

A photograph of a hybrid rocket engine test. A large, bright, orange-yellow flame and white smoke plume are visible, emanating from a test cell. In the background, there are industrial structures, including a tall yellow tower and a large cylindrical tank. The foreground shows a metal grate floor.

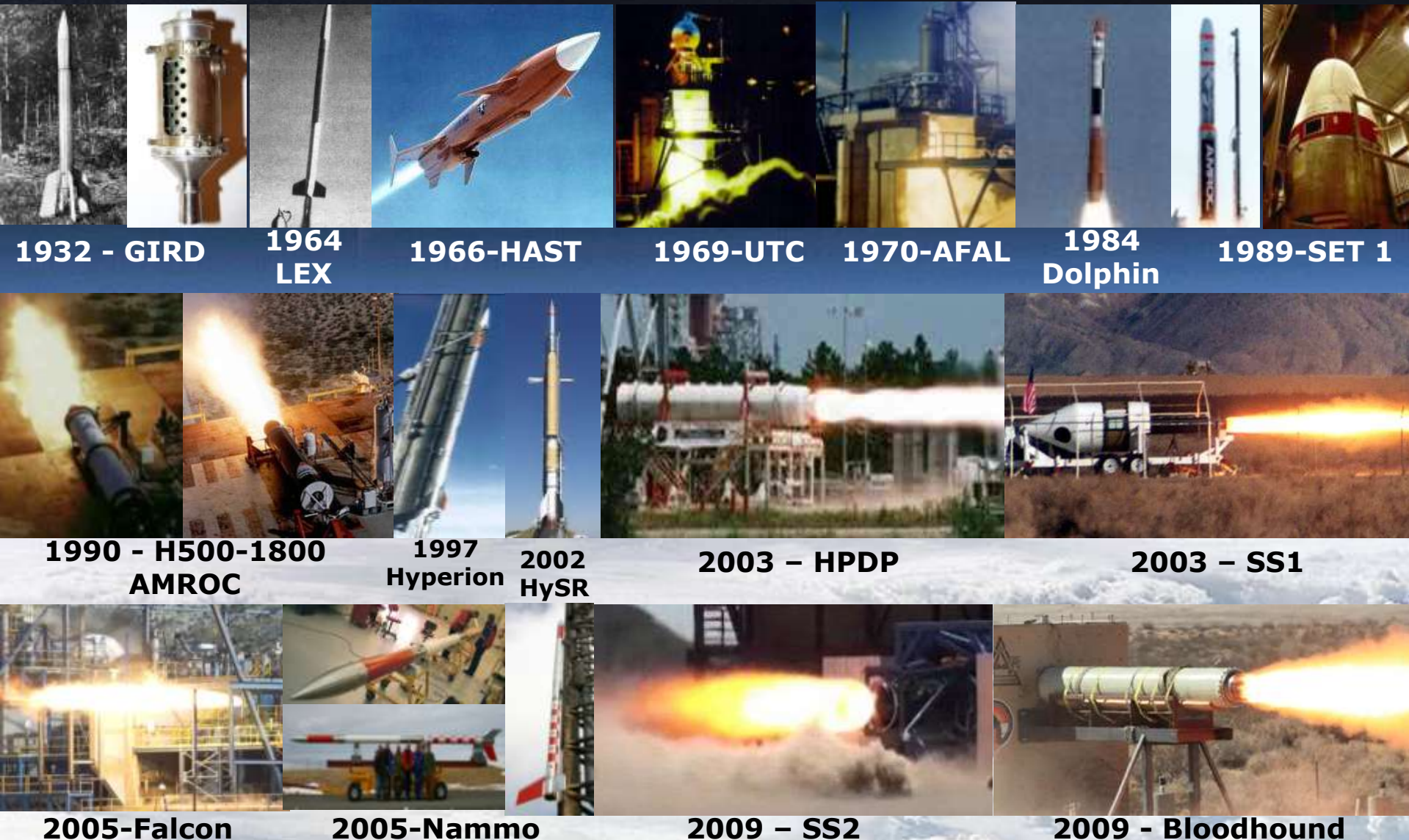
Hybridní raketové motory

Ing. Csaba Boros PhD.

Obsah

- ☐ Úvod
- ☐ Stručná historie
- ☐ Rozdělení HRM
- ☐ Výhody a nevýhody HRM
- ☐ Výběr okysličovadla
- ☐ Výběr a konfigurace tuhého paliva
- ☐ Vnitřní děje v HRM
- ☐ Multifunkční, spalitelné struktury
- ☐ Závěr

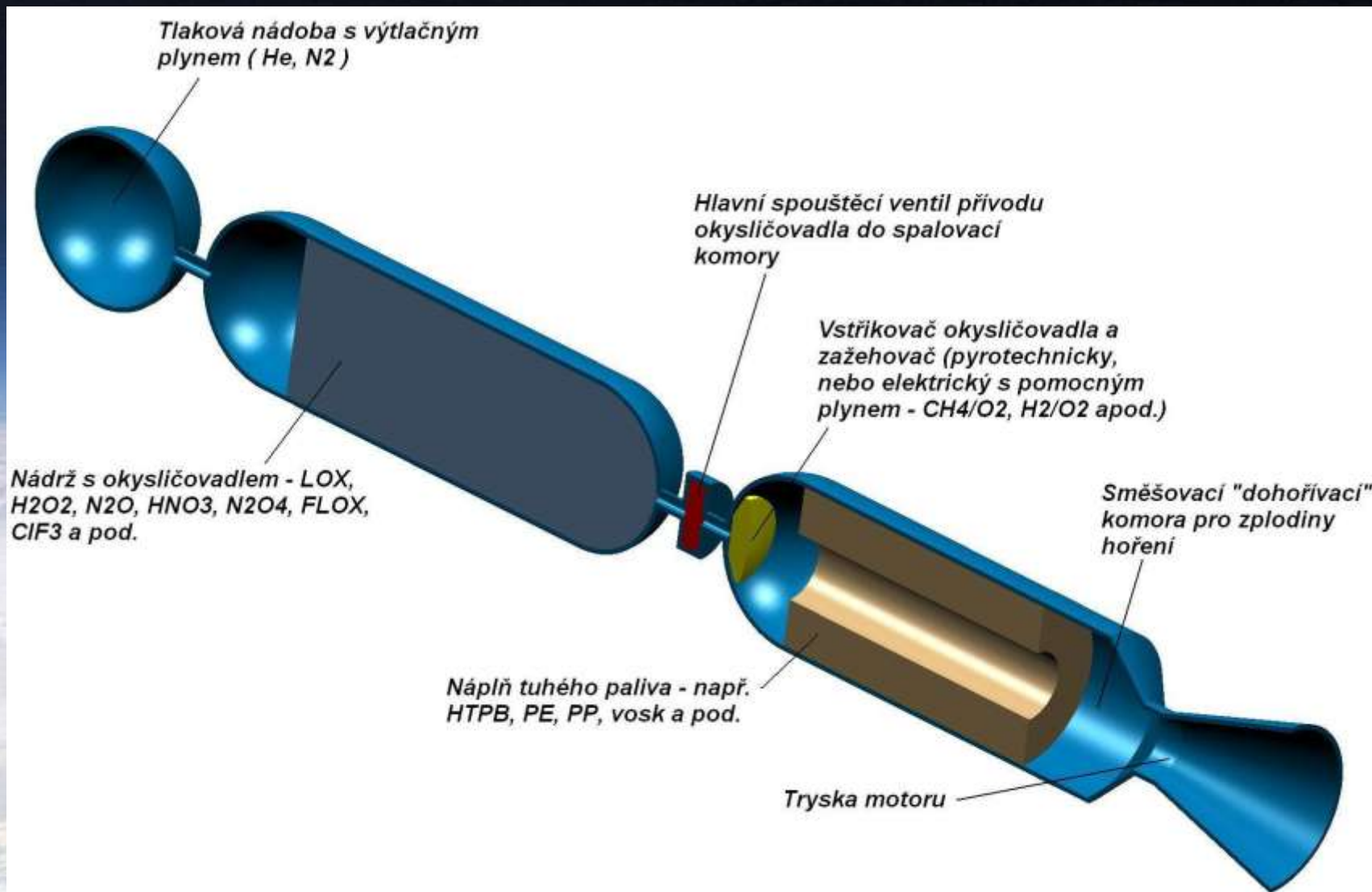
Historie HRM



Základní rozdělení HRM

- **Klasické HRM** (tuhé palivo a kapalné, resp. plynné okysličovadlo)
- **Inverzní HRM** (tuhé okysličovadlo a kapalné palivo
- **RM TPH s přídavným vstřikem okysličovadla**

Základní klasické schéma HRM



Výhody/nevýhody HRM

Hybridní raketové motory mají v porovnání s RM na TPH a KPH určité přednosti, které lze charakterizovat jako:

(1) Bezpečnost

- rozdílné fyzikální skupenství pohonných hmot HRM vylučují v principu možnost explozivní reakce. V porovnání s RM na TPH je výroba, skladování a manipulace s TP u HRM absolutně bezpečné a v porovnání s RM na KPH není nutná dodatečná manipulace s kapalným palivem.

Obecně kritická část pohonu jako zážeh, je u HRM méně kritický než u RM na KPH a TPH(mimo monopropellentů).

(2) Nízká citlivost

- **trhlinky** v tuhém palivu prakticky nemají vliv na změnu funkce a na parametry HRM v důsledku působení hydrodynamických účinků vstřikovaného okysličovadla, proudů par a horkých plynů (civilní i vojenské účely – hrubé zacházení, průstřely, oheň).
- HRM pracuje i při **nízkých tlacích** ve spalovací komoře, což umožňuje značně zjednodušit, odlehčit konstrukci („kašlání“ RM TPH při nízkých tlacích).
- **Počáteční teplota** náplně tuhé pohonné hmoty prakticky neovlivňuje rychlost hoření, t.j. pracovní charakteristiky HRM (tlak, doba funkce a tah) jsou téměř nezávislé na změně atmosférické teploty.

(3) Spolehlivost

- konstrukční uspořádání HRM je jednodušší (není zapotřebí systémů přívodu, dávkování, automatiky a regulace pro jednu složku pohonné látky), což příznivě ovlivňuje provoz, spolehlivost i výrobní náklady.

(4) Ovládání

- HRM může být **restartovatelný**, dá se kdykoliv **vypnout** a tah motoru lze **regulovat** pouze škrcením přívodu kapalné složky (vojenské využití).
V případě **přerušení letu** není nutné raketu nechat explodovat, ale stačí uzavřít přívod např. okysličovadla.

(5) Univerzálnost HPH

- Výběr látek, které mohou být použity jako složky HPH je velmi široký. Prakticky lze použít všech paliv i oksličovadel, jež se používají jak v RM na KPH, tak i v RM na TPH. Navíc, jako paliva lze využít látek, které nelze využít jako pojiva u RM TPH (dřevo, papír, vosk, termoplasty apod.).

