

# Oro kvėpuojantis reaktyvinis variklis

---

Oru kvėpuojantis reaktyvinis variklis (arba **kanalinis reaktyvinis variklis**) yra reaktyvinis variklis, kurio išmetamosios dujos, tiekiančios reaktyvinį variklį, yra atmosferos oras varomąjį antgalį yra paimamas, suspaudžiamas, kaitinamas ir išplečiamas iki atmosferos, kuris per slėgio. Suspaudimą gali užtikrinti dujų turbina, kaip ir originaliame turboreaktyviniame ir naujesniame turboreaktyviniame ventiliatoriuje, arba tik dėl stūmoklio slėgio transporto priemonės greičio, kaip ir su sraigtu ir impulsiniu srautu.

Visi praktiškai oru kvėpuojantys reaktyviniai varikliai šildo orą degindami kurą. Arba šilumokaitis gali būti naudojamas, kaip ir branduoliniame reaktyviniame variklyje. Dauguma šiuolaikinių reaktyvinių variklių yra turboventiliatoriai, kurie taupo degalus nei turboreaktyviniai varikliai, nes dujų turbinos tiekiamą trauką padidina aplinkkelio oras, praeinantis per kanalinį ventiliatorių.

## Fonas

---

Originalus oru kvėpuojantis dujų turbininis reaktyvinis variklis buvo turboreaktyvinis variklis, idėja Tai buvo dviejų inžinierių, Franko Whittle'o iš Anglijos JK ir Hanso von Ohaino iš Vokietijos. Turboreaktyvinis variklis suspaudžia ir šildo orą, o tada jį išleidžia kaip didelio greičio, aukštos temperatūros srovę, kad sukurtų trauką. Nors šie varikliai gali užtikrinti aukštą traukos lygį, jie yra efektyviausi esant labai dideliam greičiui (daugiau nei 1 Mach), dėl mažo masės srauto ir didelio greičio reaktyvinių išmetamųjų dujų pobūdžio.

Šiuolaikiniai turboventiliatoriai yra turboreaktyvinio variklio tobulinimas; jie iš esmės yra turboreaktyviniai varikliai, kuriuose yra nauja sekcija, vadinama *ventiliatoriaus pakopa*. Užuo naudojė visas išmetamąsias dujas tiesioginei traukai kaip turboreaktyvinis variklis, turboreaktyviniai varikliai išskiria dalį galios iš variklio viduje esančių išmetamųjų dujų ir naudoja ją ventiliatoriaus pakopai maitinti. Ventiliatoriaus pakopa per ortakį pagreitina didelį oro srautą, aplenkdamą *variklio šerdį* (tikrąją variklio dujų turbinos sudedamąją dalį) ir išstumdamą jį gale kaip purkštuką, sukurdamą trauką. Dalis oro, patenkančio per ventiliatoriaus pakopą, patenka į variklio šerdį, o ne nukreipiama į galą, todėl suspaudžiama ir įkaista; dalis energijos išgaunama kompresoriams ir ventiliatoriams maitinti, o likusi dalis išekvojama gale. Šios didelės spartos karštų dujų išmetimo sistema susimaišo su mažu greičiu, vėsais oro išmetimu iš ventiliatoriaus pakopos ir abu prisideda prie bendros variklio traukos. Priklausomai nuo to, kokia vėsais oro dalis yra apeinama aplink variklio šerdį turboventiliatorius gali būti vadinamas *žemo apėjimo*, *didelio apėjimo* arba *labai didelio apėjimo* varikliais.

*Žemo apėjimo* varikliai buvo pirmieji pagaminti varikliai su turboventiliatoriais, kurie didžiąją traukos jėgą sukuria karštomis šerdies išmetamosiomis dujomis, o ventiliatoriaus pakopa tai tik papildo. Šie varikliai vis dar dažnai naudojami kariniuose naikintuvuose, nes jie turi mažesnę priekinį plotą, todėl viršgarsiniu greičiu sukuriama mažesnė stūmoklio pasipriešinimo jėga, paliekant daugiau variklio sukuriamos traukos orlaiviui varyti. Palyginti aukštas jų triukšmo lygis ir ikigarsinės degalų sąnaudos yra laikomi priimtinais tokiais atvejais, nors pirmosios kartos lėktuvuose su turboventiliatoriais buvo naudojami mažo apėjimo varikliai, dėl didelio triukšmo lygio ir degalų sąnaudų jie nukrito iš palankumo dideliems orlaiviams. *Aukšto apėjimo* varikliai turi daug didesnę ventiliatoriaus pakopą ir didžiąją dalį savo traukos sukuria iš ventiliatoriaus kanalizuo to oro; variklio šerdis tiekia galią ventiliatoriaus pakopai, ir tik dalis bendros traukos gaunama iš variklio šerdies išmetamųjų dujų srauto.

Per pastaruosius kelis dešimtmečius buvo pereinama prie *labai didelio aplinkkelio* variklių, kuriuose naudojami ventiliatoriai, daug didesni už patį variklio šerdį, o tai paprastai yra moderni, didelio efektyvumo dviejų ar trijų rیتیų konstrukcija. Dėl šio didelio efektyvumo ir galios tokie dideli ventiliatoriai gali būti gyvybingi, o didesnė galia (iki 75 000 svarų vienam varikliui tokiuose varikliuose kaip Rolls-

Royce Trent XWB arba General Electric GENx ) leido pereiti prie didelių dviejų varikliu orlaivius, tokius kaip Airbus A350 arba Boeing 777 , taip pat leisti dviejų variklių orlaiviams skristi ilgais maršrutais virš vandens , kurie anksčiau priklausė 3 arba 4 variklių orlaiviams .

Reaktyviniai varikliai buvo skirti varyti orlaivius, tačiau buvo naudojami reaktyviniams automobiliams ir reaktyviniams laivams varyti , siekiant rekordinio greičio, ir netgi komerciniams tikslams, pavyzdžiui, geležinkelių sniego ir ledo valymui nuo iešmų ( geležinkelio statyklose montuojami specialiuose geležinkelio vagonuose). ir lenktynių trasose, skirtose trasos dangos džiovinimui po lietaus (montuojamos specialiuose sunkvežimiuose, kurių išmetimo srautas pučiamas į trasos dangą).

## Orą kvėpuojančių reaktyvinių variklių tipai

Oru kvėpuojantys reaktyviniai varikliai beveik visada yra vidaus degimo varikliai , kurie varomąją jėgą gaunama degant kurui variklio viduje. Atmosferoje esantis deguonis naudojamas oksiduoti degalų šaltiniui, paprastai angliavandenilių pagrindu pagamintam reaktyviniam kurui, .<sup>[1]</sup> Degančio mišinio tūris labai išsiplečia, per varomąją antgalį varomas įkaitintą orą .

Dujų turbina varomi varikliai:

- turboreaktyvinis
- turboventiliatorius

Raminiu varikliu varomas reaktyvinis variklis:

- ramjetas
- scramjet

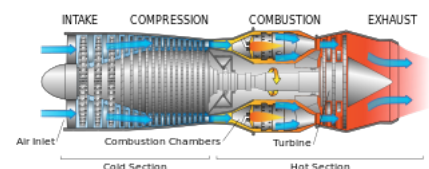
Impulsinis degimo reaktyvinis variklis:

- impulsinis detonacijos variklis
- impulsinis reaktyvinis variklis
- variklio purkštukas

## Turboreaktyvinis variklis

Du inžinieriai, Frank Whittle iš JK ir Hansas von Ohainas iš Vokietijos , sukūrė turboreaktyvinio variklio ketvirtojo dešimtmečio pabaigoje savarankiškai koncepciją ir sukūrė praktinius variklius.

