornic gazów (części „gorącej” silników) spowodowały stopniowy wzrost współczynnika dwuprzepływowości (stosunku natężeń przepływu powietrza „zimnego” do „gorącego”) z 0,3-1,5 w pierwszych konstrukcjach do 2,5-3. Z czasem sprężarkę niskiego ciśnienia zaczęto dzielić na dwie sekcje – pierwsze 2-3 stopnie o dużej średnicy, wytwarzające przepływ



Przekładowy silnik turbowentylatorowy

Mimo ogromnego postępu, wciąż większość energii ze spalania paliwa jest zużywana przez sam silnik

zimny i zwane wentylatorem oraz kolejne o mniejszej średnicy, dostarczające powietrze tylko do sprężarki wysokiego ciśnienia. Naturalną konsekwencją było powstanie silników dwuprzepływowych drugiej generacji zwanych turbowentylatorowymi. Charakteryzują się one jeszcze większym stopniem dwuprzepływowości (dla *RR Trent 1000* bliskim 10), a wizualnie – ogromnym, jednostopniowym wentylatorem pozbawionym kierownic. To właśnie takie jednostki

Trójwałowy silnik *Rolls-Royce Trent 1000 (B787)* – widoczny kanał wentylatora i wylot gazów



foto: Michał Setlak

znamy ze współczesnych samolotów pasażerskich. Pionierską konstrukcją był tu *General Electric CF-6*, stosowany m.in. w samolotach *DC-10*, *Boeing 747* i *767* oraz *A300*.

Przekładnia

Przy dużych średnicach wentylatorów (np. w *GE90-115B*, używanym w *B767-200LR*, jest to aż 325 cm) znów dają o sobie znać fizyczne ograniczenia: stosunkowo małe obroty wału niskiego ciśnienia, przy których prędkość końcówek łopat wentylatora nie przekracza prędkości dźwięku, oznaczają małe obroty turbiny, przy których jej sprawność jest niska. Aby więc zapewnić optymalne warunki pracy zarówno wentylatora, jak i turbiny niskiego ciśnienia, wprowadzono napęd wentylatora poprzez przekładnię planetarną. Pierwszym takim silnikiem był certyfikowany w roku 1980 *Lycoming ALF 502*, użyty w samolotach *BaE 146*. Dziś koncepcja ta znajduje zastosowanie w najnowszych jednostkach *Pratt & Whitney PW1000G*, przeznaczonych m.in. dla *Airbusa A320neo*.

Na zakończenie wypada zaznaczyć, że przy swej genialnej prostocie współczesne silniki są jednak bardzo skomplikowane – oprócz poruszania samolotu muszą też napędzać akcesoria takie jak generatory prądu i pompy cieczy hydraulicznej oraz dostarczać powietrza dla układów klimatyzacji (z upustów sprężarek). A w dodatku wyposażone w zaawansowaną elektronikę, taką jak systemy *FADEC* i powiązane z nimi układy diagnostyczne, same potrafią zapewnić sobie optymalne parametry pracy i informować o ewentualnych problemach.

Michał Setlak