Lze používat plniva, které jsou při výrobě RM na TPH a RM na KPH nepoužitelné (sensitivita s tuhým oksličovadlem při výrobě, práškové kovy)

(6) Flexibilita při návrhu pohonu

– možnosti variace koncepcí HRM jsou velice široké:

- Urychlovací a stupně raket
- Orbitální, manévrovací stupně
- Využití odpadu pro generování pohonu
- Generátory plynů pro výtlačné systémy (pro RM na KPH a HRM samotné)
- Multifunkční, spalitelné struktury

Využití různých odpadů jako paliva pro RM

- V 60-tých letech byli úvahy pro využití starých pneumatik pro TP HRM (guma na bázi HTPB) – technologie pro recyklaci však byla dražší, než se předpokládalo
- NASA pracovala na studii využití různého odpadu pro jeho dalšího využití v RM (papír, tkaniny, obaly, nespotřebované potraviny a dokonce lidský odpad). V prvopočátcích pracovali na RM TPH, který se však ukázal velice nebezpečný – proto dál pracovali na principu HRM (okysličovadlo kyslík a N_2O_4) – zkoušeli 2-4% dodatečného použití pojiv jako PE, epoxidů a HTPB a dosáhly slibných výsledků.

(7) Enviromentální zátěž

– při použití např. LOX a HTPB budou zplodiny hoření podobné, jak u kombinace kapalného kyslíku s kerosenem. Naproti tomu bude při přerušení letu HRM dané kombinace méně zatěžovat životní prostředí, než u RM na KPH (inertní blok TP versus rozlité palivo).

Vůči RM na TPH se netvoří ve spalínách HCl a oxidy hliníku, a HRM jsou více přijatelné i pro testování na zemi (vůči motorům na koloidní TPH), protože méně zatěžují životní prostředí(nitrosloučeniny).

(8) Nízká cena

– protože hlavní charakteristikou hybridu je neexplozivnost, daná skutečnost má významný vliv pro zjednodušení technologie výroby, transportu, manipulace a exploatace daného pohonu.

Neméně významná cenová položka je vývoj daného pohonu, který u HRM bude výrazně nižší, než u vývoje jiných druhů RM.

Nevýhody HRM

- (1) **Nízká rychlost hoření TP** – rychlost uhořívání TP u HRM je zhruba řádově nižší, než u RM na TPH – z toho vyplývá nutnost použití větší plochy hoření.
- (2) **Nízké zaplnění spalovací komory palivem** – je to důsledek nízké rychlosti hoření TP, nutnost použití tzv. předkomory a dohořívací komory
- (3) **Zbytky TP** – jsou důsledkem zvolené geometrie a nerovnoměrného vyhoření tuhé složky pohonné látky po obvodu a délce náplně, vyvolané nerovnoměrným rozdělením kapalně složky po celém ohořívajícím povrchu a dalšími vlivy. Dále, kvůli možné blokaci kritického průřezu trysky zbytkovou konstrukcí náplně je nutné danou náplň nechat nevyhořet úplně. Zvyšují tzv. mrtvou zátěž o cca 4-10% hmotnosti TP.

(4) Změna směšovacího poměru během činnosti

HRM – během činnosti HRM se zvětšuje plocha hoření TP a zároveň zmenšuje rychlost hoření daného paliva – tento proces není kompenzován a přináší změnu pracovních charakteristik – pokles tlaku a měrného impulsu.

U motorů na TPH a KPH daný problém neexistuje.

(5) **Neúplnost spalování** - protože směšovací poměr je určen volbou geometrie spalovacího prostoru HRM, zároveň proces hoření probíhá v makroměřítku v mezní vrstvě (efekt měřítka a proudového pole) – výsledkem je neúplné spalování daných PH.

(6) Nízkofrekvenční (neakustické) kmity –

Neakustické, nízkofrekvenční pulsace tlaku ve spalovací komoře, čímž daná pohonná jednotka je nadměrně zatěžována vibracemi a způsobuje rozdíl vypočtených a skutečných hodnot.

Výhody HRM vůči RM na TPH - ALE... I.

Na první pohled -	...Ale...
Mechanické vlastnosti tuhé náplně paliva u HRM jsou obecně lepší než u náplní TPH (platí to pouze u náplní s polymerní vazbou bez plnidel).	Kvůli nižší rychlosti hoření TP u HRM bude však tato výhoda méně významná – při použití vícekanálových soustav bude problém se zbytkovou pevností TP.
Na rozdíl od RM TPH, HRM poskytuje obecně vyšší specifický impuls, než RM TPH a blíží se k RM KPH.	Tato výhoda však platí při dodržení optimálního směšovacího poměru po celou dobu funkce motoru, zároveň při dodržení vyšší účinnosti spalování.
HRM pracuje i při nízkých tlacích ve spalovací komoře, což umožňuje značně zjednodušit, odlehčit konstrukci („kašlán“ RM TPH při nízkých tlacích).	Daná výhoda je redukována kvůli velice nízké účinnosti hoření při nižších tlacích (spolu s nestabilitami proudového pole).

Na první pohled...	...Ale...
Zvolená kapalná složka pohonné látky umožňuje regenerativní chlazení trysky (např. LOX, N₂O, H₂O₂, IRFNA atd.) a tím i prodloužení doby funkce a životnosti HRM. Náplň tuhé složky pohonné látky navíc chrání stěnu spalovací komory před ohřevem.	Daná výhoda je více teoretická – okysličovadla obecně mají nižší tepelnou kapacitu, než paliva a navíc působí korozivně. Kvůli nedokonalému spalování dochází k nadměrnému opotřebování kritického průřezu trysky.
HRM poskytuje možnost regulace tahu v širokém rozsahu (8-100%) – změny tahu se dosahuje nejčastěji změnou vstřikovaného množství okysličovadla, v případě předem požadovaných tahových charakteristik se vhodně tvaruje ohořívající povrch náplně tuhého paliva.	Při škrcení HRM dochází k dramatické změně O/P při vzniku různých přechodových stavů – výsledkem je nižší měrný impuls.

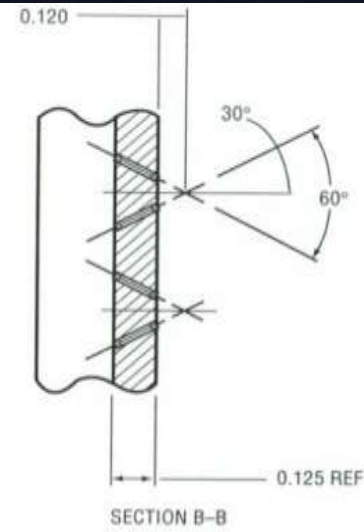
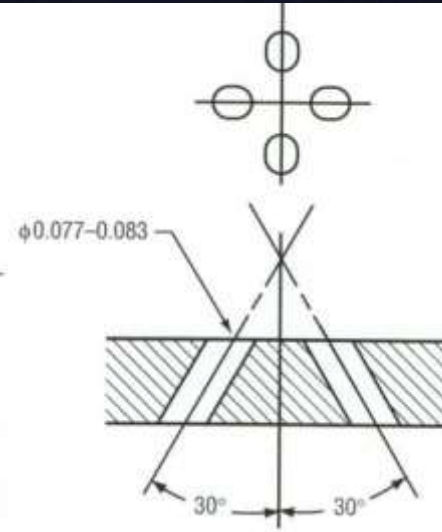
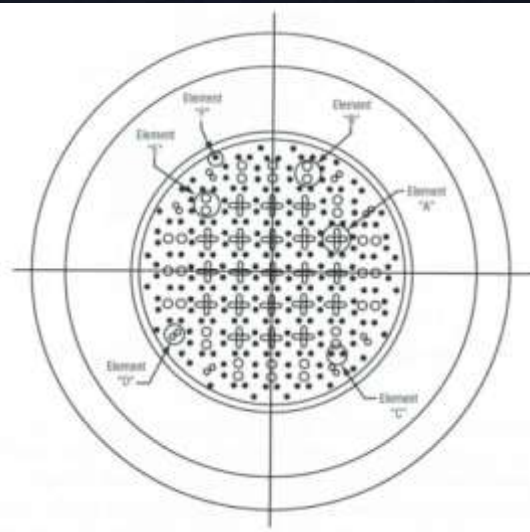
Výběr okysličovadla

- Z hlediska bezpečnosti a dostupnosti máme pouze několik možností:
 - kapalný kyslík (LOX) – levné, ale kryogenní
 - oxid dusný (N_2O) – dražší, ale použitelné při pokojové teplotě (potenciální problém ohledem možné dekompozice plynu)
 - Nytrox (směs N_2O s LOX) – ve vývoji
 - H_2O_2 a HAN (Hydroxylamóniumnitrát – hlavně vojenské využití)

Požadavky na vstřikovač okysličovadla

- rovnoměrné vyhoření tuhé náplně paliva v axiálním i radiálním směru
- maximální rozprášení kapalného okysličovadla při nízkém tlakovém spádu
- zabezpečení stability hoření při celé funkci HRM
- technologická nenáročnost výroby a nízká hmotnost

Příklady použití vstřikovačů pro HRM (Program HPDP) - přímé vstřikovače



Výhody

- ☐ relativní jednoduchost
- ☐ nižší energetické ztráty
- ☐ vznik recirkulační zóny -
- vyšší stabilita hoření

Nevýhody

- ☐ nižší rychlost hoření TP
- ☐ protiklad efektivního
rozprašování a nízkého
tlakového spádu

