

Vytvoření převratného proudového motoru, který umožní rutinně a cenově dostupným způsobem vynášet vesmírná tělesa na oběžnou dráhu, je nesnadný, ale výhledově dosažitelný úkol.

Motory vesmírných lodí



Thomas A. Jackson

Konstruktéři všech vyspělých zemí dlouho sní o vytvoření vesmírného tělesa schopného vzlétat z běžné vzletové dráhy a opět na ní přistávat, stejně jako to dokáže stíhačka X-wing – stroj, ve kterém létá Luke Skywalker v sérii filmů Star Wars. Stále jim stojí v cestě jedna věc: proudový motor, spotřebovávající při své práci velké množství kyslíku, jehož množství v horních vrstvách atmosféry není dostatečné k udržení procesu spalování paliva. Tělesa létající do vesmíru musí vynášet ve svých útrobách velké množství paliva a okysličovadla pro raketový pohon. I v raketoplánu, současném nejpokročilejšímu nosnému systému, celá polovina vzletové hmotnosti připadá na tekutý kyslík a pevné okysličovadlo, které musí stroj vynést vzhůru k zajištění spalovacího procesu po celou cestu na oběžnou dráhu.

Jednou z možností pro plnění takového úkolu je použití náporového motoru s nadzvukovým spalováním, v angličtině se pro něj používá termín „scramjet“, což je zkratka termínu Supersonic Combustion Ramjet (ramjet = náporový motor). Tento druh motoru dokáže čerpat kyslík z atmosféry v průběhu stoupavého letu. Úspora hmotnosti, spočívající v nasávání vzduchu při letu namísto jeho vynášení, umožní raketě s ramjetem, nadzvukovým náporovým motorem, vytvářet přibližně čtyřnásobný tah připadající na každý kilogram spotřebovaného paliva. Konečně, po desetiletích nesouvislého vývoje se zdá, že jsou dnes vyvíjené náporové motory s nadzvukovým spalováním připraveny vzlétnout.

DVOUSTUPŇOVÁ OBĚŽNÁ NOSNÁ RAKETA, jako toto navrhované vojenské těleso Quicksat, může být jednoho dne schopna vyslat lidskou posádku a náklad na oběžnou dráhu při dosažení nižších nákladů než to dokážou dnešní rakety. Bude to možné zásluhou nového náporového motoru s nadzvukovým spalováním – scramjetu.

Vědci na závěr roku 2009 naplánovali testování za letu, v jejichž průběhu chtějí překonat současná omezení tohoto nového druhu pohonných jednotek.

Na rozdíl od konvenčních raket, které vzlétají vertikálně přímo k oběžné dráze, nadzvukovým náporovým motorem poháněné vesmírné lodě budou stoupat vzhůru díky vztlaku vytvářeném na profilu křídel a trupu stejným způsobem jako dnešní dopravní letadla, čímž bude zajištěna lepší ovladatelnost a bezpečnost (dojde-li k přerušení letu, může letoun klouzat zpět k zemi). Tyto stroje budou vzlétat a zrychlovat do nadzvukových rychlostí s použitím konvenčních proudových motorů. (Nadzvukové, jinak supersonické rychlosti začínají na hodnotě Mach 1, čili 1225 km/h na úrovni hladiny moře). Poté úlohu převezme náporový motor s nadzvukovým spalováním a urychlí letící těleso na hypersonický režim – na hodnoty Mach 5 až Mach 15 (teoretická hranice nadzvukového náporového motoru). A konečně, malé raketové motory dále urychlí a vynesou vlastní užitečné zatížení až na oběžnou dráhu. Hodnota Mach 5 je pětinašobek rychlosti zvuku, to je přibližně 1,7 kilometru za každou vteřinu. Pro srovnání: dosud nejrychlejší, konvenčními pohonnými jednotkami poháněný, a lidskou posádkou obsluhovaný letoun SR-71 Blackbird, dnes již vyřazený ze služby v U.S. Air Force, dosahoval rychlosti okolo Mach 3,2.

ně dříve než je to možné nyní. Nadzvukové náporové motory budou možná jednou pohánět hypersonické dopravní letouny na dlouhých tratích, provozující dejme tomu dvouhodinový let z New Yorku do Sydney.

Mnoho skupin vědců dnes po celém světě pracuje na překonávání velikých technických úkolů spojených s dosažením hypersonické rychlosti letu s nadzvukovým náporovým motorem. Více se budeme v článku věnovat programu Hypersonické technologie náporových motorů společnosti Pratt & Whitney, pod záštitou U. S. Air Force, plánu, s kterým jsem nejvíce obeznámený. Další významné vývojové programy probíhají u organizací jako U. S. Navy, NASA, Agentury pro programy pokročilého obranného vývoje (DARPA) a výzkumných týmů v Austrálii, Velké Británii, Japonsku a dalších vyspělých zemích.