Turboreaktyviniai varikliai susideda iš įleidimo angos, kompresoriaus , degimo kameros, turbinos (kurios varo kompresorių) ir varomo antgalio. Suslėgtas oras kaitinamas degimo kameroje ir praeina per turbiną, tada išsiplečia antgalyje, kad susidarytų didelės spartos varomoji srovė <sup>[2]</sup>



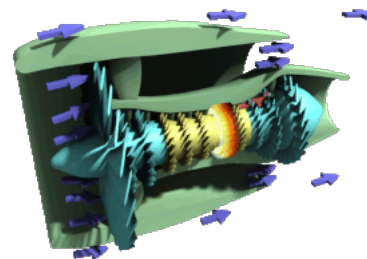
Turboreaktyvinio variklio išdėstymas

Turboreaktyvinių variklių varomasis efektyvumas yra mažesnis nei maždaug 2 Mach ir sukuria daug reaktyvinio srauto triukšmo, tiek dėl labai didelio išmetimo greičio. Šiuolaikiniai reaktyviniai lėktuvai yra varomi turboventiliatoriais . Šie varikliai, kurių išmetamųjų dujų greitis yra mažesnis, skleidžia mažiau reaktyvinio triukšmo ir naudoja mažiau degalų. Turboreaktyviniai varikliai vis dar naudojami vidutinio nuotolio sparnuotoms raketoms varyti dėl didelio išmetimo greičio, mažo priekinio ploto, kuris sumažina

pasipriešinimą, ir santykinio paprastumo, dėl kurio sumažėja sąnaudos.

## Turboventiliatoriaus variklis

Dauguma šiuolaikinių reaktyvinių variklių yra turboventiliatoriai. Žemo slėgio kompresorius (LPC), paprastai žinomas kaip ventiliatorius, suspaudžia orą į aplinkkelio kanalą, o jo vidinė dalis perkrauna šerdies kompresorių. Ventiliatorius dažnai yra sudėtinė daugiapakopio pagrindinio LPC dalis. Aplenkiamasis oro srautas arba patenka į atskirą „šalto antgalį“, arba susimaišo su žemo slėgio turbinos išmetamosiomis dujomis, o po to išsiplės per „mišraus srauto antgalį“.



Animuotas turboventiliatoriaus variklis

1960-aisiais buvo mažai skirtumų tarp civilinių ir karinių reaktyvinių variklių, išskyrus tai, kad buvo naudojamas papildomas deginimas kai kuriuose (viršgarsiniuose) įrenginiuose naudojami turboventiliatoriai, . Šiandien lėktuvuose nes jų išmetamųjų dujų greitis geriau atitinka ikigarsinį lėktuvo skrydžio greitį. Skrendant lėktuvu greičiu, turboreaktyvinio variklio išmetamųjų dujų greitis yra per didelis ir eikvojama energija. Mažesnis išmetimo greitis iš turboventiliatoriaus užtikrina geresnes degalų sąnaudas. Padidėjęs ventiliatoriaus oro srautas suteikia didesnę trauką esant mažam greičiui. Mažesnis išmetimo greitis taip pat suteikia daug mažesnę srauto triukšmą.

Palyginti didelis priekinis ventiliatorius turi keletą efektų. Palyginti su identiškos traukos turboreaktyviniu varikliu, turboventiliatorius turi daug didesnę oro masės srautą, o srautas per aplinkkelio kanalą sukuria didelę traukos dalį. Papildomas ortakio oras nebuvo uždegtas, todėl jo greitis yra lėtas, tačiau šiai traukai užtikrinti nereikia papildomo kuro. Vietoj to, energija paimama iš centrinės šerdies, o tai taip pat sumažina išmetamųjų dujų greitį. Taip sumažinamas vidutinis sumaišyto išmetamo oro greitis (maža savitoji trauka ), o tai mažiau eikvoja energijos, bet sumažina didžiausią greitį. Apskritai, turboventiliatorius gali būti daug efektyvesnis ir tylesnis, o ventiliatorius taip pat leidžia pasiekti didesnę grynąją trauką esant lėtam greičiui.

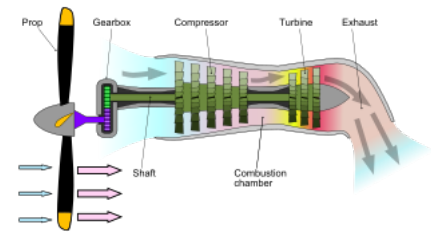
Taigi civiliniai turboventiliatoriai šiandien turi mažą išmetamųjų dujų greitį (maža *specifinė trauka* – grynoji trauka, padalyta iš oro srauto), kad būtų sumažintas srovės triukšmas ir padidintas *degalų vartojimo efektyvumas* . Todėl aplinkkelio santykis (aplenkimo srautas, padalytas iš pagrindinio srauto) yra gana didelis (santykiai nuo 4:1 iki 8:1 yra įprasti), o Rolls -Royce Trent XWB artėja prie 10:1. [3] Reikia tik vienos ventiliatoriaus pakopos, nes maža specifinė trauka reiškia mažą ventiliatoriaus slėgio santykį.

Civilinių orlaivių turboventiliatoriai paprastai turi didelį priekinį plotą, kad tilptų labai didelis ventiliatorius, nes jų konstrukcija apima daug didesnę oro masę, apeinančią šerdį, todėl jie gali gauti naudos iš šio poveikio, o kariniuose orlaiviuose, kur triukšmas ir efektyvumas yra mažesnis . Svarbu, palyginti su našumu ir pasipriešinimu, mažesnis oro kiekis paprastai apeina šerdį. Turboventiliatoriai, skirti ikigarsiniams civiliniams orlaiviams, taip pat paprastai turi tik vieną priekinį ventiliatorių, nes jų papildomą trauką sukuria didelė papildoma oro masė, kuri yra tik vidutiniškai suspausta, o ne mažesnis oro kiekis, kuris yra labai suspaustas.

Tačiau kariniai turboventiliatoriai turi santykinai didelę *specifinę trauką* , kad maksimaliai padidintų trauką tam tikroje priekinėje zonoje, o reaktyvinis triukšmas kariniais tikslais kelia mažiau rūpesčių, palyginti su civiliniais. Daugiapakopiai ventiliatoriai paprastai reikalingi norint pasiekti santykinai aukštą ventiliatoriaus slėgio santykį, reikalingą didelei specifinei traukai. Nors dažnai naudojama aukšta turbinos įleidimo temperatūra, aplinkkelio koeficientas paprastai būna mažas, paprastai žymiai mažesnis nei 2,0.

## Turbopropelerinis velenas

Turbosraigtiniai varikliai yra reaktyvinių variklių dariniai, nejudančios dujų turbinos, kurios ištraukia darbą iš karšto išmetimo srovės, kad sukėtų besisukantį veleną, kuris vėliau naudojamas traukai sukurti kitomis priemonėmis. Nors tai nėra griežtai reaktyviniai varikliai, nes jie remiasi pagalbinio mechanizmu traukai sukurti, turbosraigtiniai varikliai yra labai panašūs į kitus turbininius reaktyvinius variklius ir dažnai taip apibūdinami.