Příklady použití vstřikovačů pro HRM

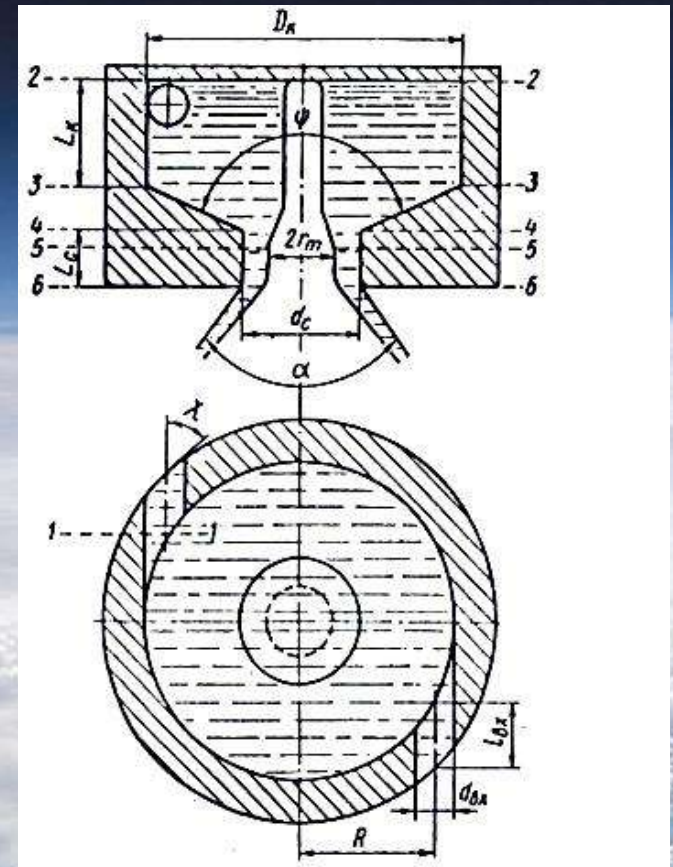
- odstředivé vstřikovače

Výhody

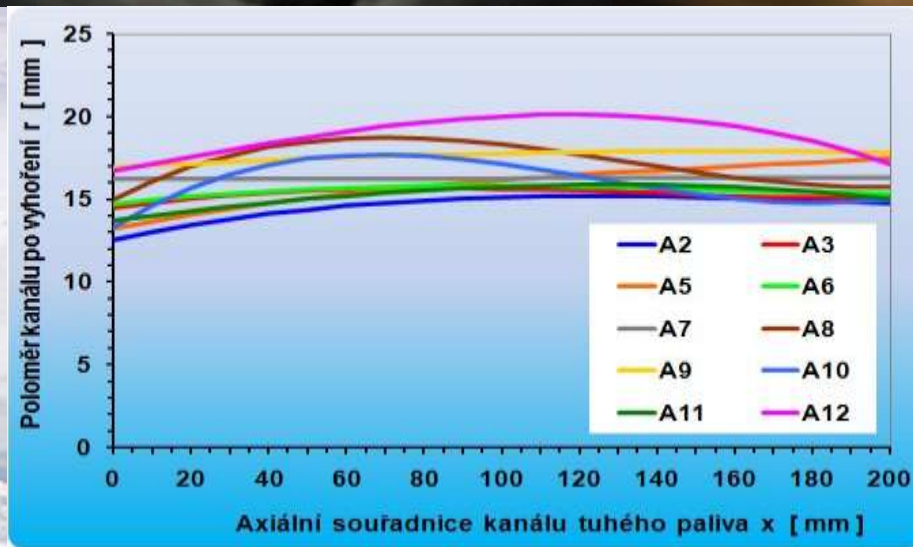
- V porovnání s axiálním vstřikovačem bude okysličovadlo delší dobu v kontaktu s povrchem tuhého paliva – vyšší regrese paliva

Nevýhody

- Na úhel rozstřikování α a další chování má vliv i tlakový spád (v HRM se mění)
- Tlak v plynovém jádru bude kritická veličina u kryogenů (N_2O , LOX) – vření kapaliny
- lze očekávat vyšší nerovnoměrnost vyhoření tuhé náplně v axiálním směru



Vliv kvality rozprašování okysličovadla na rovnoměrnost vyhoření tuhého voskového paliva



Výběr a konfigurace tuhého paliva pro HRM

Důležité charakteristiky

- Hustota tuhého paliva
- Termochemické charakteristiky dané kombinací, směšovací poměr O/P
- Rychlost hoření tuhého paliva a jeho mechanické vlastnosti
- Konfigurace TP

Hustota tuhého paliva

- Může kompenzovat u HRM nižší objemové využití spalovací komory (předkomora, vnitřní kanály hoření a dohořívací komora)
- Vůči RM TPH ($\sim 1850 \text{ kgm}^{-3}$) má běžné tuhé palivo HRM zhruba poloviční hodnotu
- Použití různých kovových přísad, jako Al a Mg prášků, jejich hydridy - AlH_3 , LiAlH_4 atd., dále Zn a W
- Použití přísadků tuhých okysličovadel
- Různá jiná plniva (melamin, Escorez, glutamanová sůl, apod.)

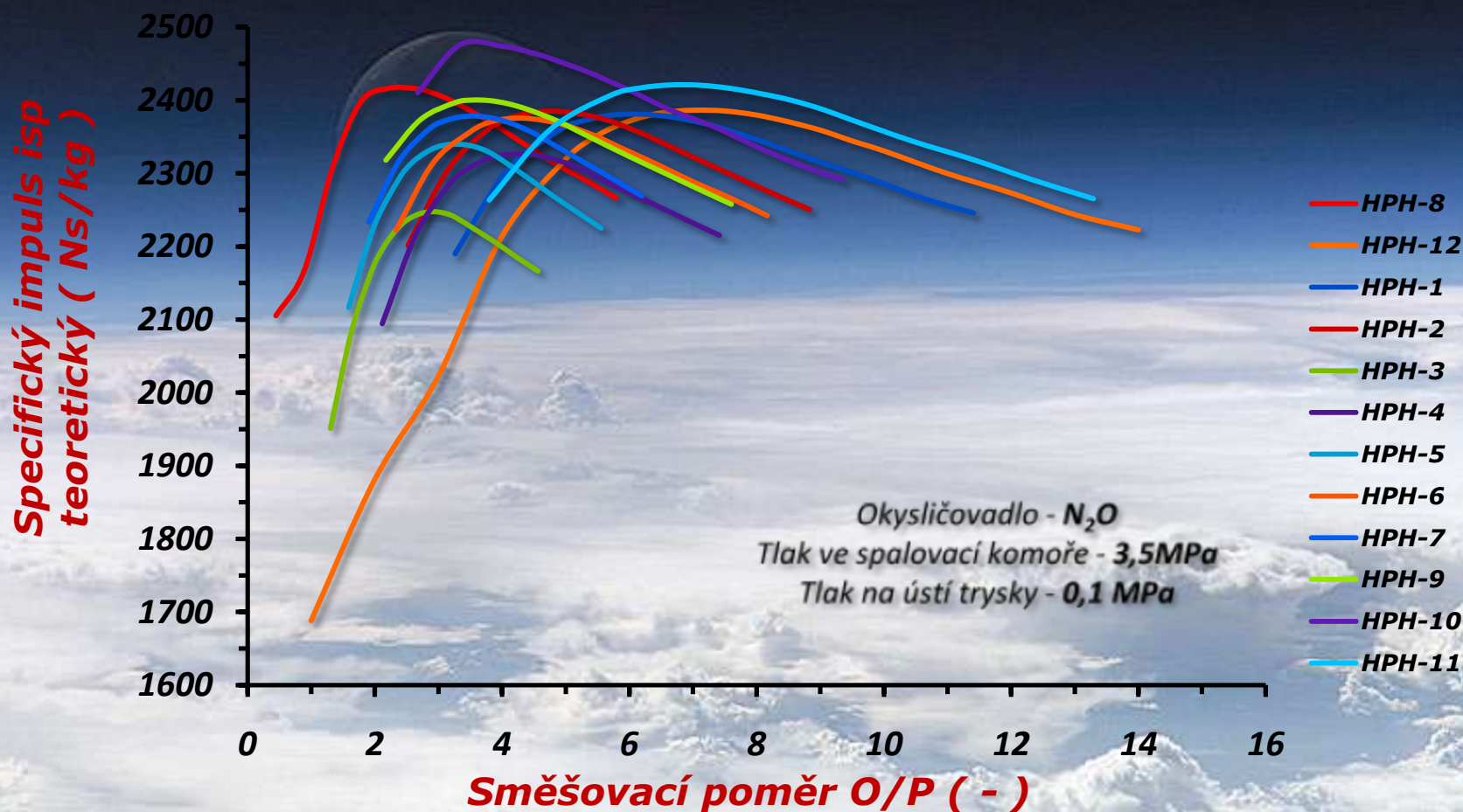
Charakteristiky některých plnidel pro TP

Název plnidla	Chemický vzorec	Hustota ρ [kgm ⁻³]	Mólová Hmotnost M [gmol ⁻¹]	Slučovací teplo $\Delta H_{\text{sluč.298,16}}$ [kJmol ⁻¹]	Teplota tavení T_t [°C]
Hexametylentetramin	C ₆ H ₁₂ N ₄	1300	140,19	+124.1	265-295
Dikyandiamid 1-kyanoguanidin	C ₂ H ₄ N ₄	1400	84	+29,6	211
Akrylonitril (PAN)	C ₃ H ₃ N	1180	53	+151,34	-
Melamin	C ₃ H ₆ N ₆	1570	126	-71,723	-
Escorez 5320	C _{7,319} H _{11,059}	1000- 1050	98,9	-130,026	122
Glutamanová sůl	C ₅ H ₈ O ₄	1429	-	-	97,5
Antracén	C ₁₄ H ₁₀	1233	-	-	216,1
Naftalén	C ₁₀ H ₈	1049	-	-	80,3
Kyselina steárová	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	1010	-	-	70

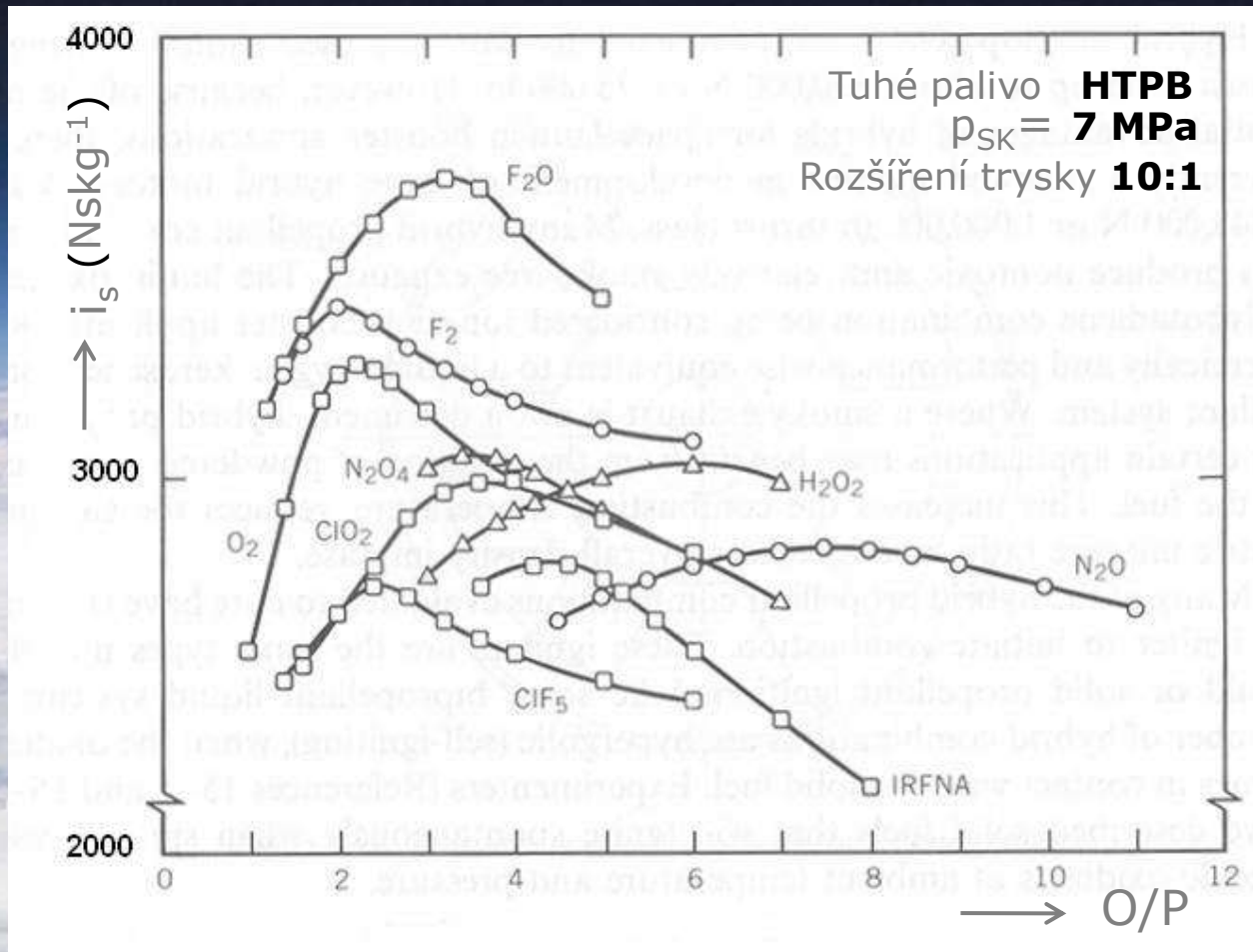
Použité směsi tuhého paliva v kombinaci s N_2O pro další termochemické výpočty