Cesta k letu

Scramjet není nijak novým pohonným konceptem. První patenty byly zaregistrovány již v padesátých letech 20. století a v letech šedesátých procházely první náporové motory pozemními zkouškami o rychlostech až do Mach 7,3. Firmy General Electric, United Technologies, Marquardt, Johns Hopkins Applied Physics Laboratory a NASA Langley Research Center vyvinuly motory se spalováním vodíku (stejně palivo se používá pro raketoplány a mnoho

Motory scramjet v dopravních letounech **NÁM MOHOU** **V BUDOUCNU UMOŽNIT DVOUHODINOVÝ LET** z New Yorku do Sydney.

Nastíněné možnosti povedou bez nadsázky k revoluci v létání. Zejména schopnost opakovaného použití novodobého vesmírného letadla pomůže učinit z takových cest do vesmíru záležitost poměrně běžnou a povede k dramatickému snížení nákladů na vyslání osob a nákladu na oběžnou dráhu. Obrovský výkon nových motorů mimo jiné umožní vojenským letounům svými řízenými střelami donést zbraňové hlavice kamkoliv na zeměkouli podstat-

jiných nosných raket na tekuté palivo). V polovině let osmdesátých minulého století vláda Spojených států spustila Národní program pro letouny s nadzvukovým náporovým motorem. Nicméně i přes investice ve výši 2 miliard dolarů byl program v roce 1994 zrušen jako součást rozpočtových škrťů na konci období studené války. V roce 2004 NASA dokončila svůj projekt Hyper-X, jehož součástí byly letové zkoušky dvou vodíkem poháněných motorů scramjet, oba lety trvaly jen několik vteřin a byly provedeny ve stejné výšce a stejnou rychlostí. Ke konci roku pak letoun NASA X-43A, scramjetem poháněný prototyp, dosáhl rychlostního rekordu dosažením hodnoty Mach 9,6. Letoun X-43A letěl jen několik sekund, pak se motor vyrobený z měděných slitin začal tavit. NASA vzhledem k tomu, že se do budoucna soustředí na lety na Měsíc a na Mars, další práce na tomto projektu zastavila. Otěže tak převzaly americké a australské ozbrojené síly. Společný americko-australský program HIFiRE (Hypersonic International Flight Research Experimentation) zahájil testovací lety ve druhé polovině roku 2007. Americké letectvo spolu s vojenskou výzkumnou organizací DARPA pracují na zařízení X-51A, DARPA vedle toho ještě vyvíjí hypersonický letoun Falcon.

Náporový motor s nadzvukovým spalováním – scramjet – patří do rodiny proudových motorů spotřebovávajících vzdušný kyslík, které na základním principu vytváření tahu urychlením výstupních plynů umožňují let v určitém rozsahu provozních rychlostí a výšek letu. Obecně, v proudovém motoru stlačený atmosférický vzduch se slučuje s palivem, tato směs je spalována a expanzí spálených plynů je vyvozen tah. Každý cestující letec-

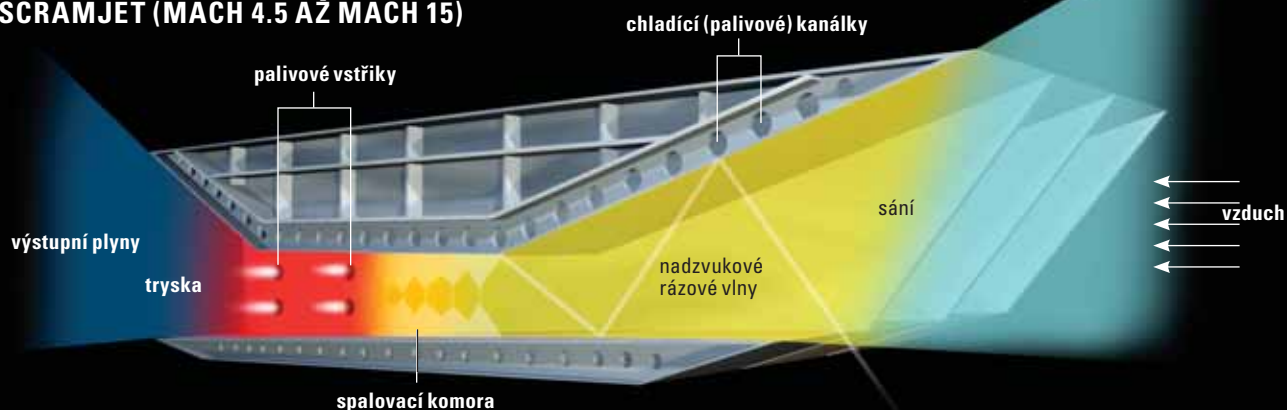
HLAVNÍ MYŠLENKY

- Scramjet – náporový motor s nadzvukovým spalováním, může pohánět řízené střely a jiné zbraně, vesmírné letouny i dopravní letouny s dlouhým doletem a hypersonickou cestovní rychlostí – Mach 5 až Mach 15 (Mach 1 je rychlost zvuku, cca 1225 km/h u hladiny moře).
- Scramjet nasává nadzvukový proud atmosférického vzduchu, mísí ho s palivem a spalováním směsi vytváří ohromný propulzní tah. Na rozdíl od raket nemusí nést na palubě kyslík či oksylčovadlo, což snižuje hmotnost a umožňuje čtyřnásobný tah na kilogram paliva.
- Ačkoliv je myšlenka scramjetu jednoduchá – motor nemá žádné rotující komponenty – technologii a konstrukci scramjetu s vytrvalým provozním cyklem při různých letových konfiguracích stojí v cestě mnoho překážek.