Turbopropelerinis variklis

Turbosraigtinuose varikliuose dalis variklio traukos sukuriama sukant sraigta, o ne pasikliaujant vien didelio greičio reaktyviniu išmetimu. Kurdami trauką abiem kryptimis, turbosraigtiniai sraigta kartais vadinami hibridinio reaktyvinio variklio tipu. Jie skiriasi nuo turboventiliatorių tuo, kad tradicinis sraigta, o ne kanalinis ventiliatorius, suteikia didžiąją traukos jėgą. Dauguma turbosraigčių variklių naudoja pavarų mažinimą tarp turbosraigto ir sraigto. (Turboventiliatoriuose su pavara taip pat yra pavarų mažinimo funkcija, tačiau jie yra mažiau paplitę.) Karštos srovės išmetimas yra svarbi traukos mažuma, o didžiausia trauka gaunama suderinus du traukos šaltinius. [4] Turbosraigtiniai sraigta paprastai pasižymi geresnėmis savybėmis nei turboreaktyviniai lėktuvai ar turboventiliatoriai važiuojant mažu greičiu, kai sraigto efektyvumas yra didelis, tačiau važiuojant dideliu greičiu tampa vis triukšmingesni ir neefektyvesni. [5]

Turbosraigtiniai varikliai yra labai panašūs į turbosraigtinuos variklius, kurie skiriasi tuo, kad beveik visa išmetamųjų dujų energija išgaunama sukurti besisukančiam velenui, kuris naudojamas mašinoms, o ne sraigtui varyti, todėl jie generuoja mažai arba visai neduoda reaktyvinės traukos ir dažnai naudojami varikliui. sraigtasparniai. [6]

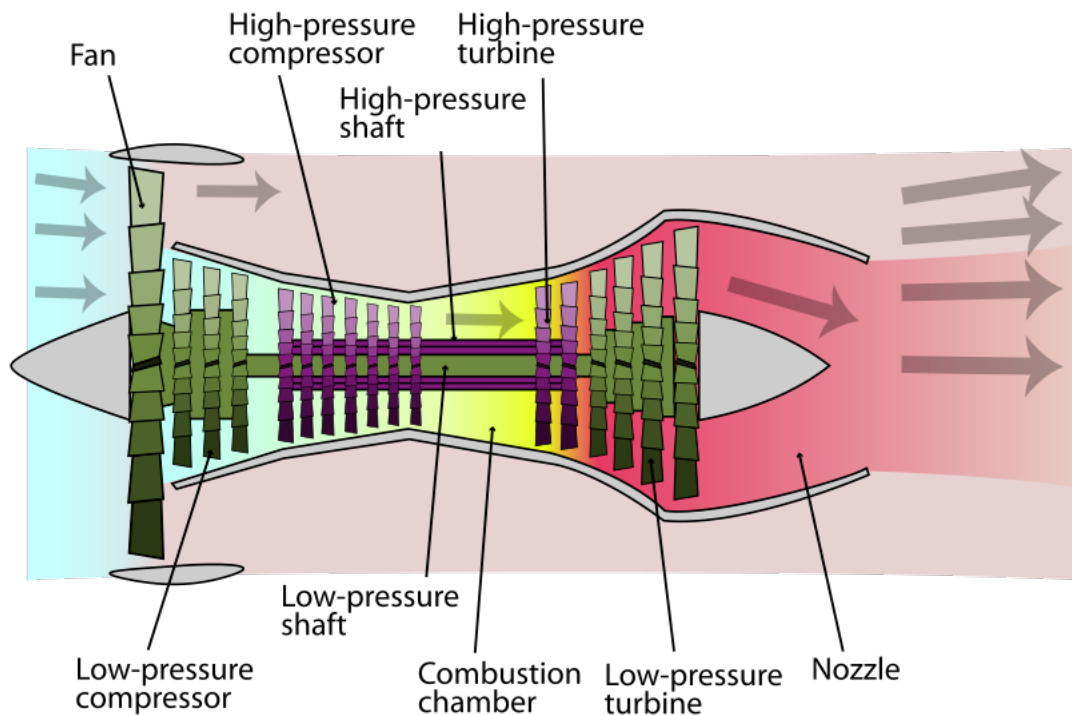
## Profan

Profan variklis (taip pat vadinamas „be kanalizacijos ventiliatoriumi“, „atviru rotoriu“ arba „itin aukštu aplinkkeliu“) yra reaktyvinis variklis, kuris naudoja savo dujų generatorių atviram ventiliatoriui maitinti, panašiai kaip turbopropeleriniai varikliai. Kaip ir turbosraigtiniai varikliai, ventiliatoriai didžiąją traukos dalį sukuria iš sraigto, o ne iš išmetimo srovės. Pagrindinis skirtumas tarp turbosraigčio ir propelerinio ventiliatoriaus konstrukcijos yra tas, kad sraigto mentės yra labai išvalytos, kad jos galėtų veikti maždaug 0,8 macho greičiu, o tai konkuruoja su šiuolaikiniais komerciniais turboventiliatoriais. Šie varikliai turi turbosraigčių variklių degalų vartojimo efektyvumo pranašumus ir komercinių turboventiliatorių našumą. [7] Nors buvo atlikti reikšmingi profanų tyrimai ir bandymai (įskaitant skrydžio bandymus), nė vienas nebuvo pradėtas gaminti.



Profaninis variklis

## Pagrindiniai komponentai



Pagrindiniai turboventiliatoriaus variklio komponentai.

Pagrindiniai turboreaktyvinio variklio komponentai, įskaitant nuorodas į turboventiliatorius, turbosraigtinius sraigtus ir turbo velenus:

## Šaltasis skyrius

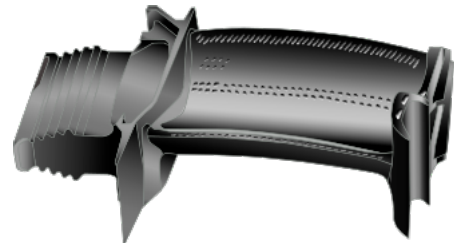
- **Oro įsiurbimas ( įleidimo anga )** – ikigarsiniuose orlaiviuose įleidimo anga yra kanalas, reikalingas užtikrinti sklandų oro patekimą į variklį, nepaisant to, kad oras prie įleidimo angos artėja ne tiesiai į priekį. Tai atsitinka ant žemės nuo šoninio vėjo ir skrendant, kai orlaivis juda posūkiams ir posūkiams. Ortakio ilgis yra sumažintas, kad būtų sumažintas pasipriešinimas ir svoris. [8] Oras į kompresorių patenka maždaug perpus mažesniu garso greičiu, todėl esant mažesniai nei šis skrydžio greičiui, srautas paspartės išilgai įleidimo angos, o esant didesniai skrydžio greičiui – sulėtės. Taigi vidinis įleidimo angos profilis turi prisitaikyti prie greitėjančio ir difuzinio srauto be nereikalingų nuostolių. Viršgarsiniams orlaiviams įleidimo angoje yra tokių funkcijų kaip kūgiai ir rampos, kad būtų sukurtos efektyviausios smūgio bangos, kurios susidaro sulėtėjus viršgarsiniam srautui. Oras sulėtėja nuo skrydžio greičio iki ikigarsinio greičio per smūgio bangas, tada iki maždaug pusės kompresoriaus garso greičio per ikigarsinę įleidimo angos dalį. Tam tikra smūginių bangų sistema pasirenkama atsižvelgiant į daugelį apribojimų, tokių kaip sąnaudos ir eksploataciniai poreikiai, siekiant sumažinti nuostolius, o tai savo ruožtu maksimaliai padidina slėgio atkūrimą kompresoriuje. [9]
- **Kompresorius** arba **Ventiliatorius** – kompresorius sudarytas iš pakopų. Kiekviena pakopa susideda iš besisukančių peilių ir stacionarių statorių arba mentelių. Orui judant per kompresorių, didėja jo slėgis ir temperatūra. Kompresoriaus galia gaunama iš **turbinos** (žr. toliau), kaip **veleno** sukimo momentas ir greitis.
- **Aplenkimo kanalai** tiekia srautą iš ventiliatoriaus su minimaliais nuostoliais į aplinkkelio varomąjį antgalį. Arba ventiliatoriaus srautas gali būti sumaišytas su turbinos išmetamosiomis dujomis prieš patenkant į vieną varomąjį antgalį. Kitu

atveju tarp maišytuvo ir antgalio gali būti įrengtas papildomas degiklis.