- HTPB (HPH-1)
- HTPB + hexametylnitrát (HPH -2)
- Celulosa (papír) (HPH-3)
- PMMA (HPH-4)
- HTPB + GAT (HPH-5)
- HTPB + AP (HPH-6)
- HTPB + AP + hexametylnitrát (HPH-7)
- HTPB + AP + hexametylnitrát + Al (HPH-8)
- HTPB + AP + hexametylnitrát + Al + Mg (HPH-9)
- Parafín + Al (HPH-10)
- Parafín (HPH-11)
- Voskové palivo (mikrovosk a parafínová báze) (HPH-12)

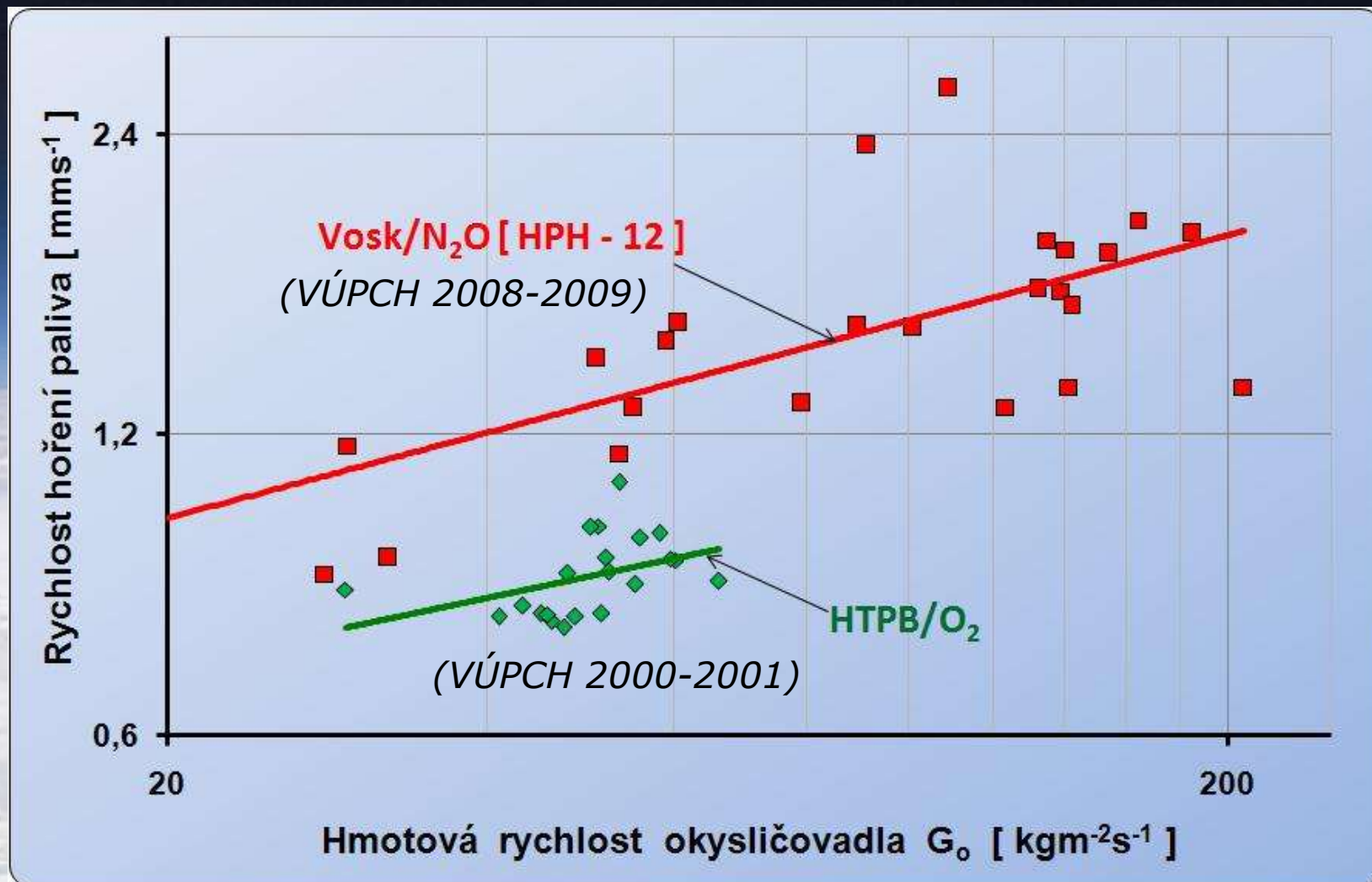
Termochemické charakteristiky různých kombinací, směšovací poměr O/P I.



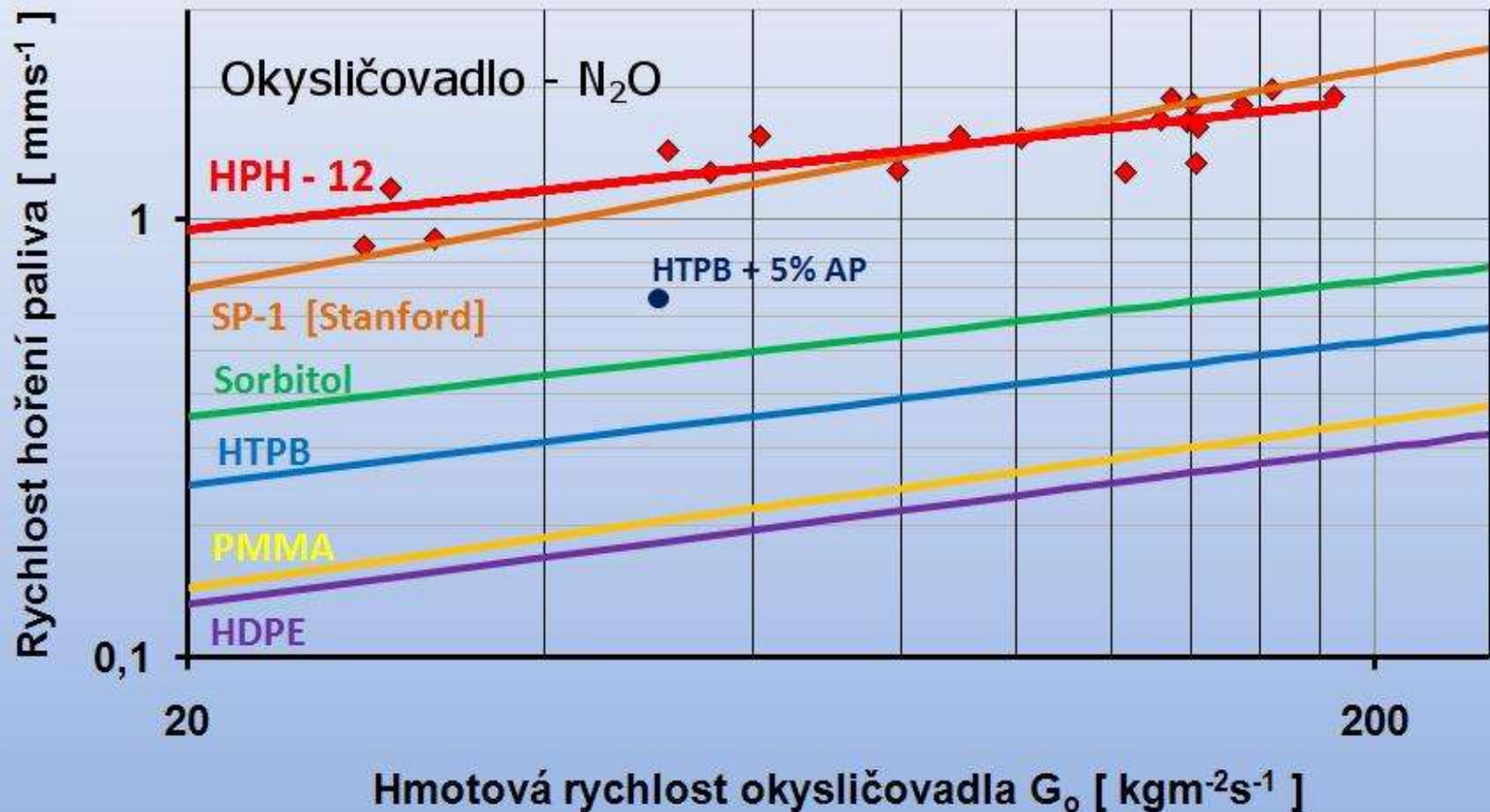
Termochemické charakteristiky různých kombinací, směšovací poměr O/P II.