RODINA LETECKÝCH MOTORŮ

Scramjet patří do rodiny proudových motorů a pracuje na podobném principu. Zjednodušeně, proudový motor vytváří hnací sílu stlačováním vstupujícího vzduchu, následným smícháním s palivem, spalováním této směsi a rozpínáním vzniklých výfukových plynů směrem dozadu.

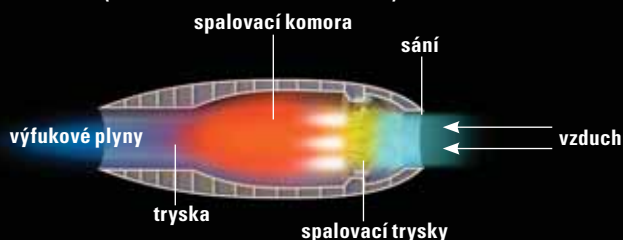
SCRAMJET (MACH 4.5 AŽ MACH 15)



Nadzvukový proud vzduchu vstupuje do sání motoru, kde se prouděním vzduch stlačuje a částečně snižuje rychlost, čímž se část kinetické energie přeměňuje na teplo. Z palivových čerpadel je pod vysokým tlakem vstříkováno palivo do stlačeného žhavého vzduchu a ve spalovací komoře tato směs při nadzvukové rychlosti proudění hoří, čímž se

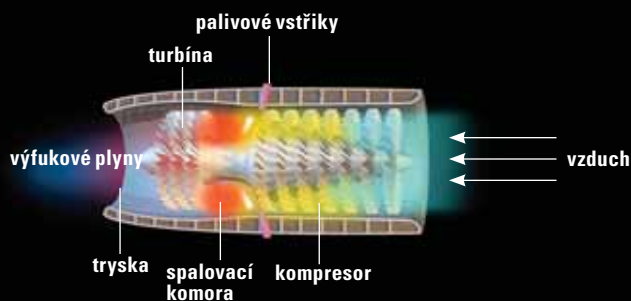
chemická energie paliva přeměňuje na tepelnou energii. Tímto procesem se v omezeném prostoru rychle zvyšuje teplota a tlak spálené směsi a v okamžiku, kdy produkt hoření dosáhne rozšiřující se trysky, výstupní plyny prudce expandují a urychlují těleso přeměnou tepelné energie na kinetickou energii.

RAMJET (MACH 2.5 AŽ MACH 6)



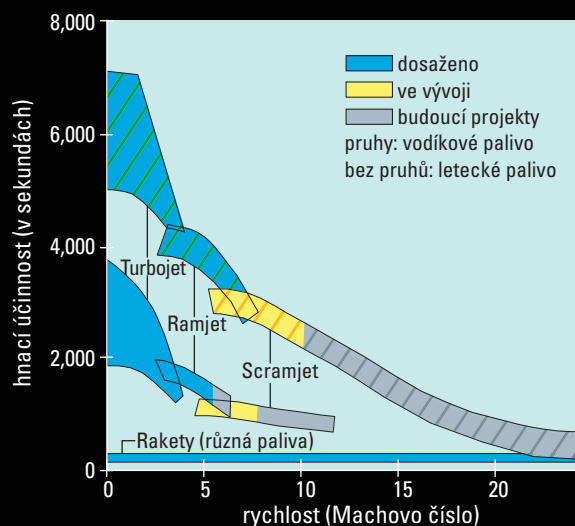
Cyklus ramjetu je podobný cyklu scramjetu, liší se podzvukovou rychlostí vnitřního proudění.

TURBOJET (MACH 0 AŽ MACH 3)



Turbojet, vzhledem k mnohem nižší dopředné rychlosti letu, potřebuje otáčivá kola turbíny ke stlačení vzduchu a vytváření tahu.