- **Velenas** – velenas jungia **turbiną** su **kompresoriumi** ir veikia didžiąją variklio ilgio dalį. Gali būti net trys koncentriniai velenai, besisukantys nepriklausomais greičiais, su tiek pat turbinų ir kompresorių komplektų. Per veleną iš kompresoriaus gali tekėti turbinų aušinimo oras.
- **Difuzoriaus sekcija:** – Difuzorius sulėtina kompresoriaus tiekimo orą, kad sumažintų srauto nuostolius degimo kameroje. Taip pat reikalingas lėtesnis oras, kuris padėtų stabilizuoti degimo liepsną, o didesnis statinis slėgis pagerina degimo efektyvumą. [10]

## Karšta skiltis

- **Degimo kamera** arba **degimo kamera** – degalai nuolat deginami po to, kai iš pradžių užsidega varikliui paleidžiant.
- **Turbina** – turbina yra menčių diskų serija, kuri veikia kaip vėjo malūnas, išgaunantis energiją iš karštų dujų, išeinančių iš **degimo kameros**. Dalis šios energijos sunaudojama kompresoriui **varyti**. Turbosraigtiniai, turbosraiginiai ir turboventiliatoriai turi papildomas turbinos pakopas, skirtas sraigtui, aplinkkelio ventiliatoriui ar sraigtasparnio rotoriumi varyti. Laisvoje **turbinoje** kompresorių varanti turbina sukasi nepriklausomai nuo to, kas maitina sraigtą arba sraigtasparnio rotoriumi. Aušinamasis oras, išleidžiamas iš kompresoriaus, gali būti naudojamas turbinos mentėms, mentėms ir diskams aušinti, kad turbinos įėjimo dujų temperatūra būtų aukštesnė esant tokiai pačiai turbinos medžiagos temperatūrai.\*\*
- **Afterburner** arba **reheat** (Britų kalba) – (daugiausia karinis) Sukuria papildomą trauką deginant kurą reaktyviniame vamzdyje. Šis turbinos išmetamųjų dujų pakartotinis pašildymas padidina varomo antgalio įėjimo temperatūrą ir išmetimo greitį. Purkštuko plotas padidinamas, kad tilptų didesnis specifinis išmetamųjų dujų tūris. Taip išlaikomas toks pat oro srautas per variklį, kad nekiltų jo veikimo charakteristikų.
- **Išmetimo vamzdis** arba **purkštukas** – turbinos išmetamosios dujos praeina per varomąjį antgalį ir sukuria didelio greičio srovę. Antgalis paprastai susilieja su fiksuotu srauto plotu.
- **Viršgarsinis antgalis** – esant dideliame purkštuko slėgio santykiui (purkštuko įėjimo slėgis/aplinkos slėgis) konvergentinis-divergentinis (de Laval) antgalis naudojamas. Išsiplėtimas iki atmosferos slėgio ir viršgarsinio dujų greičio tęsiasi pasroviui už gerklės ir sukuria didesnę trauką.



Aukšto slėgio turbinos mentė su išėjimo angomis orui vėsinti

Įvairūs anksčiau išvardyti komponentai turi apribojimų, kaip jie sujungiami, kad būtų užtikrintas didžiausias efektyvumas ar našumas. Variklio veikimas ir efektyvumas niekada negali būti vertinami atskirai; Pavyzdžiui, viršgarsinio reaktyvinio variklio degalų / atstumo efektyvumas maksimalus pasiekia maždaug 2 Mach, o jį gabenančios transporto priemonės pasipriešinimas didėja kaip kvadratinis dėsnis ir turi daug papildomo pasipriešinimo transgarsinėje srityje. Taigi didžiausias visos transporto priemonės



degalų naudojimo efektyvumas paprastai yra apie 0,85 Macho.

Optimizuojant variklį pagal paskirtį, čia svarbu oro įsiurbimo angos konstrukcija, bendras dydis, kompresoriaus pakopų (menčių rinkinių) skaičius, degalų tipas, išmetimo pakopų skaičius, komponentų metalurgija, sunaudojamo aplinkkelio oro kiekis, kur yra apvadas. Įvedamas oras ir daugelis kitų veiksnių. Pavyzdys yra oro įleidimo angos konstrukcija.

## Operacija

---

### Variklio ciklas

Įprasto oru kvėpuojančio reaktyvinio variklio termodinamika apytiksliai modeliuojama Braitono **ciklu**, kuris yra termodinaminis ciklas, apibūdinantis dujų turbinos variklio, kuris yra oru kvėpuojančio reaktyvinio variklio ir kitų pagrindas, veikimą. Jis pavadintas jį sukūrusio amerikiečių inžinieriaus George'o Braytono (1830–1892) vardu, nors iš pradžių jį pasiūlė ir užpatentavo anglas Johnas Barberis 1791 m. <sup>[11]</sup> Jis taip pat kartais žinomas kaip **Džaulio ciklas**.

### Thrust last

Reaktyviniam varikliui nurodyta nominali grynoji trauka paprastai nurodo statinio jūros lygio (SLS) būseną, tarptautinę standartinę atmosferą (ISA) arba karštą dieną (pvz., ISA+10 °C). Pavyzdžiui, GE90-76B kilimo statinė trauka yra 76 000 lbf (360 kN), esant SLS, ISA+15 °C.

Natūralu, kad grynoji trauka mažės didėjant aukščiui dėl mažesnio oro tankio. Tačiau yra ir skrydžio greičio efektas.

Iš pradžių orlaiviui išibėgėjus kilimo ir tūpimo taku, purkštukų slėgis ir temperatūra šiek tiek padidės, nes įsiurbimo tvoros pakilimas yra labai mažas. Masės srautas taip pat mažai keisis. Vadinasi, purkštuko bendroji trauka iš pradžių didėja tik nežymiai, didėjant skrydžio greičiui. Tačiau, kadangi jis yra orą kvėpuojantis variklis (skirtingai nuo įprastos raketos), už oro paėmimą iš atmosferos gresia bausmė. Tai žinoma kaip ram drag. Nors nuobauda statinėmis sąlygomis yra lygi nuliui, ji greitai didėja didėjant skrydžio greičiui, todėl sumažėja grynoji trauka.

Didėjant skrydžio greičiui po pakilimo, stūmoklio padidėjimas įsiurbimo angoje pradeda daryti reikšmingą poveikį purkštuko slėgiui / temperatūrai ir įsiurbiamo oro srautui, todėl purkštuko bendroji trauka kyla greičiau. Šis terminas dabar pradeda kompensuoti vis didėjantį stūmoklio pasipriešinimą, dėl kurio galiausiai pradeda didėti grynoji trauka. Kai kurių variklių grynoji trauka, tarkim, 1,0 Macho, jūros lygis gali būti net šiek tiek didesnis nei statinė trauka. Didesnė nei 1.0 Mach, naudojant ikigarsinio įleidimo angos konstrukciją, smūgio nuostoliai paprastai mažina grynąją trauką, tačiau tinkamai suprojektuotas viršgarsinis įėjimas gali sumažinti įsiurbimo slėgio atkūrimą, todėl grynoji trauka gali toliau didėti viršgarsiniu režimu.

## Saugumas ir patikimumas

---

Reaktyviniai varikliai paprastai yra labai patikimi ir pasižymi labai geru saugumo rodikliu. Tačiau kartais pasitaiko nesėkmės.