Rychlost hoření TP



Rychlost hoření dalších TP

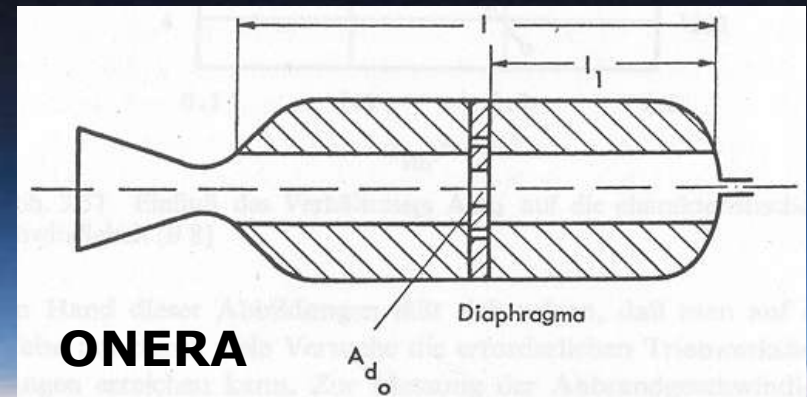
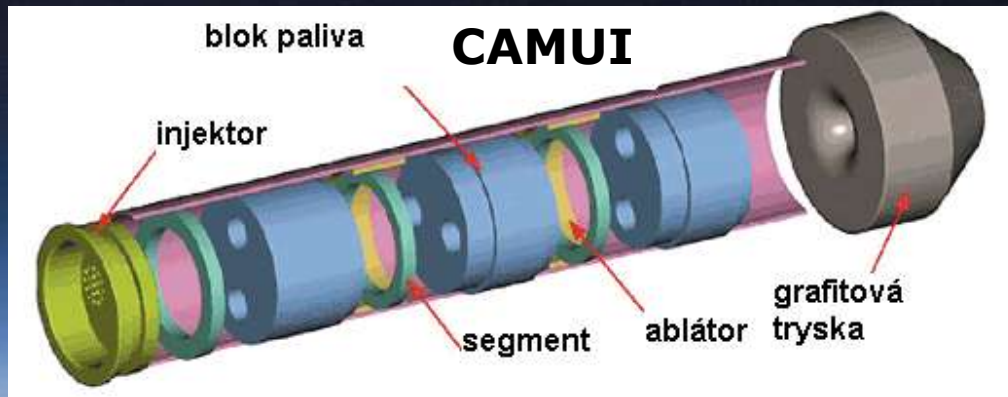


Teze: „čím vyšší rychlost hoření TP,
tím budou horší mechanické vlastnosti daného paliva

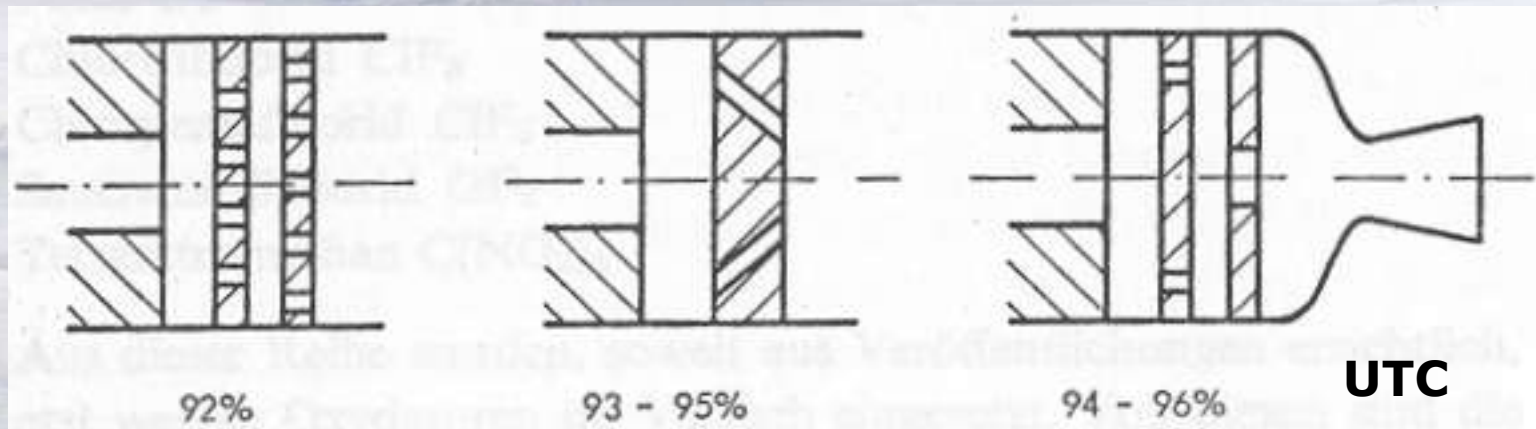
Možnosti zvýšení rychlosti hoření TP

- Turbulizace proudu plynů a par nad povrchem tuhého paliva;
- Změna charakteru přívodu okysličovadla;
- Použití různých energetických přísad;
- Přísady práškových kovů;
- Směsné hybridní tuhé pohonné hmoty a plynové generátory;
- Kryogenní hybridní raketové motory;
- HRM nekryogenní, se zkapalnitelným tuhým palivem.

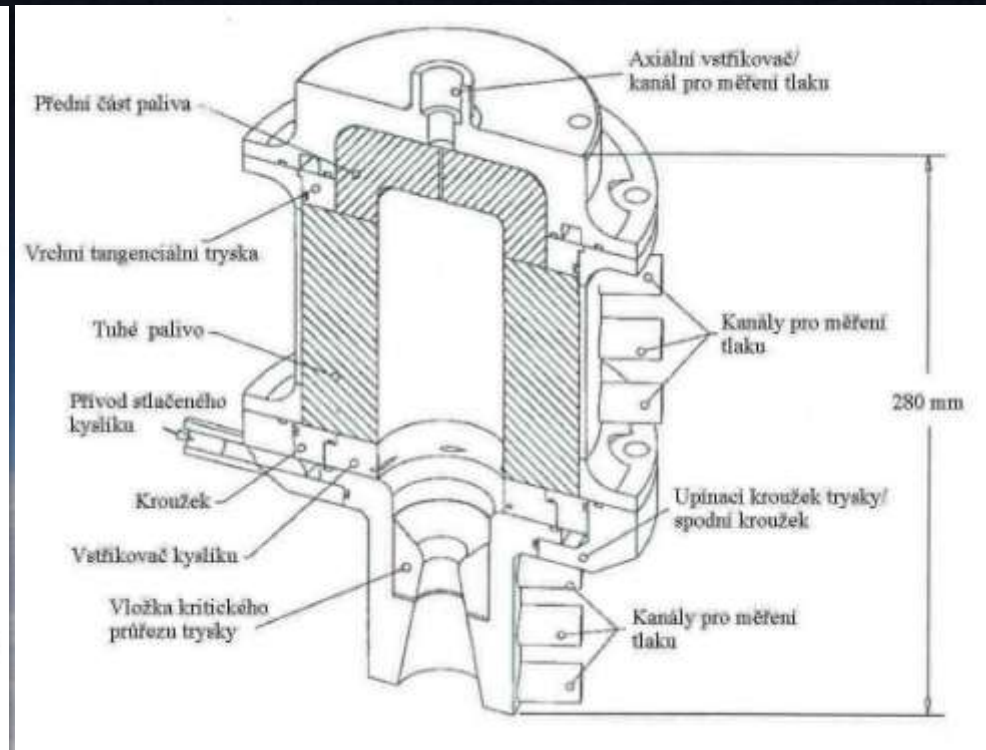
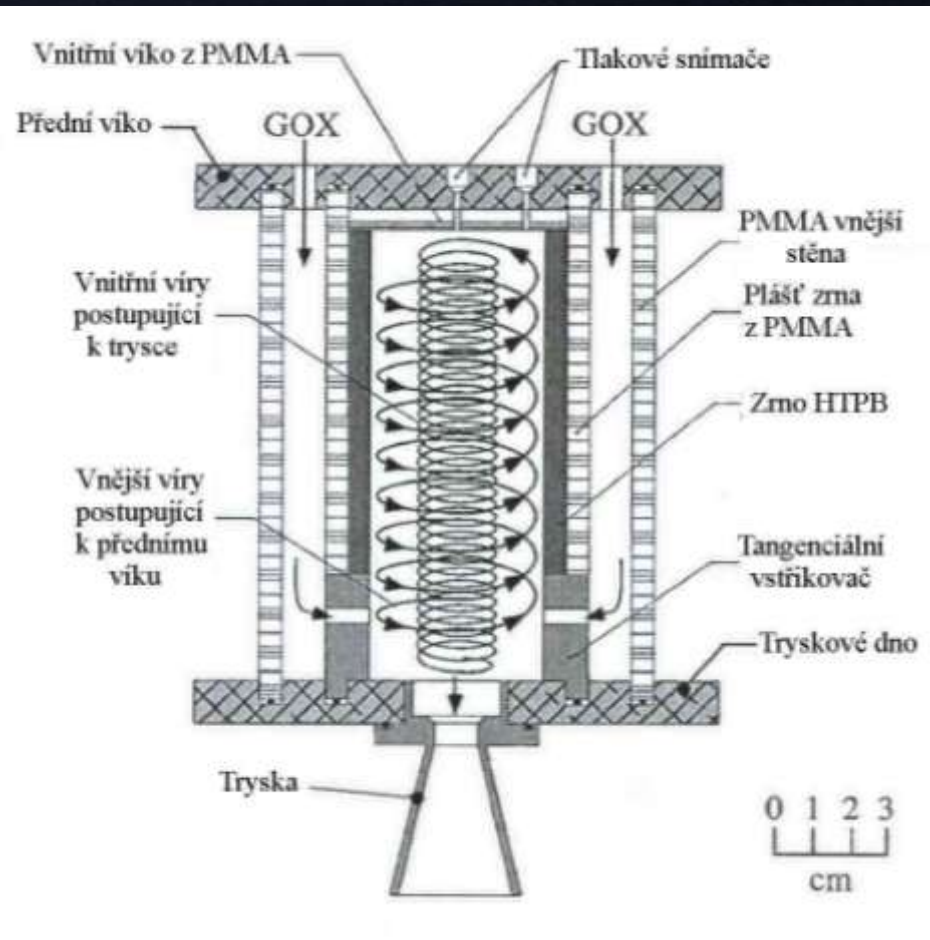
Turbulizace proudu plynů a par nad povrchem tuhého paliva