VÝKONNOSTNÍ TABULKA



Každý letecký motor je vytvořen pro specifickou konfiguraci rychlosti a výšky letu. Vodíkové palivo nabízí vyšší výkon pohonné jednotky při mnoha potížích s dostatečnou dodávkou a vlastní přepravou paliva. S uhlovodíkovým palivem je jednodušší zásobování a manipulace, poskytují však méně energie na jednotku hmotnosti. Hnací účinnost, veličina vyjadřující efektivitu pohonné jednotky, udává množství tahu na jednotku hmotnosti spotřebovaného paliva.

ke společnosti jistě viděl turbínový proudový motor, který je ze skupiny proudových motorů nejčastěji používaným typem a který se skládá z pěti základních segmentů: sání vzduchu; kompresor sající vzduch a zvyšující jeho tlak (rotorové a statorové lopatky na otáčivé hřídeli); spalovací komora, ve které je do stlačeného vzduchu vstříkováno palivo a kde je tato směs spalována; turbína, jejíž lopatky roztáčí rozpínající se výstupní plyny a která pohání přes hřídel kompresor; a tryska, tou z motoru odchází expandující horké výfukové plyny a vyvozují tah. S použitím současných turbínových motorů dokážou letouny vyvinout rychlost o něco vyšší než Mach 3. Při vyšších rychlostech však z důvodu přehřívání dochází k poškození otáčivých součástí.

Při rychlostech přibližně nad Mach 2,5 proudový motor už nepotřebuje kompresor ani turbínu, je-li uzpůsoben tak, že nasává vzduch stlačovaný vlastním nadzvukovým letem. Náporový motor (ramjet) má tedy pouze sání vzduchu, spalovací komoru a hnací trysku. Sání je speciálně konstruováno tak, že vzduch stlačuje a zároveň proudění zpomaluje na podzvukovou rychlost. Vstříkovací trysky dodávají do stlačeného zpomaleného vzduchu palivo a tato směs se při podzvukové rychlosti proudění vzněcuje a hoří. Horké výfukové plyny jsou opět urychlovány na rychlost zvuku tím, jak prochází úzkým hrdlem či přes mechanickou škrtdí klapku, a následně se plně rozpínají v kuželovité výstupní trysce a tím akcelerují na nadzvukovou rychlost, vyšší než je rychlost nasávaného proudu. Když se rychlost letounu zvyšuje přes Mach 5, stlačení vzduchu při zpomalování v sacím ústrojí zvyšuje teplotu v útrokách motoru až do takové míry, kdy je příliš obtížné efektivně dodávat spalováním více tepla. Hodnota Mach 5 až Mach 6 je tedy mez použitelnosti ramjetu, klasického náporového motoru.

Anatomie náporového motoru s nadzvukovým spalováním

K vytvoření účinnějšího pohonného tahu a k provozu na vyšších rychlostech, než umožňuje klasický náporový motor (ramjet), musí náporový motor s nadzvukovým spalováním (scramjet) omezit kompresi nasávaného proudu vzduchu tak, aby proudění zůstávalo nadzvukové v celém průběhu spalovacího procesu. V nadzvukovém, stejně jako v klasickém, náporovém motoru proudící vzduch nenarazí na žádné pohyblivé části. Scramjet se liší v tom, že k procesu spalování dochází při nadzvukové rychlosti proudění spalované směsi. Mechanicky se jedná o nejjednodušší motor, tvoří ho trubice, jejíž vstup zužuje difuzér neboli škrtdílo. Za dopředného letu vzduch vtéká zpředu do trubice velkou rychlostí a průchodem kolem škrtdíla se stlačuje a zahřívá. Palivo se po vstříknutí do spalovací komory vzněcuje samo, podobně jako u Dieslova motoru. Spaliny pak vysokou rychlostí unikají zadní tryskou a tlačí letadlo vpřed. Princip je jednoduchý, velice složité je navrhnout vhodný tvar trubice motoru a škrtdíla.

Podobně jako některé druhy žraloků musí plavat nepřetržitě vpřed k udržení dostatečného zásobení kyslíkem, náporové motory ramjet a scramjet bez dopředné rychlosti nepracují a proto je nutné letoun s těmito motory nejprve urychlit na provozní rychlost jeho náporových motorů. To znamená, že letoun poháněný motorem scramjet musí být vybaven ještě dalším pohonným zdrojem, například raketovým nebo turbínovým motorem, pro potřebné

počáteční zrychlení. V okamžiku získání nezbytné rychlosti pilot letounu spustí náporový motor pro další fázi letu do horní vrstvy atmosféry, kde pak let převezme raketový pohon k finálnímu dosažení oběžné dráhy. Navržení takového hnacího systému, který sdružuje různé motorové fáze, je náročná optimalizační úloha a výsledek ovlivňují různé faktory, jako velikost užitečného zatížení, určená oběžná dráha, požadovaný rozsah a rychlost transportu, schopnost nesení zbraní a další.