### Variklio viršįtampis

Kai kuriais atvejais reaktyviniuose varikliuose dėl variklio sąlygų dėl į variklį patenkančio oro srauto ar

kitų pokyčių kompresoriaus mentės gali užstrigti . Kai tai įvyksta, slėgis variklyje išsipučia už mentes, o stabdymas palaikomas tol, kol slėgis sumažėja ir variklis praranda visą trauką. Kompresoriaus mentės paprastai išeina iš užstrigimo ir vėl padidina slėgį variklyje. Jei sąlygos nepataisomos, ciklas paprastai kartojasi. Tai vadinama **banga** . Priklausomai nuo variklio, tai gali labai pakenkti varikliui ir sukelti nerimą keliančią vibraciją ekipažui.

## Ašmenų sulaikymas

Ventiliatoriaus, kompresoriaus ar turbinos mentės gedimai turi būti variklio korpuse. Kad tai būtų padaryta, variklis turi būti suprojektuotas taip, kad išlaikytų ašmenų sulaikymo bandymus, kaip nurodė sertifikavimo institucijos. <sup>[12]</sup>

## Paukščių nurijimas

Paukščių nurijimas yra terminas, vartojamas, kai paukščiai patenka į reaktyvinio variklio išsiurbimo angą. Tai yra įprastas pavojus orlaivių saugai ir sukėlė mirtinų avarijų. 1988 m. Ethiopian Airlines Boeing 737 sugėrė balandžius pakilimo metu į abu variklius , o tada sudužo bandydamas grįžti į Bahir Dar oro uostą; iš 104 juo skridusių žmonių 35 žuvo ir 21 buvo sužeistas. Kito incidento metu 1995 m. Dassault Falcon 20 sudužo Paryžiaus oro uoste bandydamas avariniu būdu nusileisti po to, kai į variklį įsiveržė sparnus , dėl ko sugedo variklis ir kilo gaisras lėktuvo fuzeliaže ; visi 10 laive buvusių žmonių žuvo. <sup>[13]</sup>

Reaktyviniai varikliai turi būti suprojektuoti taip, kad atlaikytų tam tikro svorio ir skaičiaus paukščių praryimą ir neprarastų daugiau nei nustatyto traukos kiekio. Paukščių, kurias galima praryti nesukeliant pavojaus saugiam orlaivio skrydžiui, svoris ir skaičius yra susiję su variklio išsiurbimo sritimi. <sup>[14]</sup> 2009 m. „Airbus A320“ lėktuvas, US Airways Flight 1549 , į kiekvieną variklį įtraukė po vieną kanadinę žąsį . Lėktuvas nukrito Hudsono upėje pakilęs iš Niujorko LaGuardia tarptautinio oro uosto. Žuvusiųjų nebuvo. Šis įvykis parodė, kad paukščiams kyla pavojus, viršijantis „skirtą“ ribą.

Nurijimo įvykio baigtis ir tai, ar jis sukelia nelaimingą atsitikimą, nesvarbu, ar tai būtų mažas greitas lėktuvas, pvz., kariniai naikintuvai , ar didelis transportas, priklauso nuo paukščių skaičiaus ir svorio bei nuo to, kur jie atsitreškia į ventiliatoriaus menčių tarpą arba nosies kūgis. Šerdies pažeidimas dažniausiai atsiranda dėl smūgių šalia ašmenų šaknies arba nosies kūgio.

Nedaug paukščių skraido aukštai, todėl didžiausias pavojus, kad paukščiai bus nuryti, kyla kylant ir leidžiantis bei skrendant žemu lygiu.

## Vulkaniniai pelenai

Jei reaktyvinis lėktuvas skrenda per orą, užterštą vulkaniniais pelenais , kyla pavojus, kad praryti pelenai sukels erozijos pažeidimus kompresoriaus mentes, užkimš kuro purkštukų oro angas ir užblokuos turbinos aušinimo kanalus. Dėl kai kurių iš šių poveikių variklis gali pakilti arba užgesti skrydžio metu. Pakartotinis apšvietimas paprastai būna sėkmingas po liepsnos išjungimo, tačiau gerokai prarandant aukštį. atvejis Tai buvo „British Airways“ 9 skrydžio , kuris per vulkanines dulkes praskriejo 37 000 pėdų aukštyje. Užgeso visi 4 varikliai, o bandymai pakartotinai uždegti buvo sėkmingi maždaug 13 000 pėdų aukštyje. <sup>[15]</sup>

## Nesulaikomos gedimai

Viena gedimų klasė, sukėlusį avarijas, yra nekontroliuojamas gedimas, kai besisukančios variklio dalys nutrūksta ir išeina pro korpusą. Šios daug energijos naudojančios dalys gali nupjauti kuro ir valdymo



linijas bei prasiskverbti į saloną. Nors dėl patikimumo degalų ir valdymo linijos paprastai yra dubliuojamos, „avarija United Airlines Flight 232“ įvyko, kai hidraulinio skysčio linijas visų trijų nepriklausomų hidraulinių sistemų vienu metu nutraukė skeveldros dėl variklio gedimo. Iki „United 232“ avarijos tikimybė, kad vienu metu suges visos trys hidraulinės sistemos, buvo laikoma milijardu su vienu. Tačiau statistiniuose modeliuose, naudojamuose šiam skaičiui gauti, nebuvo atsižvelgta į tai, kad antrojo numerio variklis buvo sumontuotas uodegoje arti visų hidraulinių linijų, nei į galimybę, kad variklio gedimas išskirs daug fragmentų į daugelį krypčių. . Nuo tada modernesnės orlaivių variklių konstrukcijos buvo nukreiptos į tai, kad šrapneliai nepatektų į orą gaubtai ar ortakiai, ir vis dažniau naudojo didelio stiprumo kompozicines medžiagas, kad pasiektų reikiamą atsparumą prasiskverbimui ir išlaikytų mažą svorį.

## Ekonominiai sumetimai

---

kaina 2007 m. reaktyvinių degalų, nors ir labai svyravo įvairiose oro linijose, vidutiniškai sudarė 26,5 % visų veiklos sąnaudų, todėl tai buvo vienintelės didžiausios daugelio oro linijų veiklos sąnaudos. [16]

## Aplinkos sumetimai

---

Reaktyviniai varikliai paprastai yra varomi iškastiniu kuru, todėl atmosferoje yra anglies dioksido šaltinis. Reaktyviniai varikliai taip pat gali būti varomi biokuru arba vandeniliu, nors vandenilis dažniausiai gaminamas iš iškastinio kuro.

Apie 7,2% 2004 metais sunaudotos alyvos sunaudojo reaktyviniai varikliai. [17]

Kai kurie mokslininkai šaltinis, mano, kad reaktyviniai varikliai taip pat yra visuotinio pritemdymo nes išmetamosiose dujose esantys vandens garai sukelia debesų susidarymą.

Azoto junginiai taip pat susidaro degimo proceso metu iš reakcijų su atmosferos azotu. Manoma, kad žemame aukštyje tai nėra ypač kenksminga, tačiau stratosferoje skraidantys viršgarsiniai orlaiviai gali šiek tiek sunaikinti ozoną.

Sulfatai taip pat išsiskiria, jei kure yra sieros.