Zároveň se zlepšuje **účinnost hoření**



Změna charakteru přívodu okysličovadla



Řez TP po vyhoření dané náplně

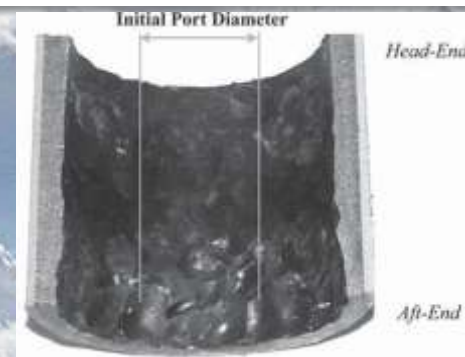
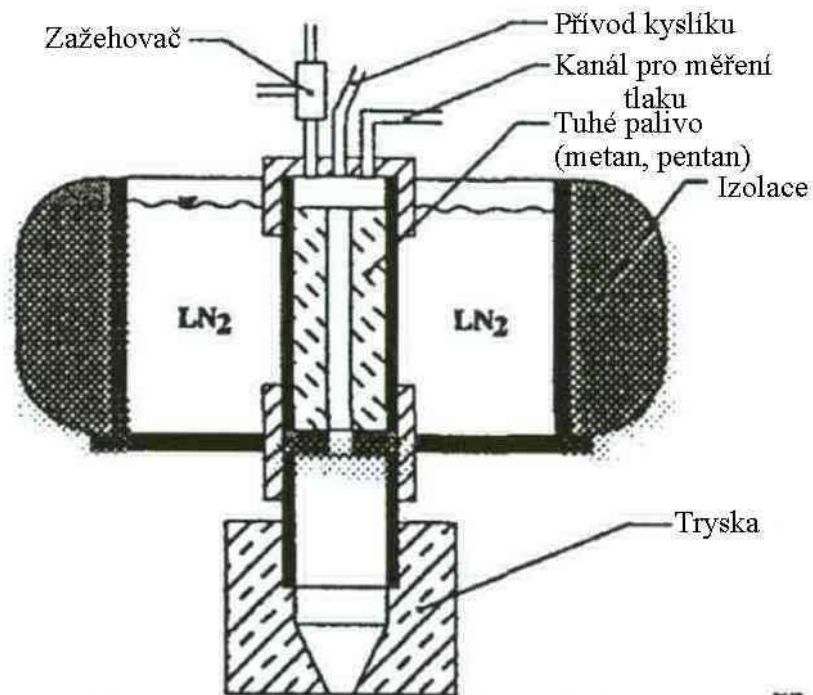
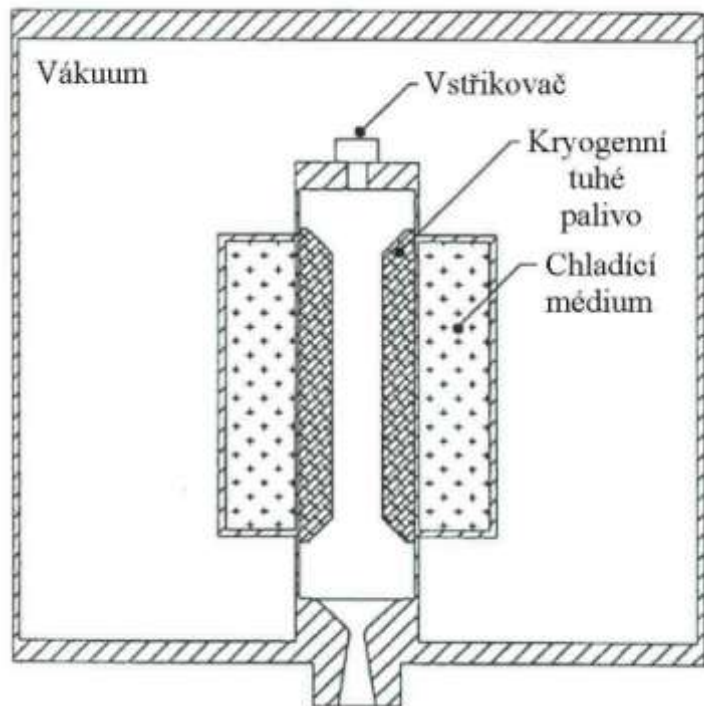


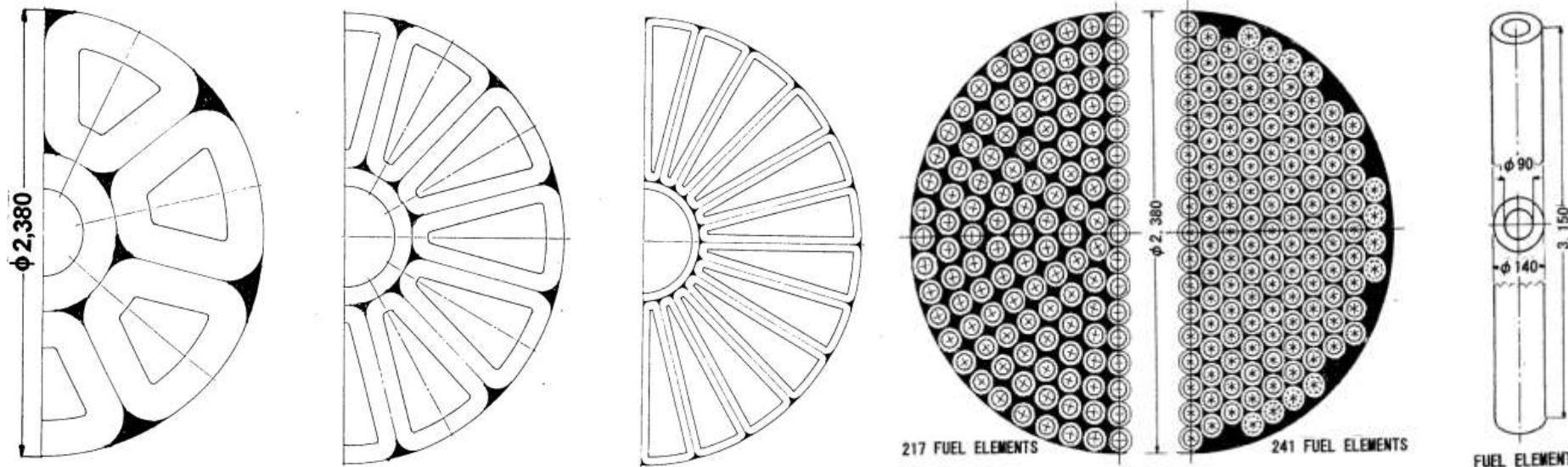
Schéma zkušebního HRM VH-100 firmy ORBITEC

Kryogenní hybridní raketové motory



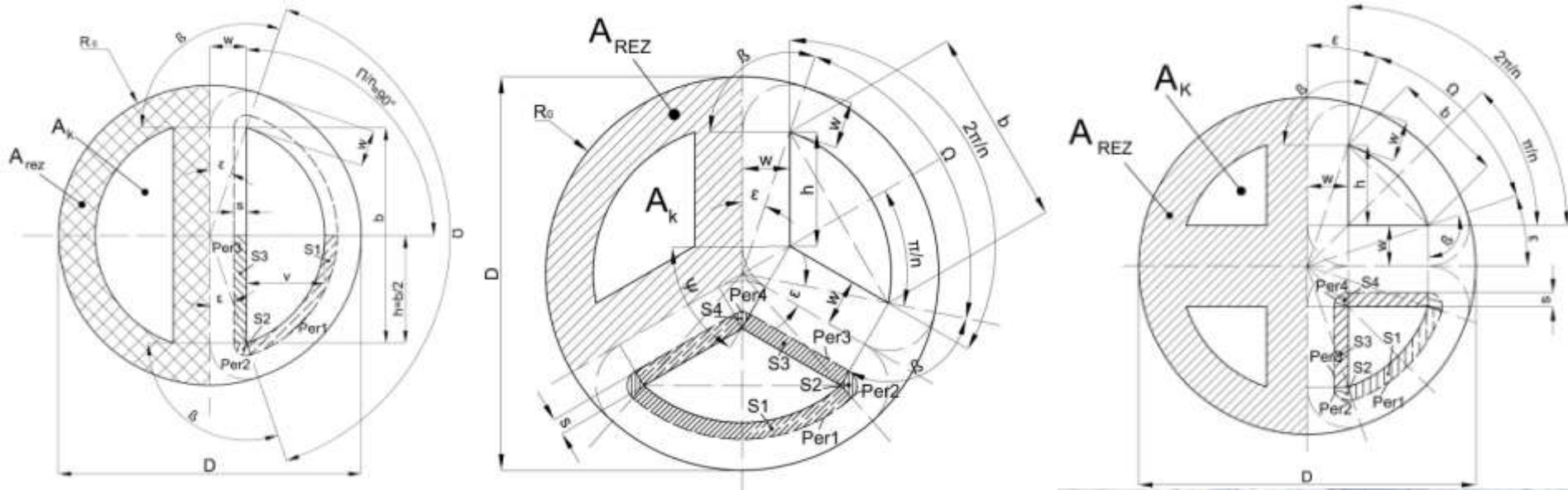
- rychlost hoření se uvádí **20 ÷ 40 krát vyšší**, než u klasického pojetí HRM;
- specifickým impulsem se již podstatně blíží motorům na KPH (LOX/LH₂);
- větší hustota těchto složek (SH₂ má hustotu kolem 87 kgm⁻³, kdežto v kap. fázi má vodík hustotu 70 kgm⁻³, SOX má o 35% vyšší hustotu, než ve stavu kapalném);
- Tuhý metan(SCH₄) s kyslíkem – ISRU aplikace pro planetu Mars (MSR mise)
- HEDM (High Energy Density Matter) – interceptory balistických střel

Vícekanálové axiální tvary TP



- ☐ Problém zbytkové pevnosti TP
- ☐ Problematická technologie výroby
- ☐ Nutnost použití tzv. "předkomory" pro zabezpečení zážehu všech kanálů ve stejném časovém okamžiku
- ☐ Velký průměr spalovací komory
- ☐ Nízké zaplnění spalovací komory

Odvození vztahů pro určení geometrických charakteristik příčných průřezů vícekanálových náplní tuhého paliva