Hlavní překážkou při provozu s motory scramjet je krátká doba zdržení vzduchu v motoru – pouhých pár tisícín vteřin – takové spalování paliva je úkol podobný zapalování sirky uprostřed tornáda a udržování jejího hoření. Tajemství, kterým se udrží motor scramjet v chodu, je skryto v nesmírně důmyslném tvarování vnitřního tvaru trubice a výstupního ústrojí. Skutečný scramjet vytváří stálý tah díky přesnému měření rychlosti a tlaku vzduchu na vstupu do motoru a řízení dávkování paliva pro zajištění dokonalého spalování a přesnému uvolňování získané energie. Pečlivé regulování rovnováhy mezi vstupním prouděním a výstupním teplem potlačuje potřebu mechanického škrtdíla u náporového motoru typu ramjet, a tím umožňuje scramjetu udržet nadzvukovou rychlost proudění v celém procesu spalování.

Konstruktéři nadzvukových náporových motorů si dobře uvědomují, že rozhodující je přesné ovládnutí tepelné energie uvnitř motoru. Teplo působí na konstrukci motoru vlivem tření a vlastním spalovacím procesem, navíc tepelný tok může být místně značně navýšen následkem vzniku vnitřních rázových vln dopadajících na stěnu motoru. Kinetická energie přijímaného hypersonického proudění je v motoru zcela přeměněna na teplo a to je pak více než dostatečné k roztavení kovové konstrukce motoru. Navíc, bez přiměřeného snížení rychlosti, vzduch v podstatě proletí motorem obrovskou rychlostí a s velice nízkou teplotou i tlakem, což téměř vylučuje plynulý spalovací proces.

K ochraně konstrukce motoru proti roztavení způsobeném třením nadzvukového proudění používají vývojáři prvek aktivního chlazení. Palivo, schopné pohlcovat teplo, tlačí čerpadla stálým tokem kanálky vestavěnými do těla motoru a částí draku a tím je zajištěno odsávání potenciálně destruktivního tepla. Přidruženou výhodou tohoto systému chlazení je připravení paliva k rychlému hoření ve spalovací komoře. Stejný způsob chlazení se po desetiletí úspěšně používá u konvenčních raket, jako chladicí médium v nich je používán tekutý vodík. Použití uhlovodíku v takovém systému chlazení je podstatně těžší úkol, teplotně namáhaný uhlovodík se může rychle rozložit na pevné částičky koksu a ty pak snadno ucpou chladicí kanálky. Dalšími nevýhodami je navýšení hmotnosti, celková složitost systému aktivního chlazení a bezpodmínečná nutnost jeho bezchybné funkce, protože selhání systému chlazení palivem nutně vede ke katastrofálnímu poškození konstrukce.

Zdárný provoz nadzvukového náporového motoru scramjet je výsledkem citlivého seřizování, ještě více komplikovaného faktem, že geometrie daného proudu vzduchu je charakteristická pouze pro jedinou konfiguraci letových podmínek (rychlost letu, nadmořská výška, atd.) V ideálním případě by se rozměr a tvar proudění ve scramjetu neustále přizpůsoboval při každé změně rychlosti a výšky, nicméně pohyblivý, záruvzdorný vnitřní povrch i mechanické spoje s takovými vlastnostmi jsou zřejmě stále za



LETADLA TYPU SCRAMJET MOHOU mít různé tvary, ale vždy potřebují k urychlení na svou startovací rychlost další pohonný systém, například raketový motor. Výzkumný letoun NASA X-43A (*nahoře*), který v roce 2004 vytvořil rychlostní rekord dosažením hodnoty Mach 9.6, téměř 11 500 km/h, byl vypuštěn z oběžné výzkumné rakety Pegasus. Scramjet projektu HyShot vypouštěný z rakety Terrier-Orion (*zcela vpravo*), podobně jako obdobný systém pohonu scramjet FASTT použitý na budoucí vojenské řízené střele (*uprostřed*).



hranic dnešních materiálových a konstrukčních možností. Nutnost průběžně měnit nastavení rozžhavené vnitřní stěny těla motoru a technologie utěsnění vzniklých přechodů proti unikání vysokoteplotních plynů je velkou překážkou v realizaci plnohodnotného chodu nadzvukového náporového motoru.

Řešení úlohy

Navzdory všem technickým překážkám spojeným se stavbou motoru typu scramjet vědci v nedávné době dosáhli slibných úspěchů. Jednoho z významných výsledků bylo dosaženo v programu U. S. Air Force s názvem HyTech, který začal v roce 1995. Projekt HyTech sdružuje bádání odborníků z vlády a z průmyslu, univerzitních vědců a technologů a tento tým soustředí svůj výzkum na řešení výzev spojených s vývojem nadzvukového náporového motoru. Nejprve se členové společně zaměřili na malý, neobnovitelný scramjet motor, vhodný k použití v nadzvukových řízených střelách. Takový motor je malý a lze ho upevnit k stávajícím testovacím prostředkům na zemi pro snazší získávání technických výsledků zkoušek. Takový malý scramjet bude v provozu pouze jediný pracovní cyklus, čímž se prozatím odloží složité řešení obnovitelné konstrukce na pozdější vývoj. Program dále minimalizuje další složitosti zúžením rozsahu provozních rychlostí od Mach 4 po Mach 8 a pevným nastavením tvaru trajektorie nadzvukového proudu.