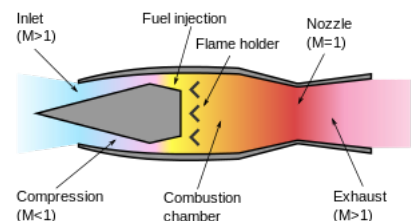
## Išplėstinis dizainas

---

### Ramjet

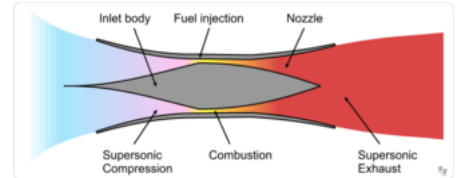
Ramjet yra oru kvėpuojantis reaktyvinis variklis, naudojant variklio judesį į priekį, kad suspaustų įeinantį orą, be rotacinio kompresoriaus. Ramjetai negali sukurti traukos esant nuliniam oro greičiui ir todėl negali pajudinti orlaivio iš vietos. Ramjetams reikalingas didelis greitis, kad jie gerai veiktų, ir kaip klasė efektyviausiai veikia maždaug 3 Mach greičiu. Šio tipo reaktyviniai lėktuvai gali veikti iki 6 machų greičiu.

Jie susideda iš trijų skyrių; įleidimo anga įeinančiam orui suspausti, degiklis kuro įpurškimui ir deginimui bei antgalis karštomis dujoms išstumti ir traukai sukurti. Ramjetams reikia santykinai didelio greičio, kad efektyviai suspaustų įeinantį orą, todėl ramjetai negali veikti nejudėdami ir yra efektyviausi esant viršgarsiniam greičiui. Pagrindinis reaktyvinių variklių bruožas yra tai, kad degimas vyksta ikigarsiniu greičiu. Viršgarsinis įeinantis oras



Ramreaktyvinio variklio schema, kur "M" yra Macho skaičius . oro srauto

smarkiai sulėtėja per įleidimo angą, kur jis sudeginamas daug lėtesniu, ikigarsiniu, greičiu. [18] Tačiau kuo greitesnis įeinantis oras, tuo mažiau efektyvu jį sulėtinti iki ikigarsinio greičio. Todėl reaktyviniai varikliai yra apriboti iki maždaug 5 machų. [19]



Scramjet variklio veikimas

Ramjetai gali būti ypač naudingi tais atvejais, kai reikalingas mažas ir paprastas variklis dideliu greičiu, pavyzdžiui, raketos, o ginklų dizaineriai siekia panaudoti ramjeto technologiją artilerijos sviediniuose, kad padidintų nuotolį: tikimasi, kad 120 mm minosvaidžio sviedinys, jei jam padeda reaktyvinis lėktuvas, jis galėtų pasiekti 22 mylių (35 km) nuotolį. [20] Jie taip pat buvo sėkmingai, nors ir neefektyviai, naudojami kaip purkštukai rotorių antgalio sraigtasparnio. [21] Impulsiniai reaktyviniai varikliai yra ikigarsiniai varikliai, kuriuose taip pat naudojamas stūmoklio suspaudimas, tačiau su pertrūkišiais degimu, skirtingai nuo nuolatinio degimo, naudojamo ramjetoje. Jie yra gana skirtingo tipo reaktyviniai varikliai.

## Scramjets

Scramjets yra evoliucija ramjets, kurie gali veikti daug didesniu greičiu nei bet kuris kitas orą kvėpuojantis variklis. Jie turi panašią struktūrą kaip ir čiurkšlių purkštukai – tai specialios formos vamzdis, suspaudžiantis orą be judančių dalių. Jie susideda iš įleidimo angos, degiklio ir antgalio. Pagrindinis skirtumas tarp „ramjet“ ir „scramjet“ yra tas, kad „scramjet“ nesustabdo artėjančio oro srauto iki ikigarsinio greičio, kad užsidegtų. Taigi, scramjets neturi difuzoriaus, kurio reikia ramjetams, kad įeinančio oro srautas sulėtėtų iki ikigarsinio greičio. Vietoj to jie naudoja viršgarsinį degimą, o pavadinimas „scramjet“ kilęs iš „S supersonic C ombusting Ramjet“.

Scramjet pradeda veikti ne mažesniu kaip 4 machų greičiu, o didžiausias naudingasis greitis yra maždaug 17 machų. [22] Dėl aerodinaminio šildymo esant tokiam dideliam greičiui aušinimas yra iššūkis inžinieriams.

Kadangi skraidyklės naudoja viršgarsinį degimą, jos gali veikti didesniu nei 6 machų greičiu, kai tradiciniai reaktyviniai lėktuvai yra per neefektyvūs. Kitas skirtumas tarp sraigtinių ir skraidančių sraigtų kyla dėl to, kaip kiekvieno tipo varikliai suspaudžia artėjančią oro srautą: nors įleidimo anga užtikrina didžiąją dalį suspaudimo skraidyklėms, didelis greitis, kuriuo skraidyklės veikia, leidžia jiems pasinaudoti smūginių bangų sukuriamu suspaudimu. Įstrižai smūgiai. [23]

Labai mažai scramjet variklių kada nors buvo pagaminta ir skraidinta. 2010 m. gegužę Boeing X-51 pasiekė ilgiausio skramreaktyvinio lėktuvo išvermės rekordą – daugiau nei 200 sekundžių. [24]

## P&W J58 Mach 3+ papildomo degimo turboreaktyvinis variklis

Turboreaktyviniam veikimui per visą skrydžio gaubtą nuo nulio iki 3+ mach reikalingos funkcijos, leidžiančios kompresoriui tinkamai veikti esant aukštai įleidimo temperatūrai, viršijančiai 2,5 Mach, ir esant mažam skrydžio greičiui. [25] J58 kompresoriaus sprendimas buvo išleisti oro srautą iš 4- osios kompresoriaus pakopos maždaug 2 machų greičiu. [26] Išleidimo srautas, 20 % esant 3 Mach, buvo gražintas į variklį per 6 išorinius vamzdžius, kad būtų aušinamas papildomo degiklio įdėklas ir pirminis antgalis, taip pat kad būtų suteiktas papildomas oras degimui. [27] J58 variklis buvo vienintelis veikiantis turboreaktyvinis variklis, sukurtas veikti nenutrūkstamai net ir esant maksimaliam pakartotiniam degimui, 3,2 macho kruiziniam greičiui.

Alternatyvus sprendimas matomas šiuolaikinėje instaliacijoje, kuri nepasiekė veikimo būsenos, Mach 3 GE YJ93/XB-70. Jis naudojo kintamą statoriaus kompresorių. [28] Dar vienas sprendimas buvo nurodytas

pasiūlyme dėl 3 Mach žvalgybinio Phantom. Tai buvo aušinimas prieš kompresorių, nors ir palyginti trumpą laiką. <sup>[29]</sup> <sup>[30]</sup>

## Vandeniliu varomi oru kvėpuojantys reaktyviniai varikliai

Reaktyviniai varikliai gali būti varomi beveik bet koku kuru. Vandenilis yra labai pageidautinas kuras, nes nors energija vienam moliui nėra neįprastai didelė, molekulė yra daug lengvesnė nei kitos molekulės. Energija vienam kilogramui vandenilio yra dvigubai didesnė nei įprastų degalų ir tai suteikia dvigubai didesnę specifinį impulsą. Be to, vandeniliu varomus reaktyvinius variklius konstruoti gana lengva – pirmasis turboreaktyvinis variklis buvo varomas vandeniliu. Be to, nors ir ne kanaliniai varikliai, vandeniliu varomi raketiniai varikliai buvo plačiai naudojami.