V poslední době vědci z programu HyTech pracovali s typem paliva označovaným JP-7, jedná se o tekutý uhlovodík původně vyvinutý speciálně pro pohon letounu SR-71 Blackbird. Jak bylo zmíněno v článku dříve, v motoru scramjet slouží palivo jako pohlcovač nadměrného tepla. V tepelně vyváženém pohonném systému množství paliva nezbytného k absorpci nadměrného tepla by nemělo překročit množství paliva potřebného pro vlastní proces spalování. Projektanti programu HyTech hledají tuto rovnováhu

v režimu provozu při rychlosti Mach 8 a v palivu JP-7 našli prostředek ke splnění takového úkolu.

Aby vzduch sající pohonná jednotka příznivě obstála svou hnací účinností v raketou startovaném tělese, výkonnostní teorie určují, že musí dobře pracovat při přibližně poloviční rychlosti, než je nejvyšší dosažitelná rychlost tělesa. Vědci se tedy zaměřili na hodnotu Mach 4 jako na spouštěcí rychlost motoru scramjet, což je opět nesnadný úkol, protože teplota vzduchu vstupujícího na této rychlosti do spalovací komory je o dost nižší než je teplota paliva pro samovznícení. Z toho důvodu bude motor potřebovat pomoc při zapalování paliva a zřejmě to budou do paliva přidáné chemické přísady ke snížení teploty samovznícení anebo zapalovací zařízení, které směs paliva a vzduchu vznítí vstříkáním velmi horkého plynu. Při vyšších Machových číslech rychlosti letu bude pak zapalování a udržení hoření mnohem jednodušší, až do tak vysokých hodnot, kdy bude dalším úkolem udržení spalování pro zmiňovanou přílišnou rychlost proudu palivové směsi.

[AUTOR]

THOMAS A. JACKSON je náměstek pro vědu v Sekci leteckých pohonných jednotek Rady pro hnací systémy Vývojové laboratoře amerického letectva v Ohio, kde vede vědecký výzkum technologií moderních pohonných jednotek. Jackson v roce 1985 získal titul Ph.D. v oboru mechanického inženýrství na Kalifornské univerzitě v Irvine a je držitelem titulu M.A. v oboru managementu technologií na Massachusettském technologickém institutu Sloanovi školy managementu. Jeho výzkum je převážně zaměřen na spalovací procesy a systémy vstříkování paliva v pohonných jednotkách. Thomas A. Jackson je otcem čtyř dětí, ve volném čase rád hraje tenis a baví ho renovace starých domů a spravování rozbitých dětských hraček.

V průběhu roku 2003 týmy programu HyTech vyvinuly díly a ucelené pomocné systémy motoru, pomocí nichž dosáhly a překročily většinu původních cílů programu. Ale po rozsáhlých pozemních zkouškách objevili existenci dalších významných vývojových překážek. Zbývající otázky, všechny spojené s udržením výkonu v měnících se provozních podmínkách – jako rychlost, výška letu a nastavení přípusti paliva – jsou extrémně složité ke zkoumání v aerodynamickém tunelu a další testování bude nutné provádět za letu.

Z toho důvodu americké letectvo U. S. Air Force vyvíjí testovací prototyp, takzvaný SED (Scramjet Engine Demonstrator), označovaný jako X-51A, na kterém budou za letu zkoušeny systémy vzešlé z projektu HyTech. SED je navazující letový program a technologie jsou na základě získaných poznatků dále vyvíjeny v rámci HyTech programu. Díky pozemním testům a rozsáhlému počítačovému modelování se podařilo konstruktérům vyvinout rozměrem plnohodnotný a palivem aktivně chlazený prototyp motoru sramjet, vhodný pro letové zkoušky v rámci programu SED.

Vzhledem k nynější technologické nemožnosti změny vnitřního tvaru motorového prostoru za letu, tolik důležité vlastnosti ke zvýšení výkonnosti ve formě rychlé změny rychlosti a výšky letu, konstruktérský tým zvolil možnost sestavit motor scramjet s pevnou geometrií tvaru nadzvukového proudění. Výsledkem této volby motorové stavby je kompromis mezi adekvátním zrychlením ve spodní oblasti rozsahu provozních rychlostí (Mach 4.5 až Mach 7) a efektivního letového výkonu při nejvyšší rychlosti o hodnotě Mach 7. Řízení dodávky paliva do motoru je primární způsob ovládní – jeho tahu, intenzity zrychlení a udržování stabilního chodu.

Motor je zkonstruovaný převážně z oceli, která je aktivně ochlazována vnitřním oběhem paliva. Na náběžných hranách, předních částech přímo vystavených hlavnímu náporu horkého proudění, ocel nahrazují keramické komponenty. Náběžné hrany jsou totiž příliš ostré a není možné do nich vestavět chladicí kanálky. Spolehlivé spojování těchto chlazených a nechlazených součástí je náročné ale rozhodující. Přílišné strukturální narušení (např. u řízení střely před dosažením cíle) by nutně vedlo k nepřipustné a katastrofální závadě. Další problém může vzniknout při rozpínání vlivem tepla – kvůli různým vlastnostem u ke-

ramických a kovových materiálů může dojít k ovlivnění tvaru geometrie nadzvukového proudění, což nežádoucím způsobem ovlivní ovládní výkonu motoru scramjet. Konstruktéři vyřešili tento problém tím, že použili dvousložkový kompozitní uhlíkový materiál stálý za tepla s principem spojování pero – drážka.

Základem úspěšných výsledků letounu X-51A je použití paliva JP-7 (uhlovodík) k pohonu a k chlazení motoru scramjet. Do současnosti u většiny programů vývoje motorů scramjet byl používán jako palivo vodík. Na rozdíl od vodíku, většina uhlovodíkových paliv je méně reaktivní, obsahuje méně energie na jednotku hmotnosti a má nižší teplotní kapacitu pro chlazení horkých částí. Nicméně, uhlíková paliva jsou obvykle používána i v dalších letových vývojových programech Air Force a díky fungující dodavatelské síti je zajištěno spolehlivé zásobování tímto druhem palivem. A navíc, uhlovodík disponuje větším množstvím energie na jednotku objemu a pro přepravu se lépe kompletuje, vyžaduje tedy menší prostor na palubě letounu než uhlík v množství se stejným obsahem využitelné energie.

K vyrovnání nevýhod nižší reaktivity a teplotní kapacity uhlovodíkového paliva HyTech využil u paliva JP-7 jeho endotermický potenciál – to je jeho schopnost nasávat teplo v průběhu chemické reakce. Když toto palivo přijme teplo z okolního prostředí bez přítomnosti kyslíku a za přítomnosti vhodného katalyzátoru, jeho dlouhé, složité polymerické řetězce se rozštěpí na řetězce krátké a jednoduché a z kapaliny se změně na plyn. V průběhu tohoto procesu palivo absorbuje až pětinašobek své kapacity pro latentní teplo – je to energie spotřebovaná přeměnou z kapalného skupenství na plynné. Po endotermickém procesu se palivo promění v horké plyny, které pak obsahují o 10% více energie než neohřáté kapalné palivo. Výsledná forma uhlovodíku s nízkou molekulární hmotností je více reaktivní než palivo v původní formě a je lépe připraveno k hoření v krátkém čase spalovacího procesu nadzvukového náporového motoru.

Konstruktérům se podařilo vyrobít motor scramjet s pevnou



X-51 A SRAMJET ENGINE DEMONSTRATOR (nahore) TESTUJE HyTech scramjet amerického letectva v roce 2009. Prototyp nejnovějšího scramjetu amerického letectva (vpravo) nedávno ukončil sérii pozemních testů ve vysokoteplotním tunelu v NASA Langley Research Center.



DON FOLEY (ilustrace); PAUL BAGBY NASA (fotografie)

geometrií proudu dostatečně velký pro pohon tělesa o velikosti řízené střely, tento prototyp využívá uhlovodíkové palivo JP-7 a započiná spalovací proces při rychlosti Mach 4.5 a dokáže urychlit těleso na rychlost Mach 7. Použili v něm zmiňovanou technologii aktivního chlazení a tepelné stálé materiály a díky tomu dokážou pomocí paliva udržovat tepelnou rovnováhu uvnitř motoru. Ještě v letošním roce mají v plánu letoun X-51A z klouzavého letu pomocí raketového motoru urychlit na startovací rychlost pro motoru scramjet a po jeho spuštění pak za letu ověřit skutečné vlastnosti této nově vyvinuté technologie.

Budoucí plány

Scramjet pro vojenský prototyp X-51A vycházející z koncepce X-43A vyvíjí firma Pratt and Whitney Rocketdyne. Partneři vývo-

SPALOVACÍ PROCES při nadzvukové rychlosti proudění PŘIPOMÍNÁ ZAPALOVÁNÍ SIRKY A UDRŽOVÁNÍ PLAMENE uprostřed tornáda.

ového programu U. S. Air Force, DARPA, Pratt and Whitney a Boeing plánují letoun X-51A odpalovat přídavným raketovým motorem z bombardéru B-52 ve výšce 10 km. Cílem je dosáhnout vytrvalého, nejméně pětiminutového letu rychlostí vyšší než Mach 8. První testovací let je plánován na konec roku 2009, pokračovací testy pak na rok 2010.