Tačiau beveik visais kitais būdais vandenilis yra problemiškas. Vandenilio trūkumas yra jo tankis; pavidalu dujinės formos bakai yra neįprasti skrydžiui, tačiau net ir skysto vandenilio jo tankis yra keturioliktoji vandens tankio. Jis taip pat yra labai kriogeniškas ir reikalauja labai didelės izoliacijos, kuri neleidžia jo laikyti sparnuose. Bendra transporto priemonė būtų labai didelė ir daugeliui oro uostų ją būtų sunku priimti. Galiausiai grynas vandenilis gamtoje nerandamas ir turi būti gaminamas garų riformingo arba brangios elektrolizės būdu. Keletas eksperimentinių vandeniliu varomų orlaivių skrido su sraigtais ir buvo pasiūlyti reaktyviniai lėktuvai, kurie gali būti įmanomi. <sup>[31]</sup>

## Iš anksto aušinami reaktyviniai varikliai

Roberto P. Carmichaelio idėja kilo 1955 m <sup>[32]</sup> yra tai, kad vandeniliu varomi varikliai teoriškai galėtų turėti daug didesnę našumą nei angliavandeniliu varomi varikliai, jei įeinančiam orui aušinti būtų naudojamas šilumokaitis. Žema temperatūra leidžia naudoti lengvesnes medžiagas, didesnę masės srautą per variklius ir leidžia degimo kameroms įpurkšti daugiau degalų neperkaitinant variklio.

Ši idėja veda į patikimus projektus, tokius kaip „Reaction Engines SABRE“, kurie gali leisti iš vienos pakopos į orbitą skristi nešančias raketas, <sup>[33]</sup> ir ATREX, kuri leistų reaktyvinius variklius naudoti iki hipergarsinio greičio ir didelio aukščio nešančiųjų raketų stiprintuvams. ES taip pat tiria idėją dėl koncepcijos, leidžiančios pasiekti nenutrūkstamą antipodalinį viršgarsinį keleivių važiavimą 5 machų greičiu (reakcijos varikliai A2).

## Turborocket

Oro **turboreketas** yra kombinuoto ciklo reaktyvinis variklis. Pagrindinis išdėstymas apima dujų generatorių, gaminantį aukšto slėgio dujas, varantį turbiną/kompresorių, kuris suspaudžia atmosferos orą į degimo kamerą. Tada šis mišinys sudeginamas prieš paliekant prietaisą per antgalį ir sukuriant trauką.

Yra daug įvairių tipų oro turboreketų. Įvairūs tipai paprastai skiriasi tuo, kaip veikia variklio dujų generatoriaus dalis.

Pneumatiniai turboreketai dažnai vadinami **turboreaktyvinėmis raketomis**, **turboreaktyvinėmis raketomis**, **turboreketų plėtikliais** ir daugeliu kitų. Kadangi nėra bendro sutarimo, kokie pavadinimai taikomi kokioms konkrečioms sąvokoms, įvairūs šaltiniai gali naudoti tą patį pavadinimą dviem skirtingoms sąvokoms. <sup>[34]</sup>

## Terminija

---

Norint nurodyti RPM reaktyvinio variklio arba rotoriaus greitį, dažniausiai naudojamos santrumpos:

- Turbosraigtinio variklio  $N_p$  reiškia sraigto veleno sūkių skaičių. Pavyzdžiui, dažnis  $N_p$  būtų apie 2200 aps./min pastovaus greičio sraigto.
- $N_1$  arba  $N_g$  reiškia dujų generatoriaus sekcijos RPM. Kiekvienas variklio gamintojas pasirenka vieną iš šių dviejų santrumpų.  $N_1$  taip pat naudojamas ventiliatoriaus greičiui ant turboventiliatoriaus, tokiu atveju  $N_2$  yra dujų generatoriaus greitis (2 velenų variklis).  $N_g$  daugiausia naudojamas turbosraigtiniams arba turbosraiginiams varikliams. Pavyzdžiui, įprastas  $N_g$  būtų maždaug 30 000 RPM.
- $N_2$  arba  $N_f$  reiškia galios turbinos sekcijos greitį. Kiekvienas variklio gamintojas pasirenka vieną iš šių dviejų santrumpų, tačiau  $N_2$  daugiausia naudojamas turboventiliatoriaus varikliams, o  $N_f$  dažniausiai naudojamas turbopropeleriniams arba turboveleniniams varikliams. Daugeliu atvejų, net ir laisvųjų turbinų varikliams,  $N_1$  ir  $N_2$  gali būti labai panašūs.
- $N_s$  reiškia reduktoriaus pavarų dėžės (RGB) išėjimo veleno greitį, skirtą varikliams su turbos velenu. [35] [36]

Daugeliu atvejų, užuot išreiškus rotoriaus greitį ( $N_1$ ,  $N_2$ ) kaip RPM ekranuose kabinos, pilotams pateikiami greičiai, išreikšti projekcinio taško greičio procentais. Pavyzdžiui, esant pilnai galiai,  $N_1$  gali būti 101,5 % arba 100 %. Šis virtuotojo sąsajos sprendimas buvo priimtas atsižvelgiant į žmogiškuosius veiksnius, nes pilotai dažniau pastebės problemą dėl dviejų ar 3 skaitmenų procentų (kur 100 % reiškia nominalią vertę), o ne su 5 skaitmenų RPM.

## Taip pat žiūrėkite

---

- Siurblys-purkštukas
- Raketos variklis
- Turbopropeleris – dujų turbininis variklis, naudojamas propeleriams sukti
- Turboshaft – dujų turbininis variklis, naudojamas sraigtasparniams

## Literatūra

---

### Citatos

1. Angelo, Joseph A. (2004). *Kosmoso technologijų žodynas „Facts on File Dictionary of Space Technology“* (<https://books.google.com/books?id=kEjNBGzDDfEC&pg=PA14>) (3 leidimas). Informacijos bazės leidyba. p. 14. ISBN 0-8160-5222-0.
2. "Turboreaktyvinis variklis" (<https://web.archive.org/web/20090508133809/http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/aturbj.html>) . NASA Glenn tyrimų centras. Suarchyvuota nuo originalo (<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/aturbj.html>) 2009 m. gegužės 8 d . Žiūrėta gegužės 6 d 2009 m. .
3. „Trent XWB infografika“ (<http://www.rolls-royce.com/customers/civil-aerospace/products/civil-large-engines/trent-xwb/trent-xwb-infographic.aspx>) . Žiūrėta spalio 15 d 2015 m. .
4. Hill & Peterson 1992 , 190 p.
5. Mattingly 2006 , p. 12–14.
6. Mattingly, p. 12