Za předpokladu, že budou letové zkoušky projektu úspěšné, bude třeba udělat velmi mnoho, než se tato nová technologie pohonu dostane do praktického použití ve formě zbraní rychlé reakce, letounů se schopností dlouhého hypersonického letu a cenově dostupnějších letů do vesmíru. Motory scramjet musí být schopné fungovat spolehlivě v širokém rozsahu nadzvukových rychlostí. Jak bylo zmiňováno, současné turbínové motory jsou účinné v rozsahu rychlostí od Mach 0 po Mach 3 až 4, zatímco raketový pohon je nezbytný pro režimy letu nad rychlost přibližně Mach 15. Při tak vysokých rychlostech pro scramjet nesnesitelná tepelná energie neumožňuje zásobovat spalovací proces dostatečným množstvím vzduchu. Konstrukteři proto nyní potřebují vyvinout scramjet, který pokud možno provozním rozsahem zaplní mezeru mezi rychlostmi Mach 4 až Mach 15. V některých fázích použití bude scramjet muset být plně provozuschopný na nízkorychlostním cyklu stejně jako turbínový proudový motor. Bude nezbytné, aby k přechodu mezi jednotlivými režimy chodu motoru scramjet docházelo velmi plynulou změnou. Vývojáři budou dále muset vynaložit úsilí pro zajištění dostatečného tahu takového různorodého systému pohonu ve fázích mezi spouštěním jednotlivých druhů motorů v průběhu zrychlování.

Letoun X-51A s navrženou pevnou geometrií nemůže výrazně snížit své provozní hranice. Chod scramjetu při rychlosti nižší než Mach 4 nebude možný bez proměnné vnitřní geometrie motoru. Ačkoliv to nebylo cílem projektu SED, vývojáři z U. S. Air Force a z NASA představili na jednom z prototypů programu HyTech měnitelnou geometrii vstupního ústrojí motoru, u kterého žádoucí aerodynamickou konfiguraci nastavují přestavitelné klapky.

Druh a vlastnosti paliva mohou také výrazně ovlivňovat užitelnost scramjetu na obou mezích současné provozní obálky. X-51A je vyvinut tak, že pracuje až po dostatečném zahřátí těla motoru nutném k uvedení paliva JP-7 do plynného stavu. Pro provoz na nižších nadzvukových rychlostech budou muset být další generace scramjetu opatřeny spalovací komorou schopnou efektivně spotřebovávat palivo v tekuté i plynné formě před dosažením vyšších fází letu, kdy bude palivo díky tepelné energii pouze v plynném stavu. Kapalný stav má tisíckrát vyšší hustotu než plynná forma a zásobování pohonnými hmotami i zachování plynulého chodu motoru ve fázi přechodu paliva z kapaliny na plyn je mimořádně složitě. Taková způsobilost nicméně už byla předvedena při zkouškách systémových součástí v rámci plnění vývojových cílů projektu HyTech. V horní části provozního rozsahu se měrné tep-

lo leteckých paliv ukázalo jako dostačující do rychlosti Mach 8, nejsou-li podobně jako JP-7 schopná endotermického rozkladu. Pro let vyšší rychlostí bude nutné použít zdokonalené žáruvzdorné materiály a zcela jiný druh paliva a volba padne možná na vodík i přes všechny logistické a objemové nevýhody.

Program HyTech se od počátku zaměřil na vývoj tělesa velikosti řízené střely určeného k vypouštění z letounu. Mnohem větší těleso bude nutné vyvinout, aby bylo schopné udržet hypersonický let a dosáhnout vesmírného prostoru. Od roku 2003 se tomu věnují programy Falcon agentury DARPA a Robust Scramjet americké Air Force, oba zápasí s problémy většího rozměru motoru scramjet se stonásobným objemem proudění oproti nynějším v HyTech vyvinutým prostředkům.

Poslední výsledky vývoje technologie scramjet učinily velké kroky v překonávání rozhodujících překážek stojících před dosažením vytrvalého vysokorychlostního letu. Pokračující vývoj, doufejme, povede krok za krokem až k vývoji létajícího tělesa podobného stíhače X-wing ze Star Wars.

➔ CHCETE-LI VĚDĚT VÍCE:

Ramjets. Edited by Gordon L. Dugger. American Institute of Aeronautics and Astronautics Selected Reprint Series, 1969.

A Procedure for Optimizing the Design of Scramjet Engines. P. J. Waltrup, F. S. Billig and R. D. Stockbridge in *Journal of Spacecraft and Rockets*, díl 16, č. 3, strany 163–171; květen–červenec 1979.

Research on Supersonic Combustion. F. S. Billig in *Journal of Propulsion and Power*, díl 9, č. 4, strany 499–514; červenec–srpen 1993.

Hypersonic Airbreathing Propulsion. William H. Heiser, David T. Pratt, Daniel H. Daley and Unmeel B. Mehta. American Institute of Aeronautics and Astronautics Education Series, 1994.

Investigation of Scramjet Injection Strategies for High Mach Number Flows. D. W. Riggins, C. R. McClinton, R. C. Rogers and R. D. Bittner in *Journal of Propulsion and Power*, díl 11, č. 3, strany 409–418; květen–červen 1995.