7. Sweetman, Bill (2005). Trumpas, laimingas rekvizito gerbėjų gyvenimas (<http://www.airspacemag.com/history-of-flight/prop-fan.html>) Suarchyvuota (<https://web.archive.org/web/20131014045550/http://www.airspacemag.com/history-of-flight/prop-fan.html>) 2013 m. spalio 14 d. „Wayback Machine“ . *Oras ir kosmosas/Smithsonian* . 2005 m. rugsėjo 1 d.
8. „Reaktyvinio įleidimo angos dizaino kompromisai“ Andras Sobester Journal of Aircraft, Vol44, Nr.3 2007 m. gegužės–birželio mėn.
9. „Jet Propulsion for Aerospace Applications“ 2-asis leidimas, Walter J.hesse Nicholas VS MumfordPitman Publishing Corp 1964 p110
10. „Jet Propulsion for Aerospace Applications“ 2-asis leidimas, Walter J.hesse Nicholas VS MumfordPitman Publishing Corp 1964 p. 216
11. pagal Gas Turbine History (<http://www.turbomachine.com/history/>) Suarchyvuota (<https://web.archive.org/web/20100603225144/http://www.turbomachine.com/history/>) 2010 m. birželio 3 d. „Wayback Machine“.
12. „33 dalis tinkamumo skraidyti standartai – orlaivių varikliai“, 33.94 punktas „Menčių sutvirtinimo ir rotoriaus nesubalansavimo bandymai“
13. „Transport Canada – Sharing the Skies“ (<http://www.tc.gc.ca/civilaviation/AerodromeAirNav/Standards/WildlifeControl/tp13549/Chapter1.htm>) . Tc.gc.ca. 2010 m. sausio 6 d. Suarchyvuota (<https://web.archive.org/web/20100317024206/http://www.tc.gc.ca/civilaviation/aerodromeairnav/standards/wildlifecontrol/tp13549/cha>pter1.htm) nuo originalo 2010 m. kovo 17 d . Žiūrėta kovo 26 d 2010 m. .
14. „33 dalis – Tinkamumo skraidyti standartai – Orlaivių varikliai, 33.76 skyrius. Paukščių nurijimas
15. flightglobal archyvas Flight International 1982 m. liepos 10 d., p59
16. „JAV oro linijos: veikia didelių reaktyvinių degalų kainų eroje“ ([https://web.archive.org/web/20081030090957/http://www.airlines.org/NR/rdonlyres/73AADEC2-D5A2-4169-B590-1EE83A747CDA/0/Airlines\\_Fuel.pdf](https://web.archive.org/web/20081030090957/http://www.airlines.org/NR/rdonlyres/73AADEC2-D5A2-4169-B590-1EE83A747CDA/0/Airlines_Fuel.pdf)) (PDF) . Suarchyvuota iš originalo ([http://www.airlines.org/NR/rdonlyres/73AADEC2-D5A2-4169-B590-1EE83A747CDA/0/Airlines\\_Fuel.pdf](http://www.airlines.org/NR/rdonlyres/73AADEC2-D5A2-4169-B590-1EE83A747CDA/0/Airlines_Fuel.pdf)) (PDF) 2008 m. spalio 30 d . Žiūrėta birželio 29 d 2010 m. .
17. „Kiek oro mylių liko pasaulio degalų bake? (<http://www.after-oil.co.uk/runways.htm>) . After-oil.co.uk. 2005 m. birželio 29 d. Suarchyvuota (<https://web.archive.org/web/20100317204139/http://www.after-oil.co.uk/runways.htm>) nuo originalo 2010 m. kovo 17 d . Žiūrėta kovo 26 d 2010 m. .
18. Matingly, p. 14
19. Bensonas, Tomas. Ramjeto varomoji jėga (<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/ramjet.html>) . NASA Glenn tyrimų centras. Atnaujinta: 2008 m. liepos 11 d. Gauta: 2010 m. liepos 23 d.
20. McNab, Chrisas; Hunter Keeter (2008). *Smurto įrankiai: ginklai, tankai ir nešvarios bombos* (<https://archive.org/details/toolsofviolenceg0000mcna/page/145>) . Osprey leidykla. p. 145 (<https://archive.org/details/toolsofviolenceg0000mcna/page/145>) . ISBN 978-1-84603-225-7 .
21. „Štai ateina skraidantis vamzdis“ (<https://web.archive.org/web/20080309034409/http://www.time.com/time/magazine/article/0%2C9171%2C834721%2C00.html>) . *Laikas* . 1965 m. lapkričio 26 d. Suarchyvuota nuo originalo (<http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,834721,00.html>) 2008 m. kovo 9 d . Žiūrėta kovo 9 d 2008 m. .
22. „Astronautix X30“ (<https://web.archive.org/web/20020829020835/http://astronautix.com/lvs/x30.htm>) . Astronautix.com. Suarchyvuota nuo originalo (<http://www.astronautix.com/lvs/x30.htm>) 2002 m. rugpjūčio 29 d . Žiūrėta kovo 26 d 2010 m. .

23. Heiser, William H.; Pratt, David T. (1994). *Higarsinė oro kvėpavimo varomoji jėga* ([https://archive.org/details/hypersonicaire00heis\\_448](https://archive.org/details/hypersonicaire00heis_448)) . AIAA edukacinis serialas. Vašingtonas, DC: Amerikos aeronautikos ir astronautikos institutas. p 23 ([https://archive.org/details/hypersonicaire00heis\\_448/page/n41](https://archive.org/details/hypersonicaire00heis_448/page/n41)) –4 . ISBN 978-1-56347-035-6 .
24. X-51 Waverider atlieka istorinį hipergarsinį skrydį (<http://www.af.mil/news/story.asp?id=123206525>) . Jungtinių Valstijų oro pajėgos. 2010 m. gegužės 26 d. Žiūrėta: 2010 m. liepos 23 d.
25. US patentas 3 344 606 „Recover Bleed Air Turbojet“ Robert B. Abernethy
26. sr-71.org Blackbird vadovo 1 skyrius Aprašymas ir veikimas 1-20 psl.
27. enginehistory.org Pete'o Law pristatymas "SR-71 varomoji jėga, 2 dalis"
28. „Jet Propulsion for Aerospace Applications – antrasis leidimas“ Walter J. Hesse, Nicholas VS Mumford, Jr. „Pitman Publishing“ korporacija. 377 p
29. aviationtrivia.blogspot.ca "Uodegos per laiką" JP Santiago Trečiadienis, 2012 m. liepos 18 d. "The Mach 3 Phantom"
30. "F-12 serijos orlaivių varomosios sistemos veikimas ir plėtra" David H. Campbell, J.AircraftVol 11, No 11, 1974 lapkritis
31. Pvz., Reakcijos varikliai A2 hipergarsinis lėktuvas (<http://www.popsci.com/military-aviation-space/article/2008-01/green-skies-mach-5>)
32. „NASA istorija Kiti pomėgiai vandenilio srityje“ (<https://web.archive.org/web/20150416163620/http://www.hq.nasa.gov/pao/History/SP-4404/ch7-13.htm>) . Hq.nasa.gov. 1955 m. spalio 21 d. Suarchyvuota nuo originalo (<http://www.hq.nasa.gov/pao/History/SP-4404/ch7-13.htm>) 2015 m. balandžio 16 d . Žiūrėta kovo 26 d 2010 m. .
33. „Skylono erdvėlaivis“ ([https://web.archive.org/web/20110615104534/http://www.reactionengines.co.uk/tech\\_docs/JBIS\\_v57\\_22-32.pdf](https://web.archive.org/web/20110615104534/http://www.reactionengines.co.uk/tech_docs/JBIS_v57_22-32.pdf)) (PDF) . Suarchyvuota iš originalo ([http://www.reactionengines.co.uk/tech\\_docs/JBIS\\_v57\\_22-32.pdf](http://www.reactionengines.co.uk/tech_docs/JBIS_v57_22-32.pdf)) (PDF) 2011 m. birželio 15 d . Žiūrėta kovo 26 d 2010 m. .
34. Heiser ir Pratt, p. 457
35. PRATT & WHITNEY KANADA PRIEŽIŪROS VADOVAS – VADOVAS DALIES NR. 3017042 – įvadas – 6 psl
36. El. laiškas nuo temos eksperto – vyresniojo lauko palaikymo atstovo, Pratt & Whitney Canada Worldwide Support Network 2010 m. sausio 12 d.

## Cituoti šaltiniai

- Hillas, Philipas Grahamas; Petersonas, Carlos R. (1992). *Varomosios jėgos mechanika ir termodinamika* (<https://books.google.com/books?id=8ihcPgAACAAJ>) (2 leid.). Reading, Masačusetas : „Addison-Wesley Publishing Company“ . ISBN 978-0201146592 . Žiūrėta vasario 13 d 2016 m. .
- Mattingly, Jack D. (2006). *Varomosios jėgos elementai: dujų turbinos ir raketos* . AIAA edukacinis serialas. Restonas, VA: Amerikos aeronautikos ir astronautikos institutas. p. 6. ISBN 978-1-56347-779-9 .