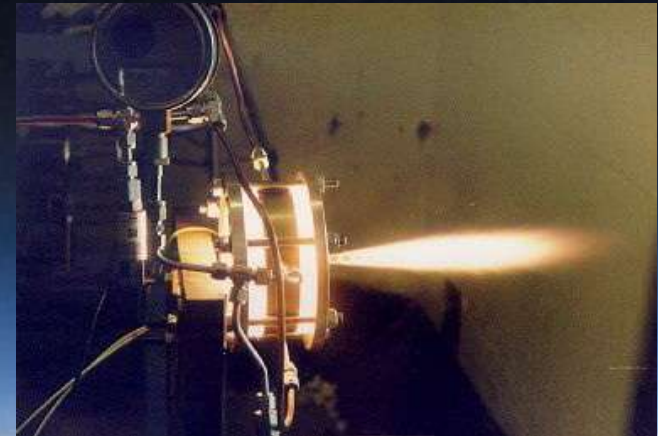
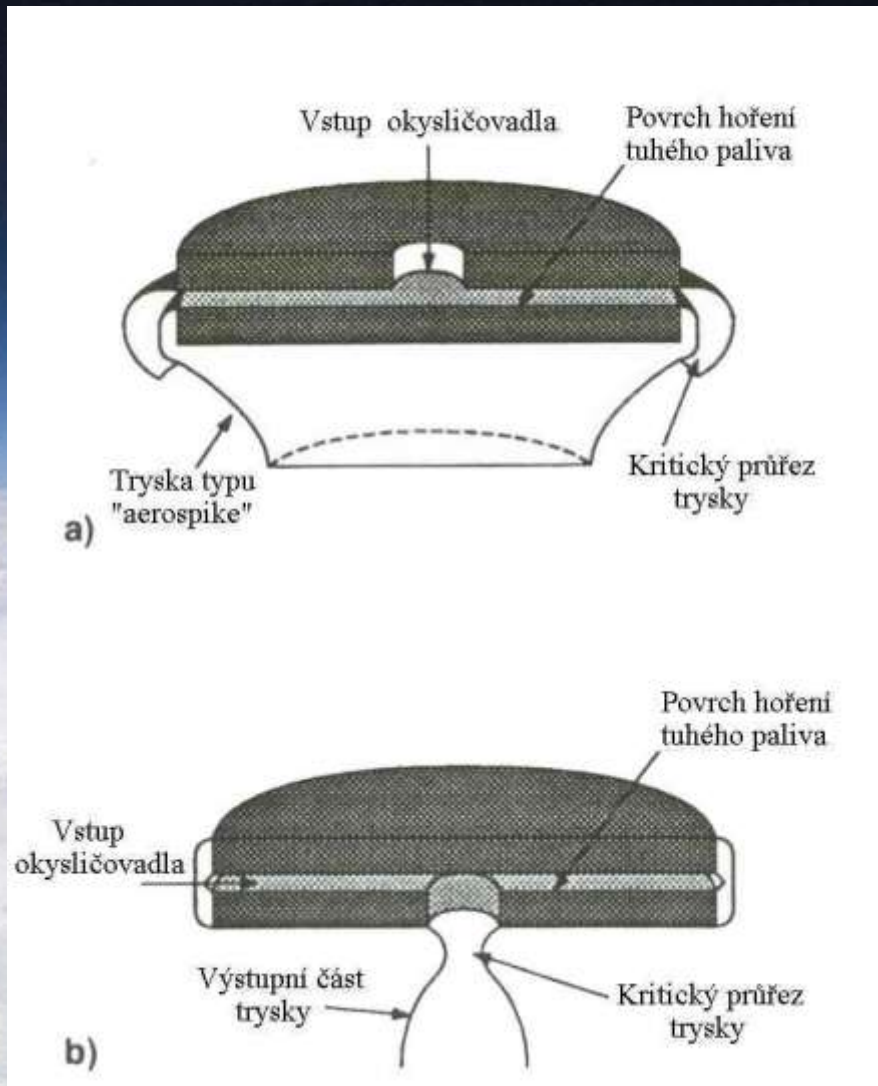
$$Per_{c0} = 2n(R_0 - w) \left[\Omega + \frac{\sin \Omega}{\sin \left[\frac{\pi}{n} \right]} \right]$$

Celkový obvod všech kanálů při $T = 0$ s

$$A_{kc0} = 2n \left\{ \frac{(R_0 - w)[2(R_0 - w)\Omega - b] + b.v}{2} + (R_0 - w)\sin \Omega . h . \cos \theta \right\}$$

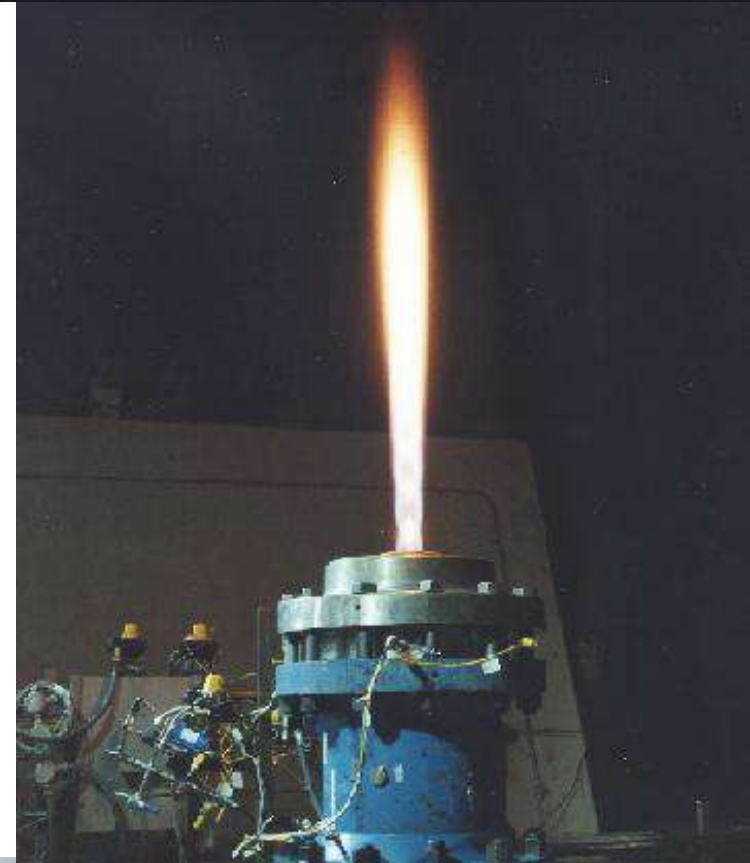
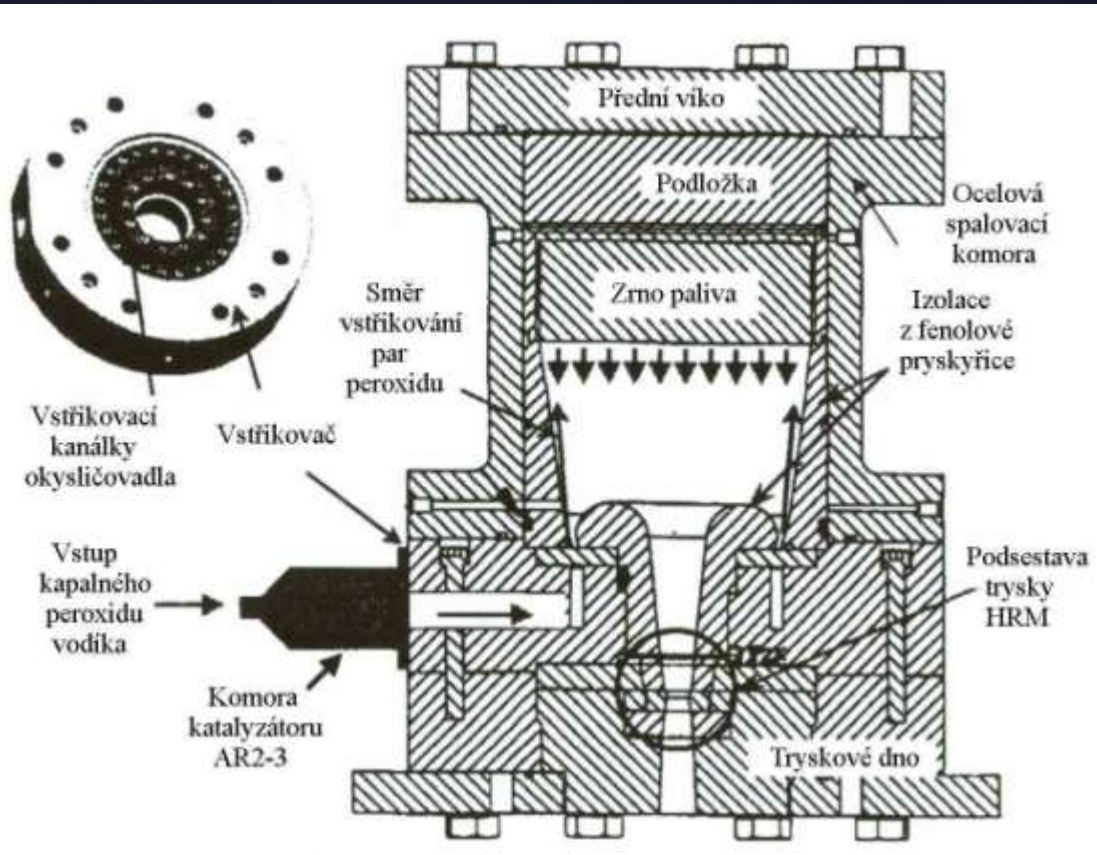
Příčný průřez všech kanálů v čase $T = 0$ s

HRM s radiální náplní TP



- ❑ Výhodné z hlediska nízké stavební výšky
- ❑ Velký stupeň zaplnění motoru palivem
- ❑ TP uhořívá lineárně s časem (na rozdíl od kruhově symetrických náplní)

HRM s čelným hořením TP

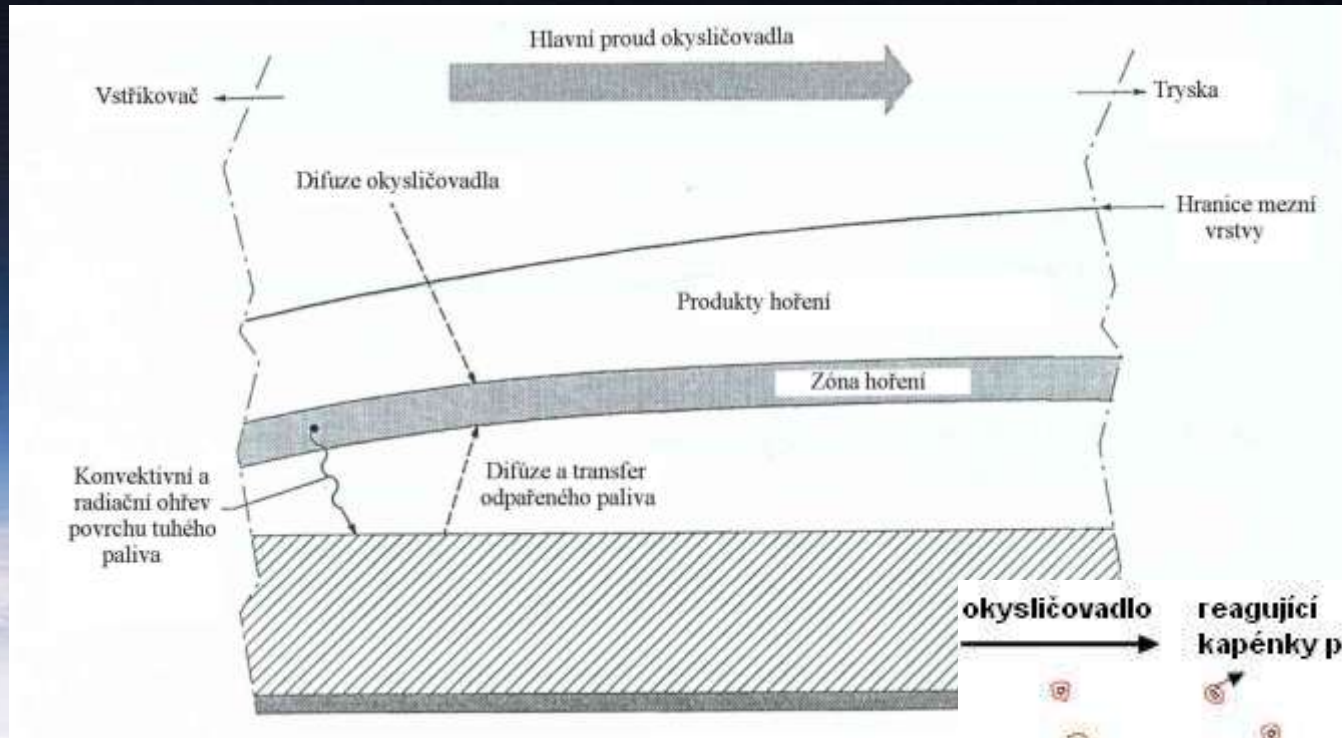


Vnitřní děje v HRM

Slouží ke vysvětlení vzájemné reakce mezi palivem a okysličovadlem – tyto děje lze rozdělit následovně:

- mechanismus rozprašování kapalné složky
- Odpařování kapalné složky a zplynování TP
- Zákon hoření dané HPH
- Vliv měřítka motoru

Zákon hoření HPH



Polymerní TP

**Vosky,
kryogenní
TP**

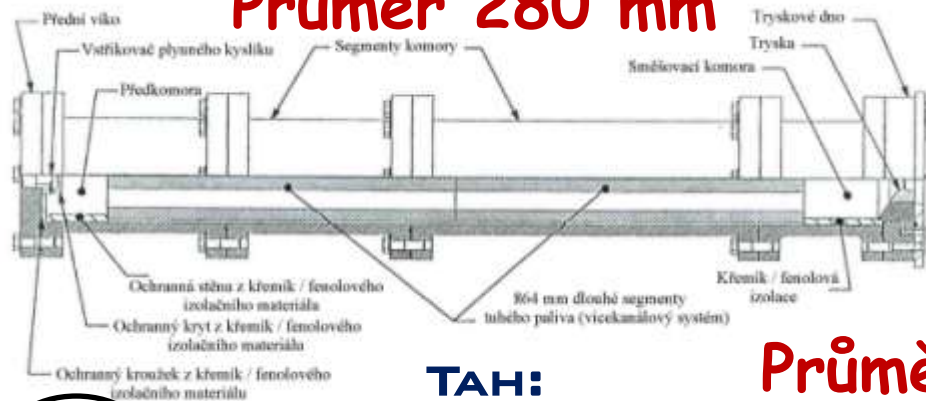
Obecný zákon
hoření má tvar

$$u = aG^v$$



Vliv modelového měřítka na vnitřní děje v HRM

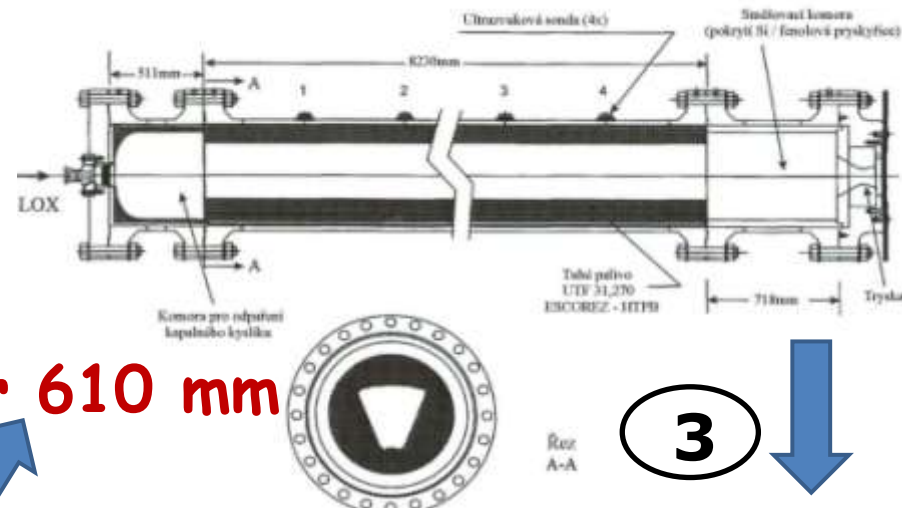
Průměr 280 mm



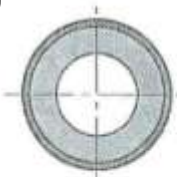
TAH:

6,7-14 kN

Průměr 610 mm



1



Jednoduchý, cylindrický kanál (76 - 127 mm)



Vícekanálová soustava (hydraulický průměr 50,8 mm)

2



Průměr 610 mm

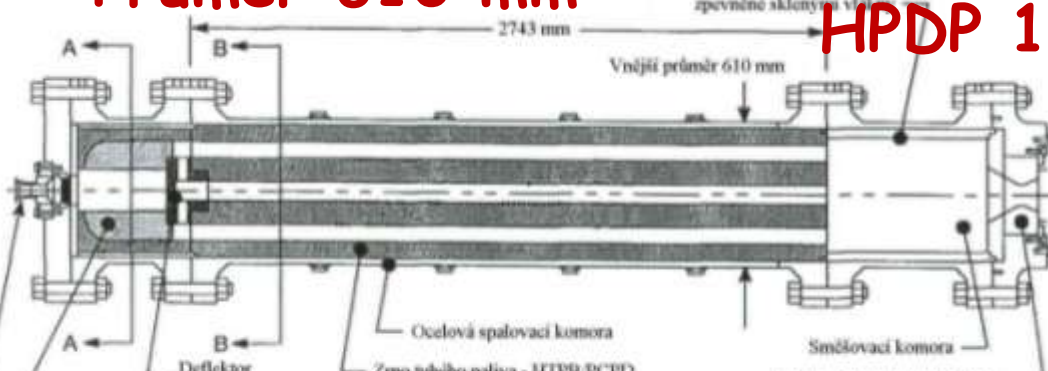
HPDP 1 800 mm



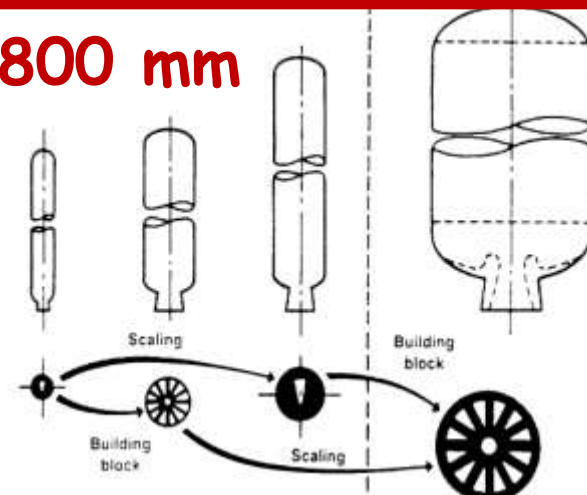
ŘEZ A-A



ŘEZ B-B



TAH: 44,5-178 kN



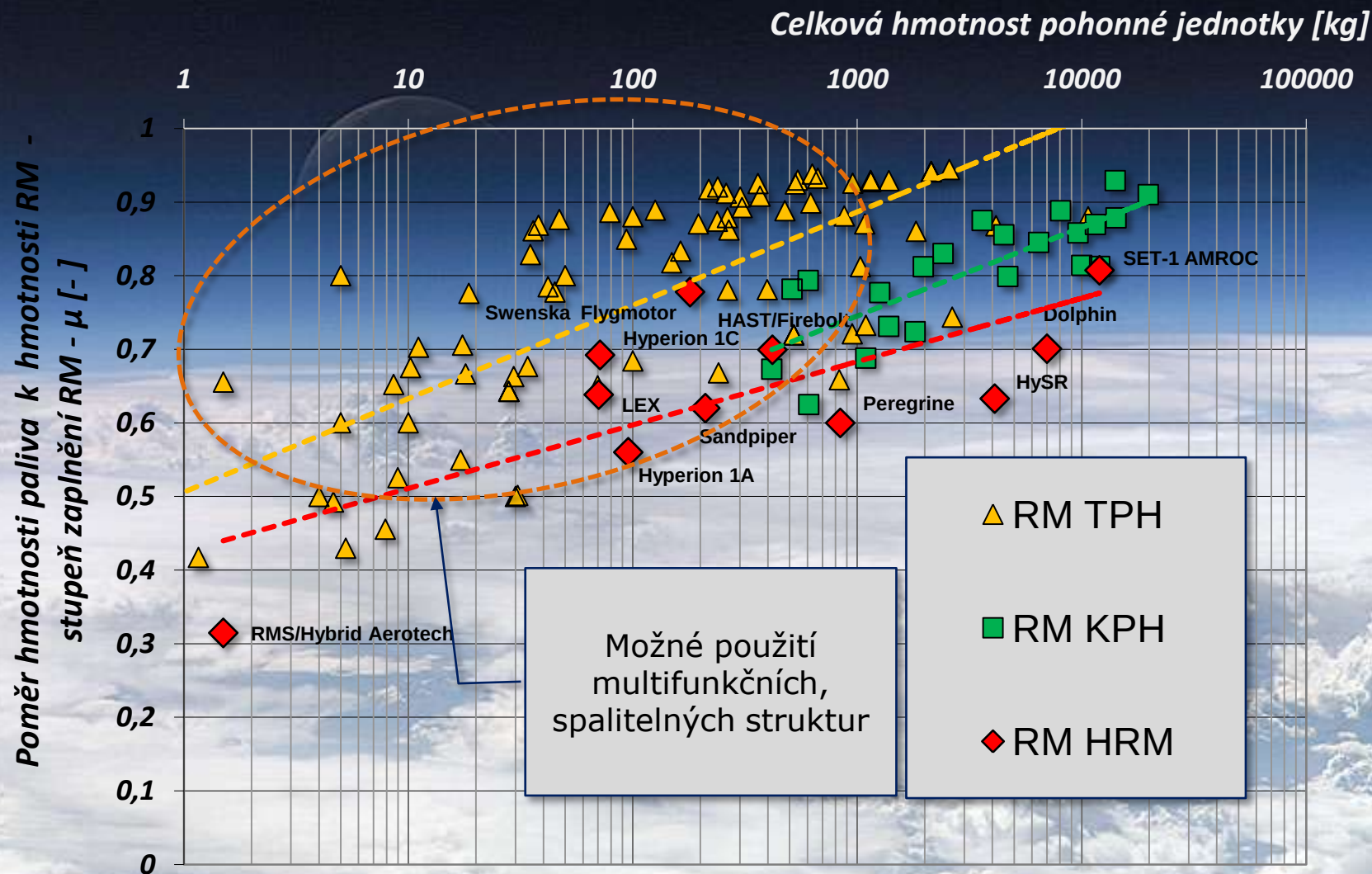
5.12.2010

Csaba Boros - Hybridní raketrové motory - Valmez 2010



Multifunkční, spalitelné struktury

Stupeň zaplnění RM na TPH, KPH a HPH

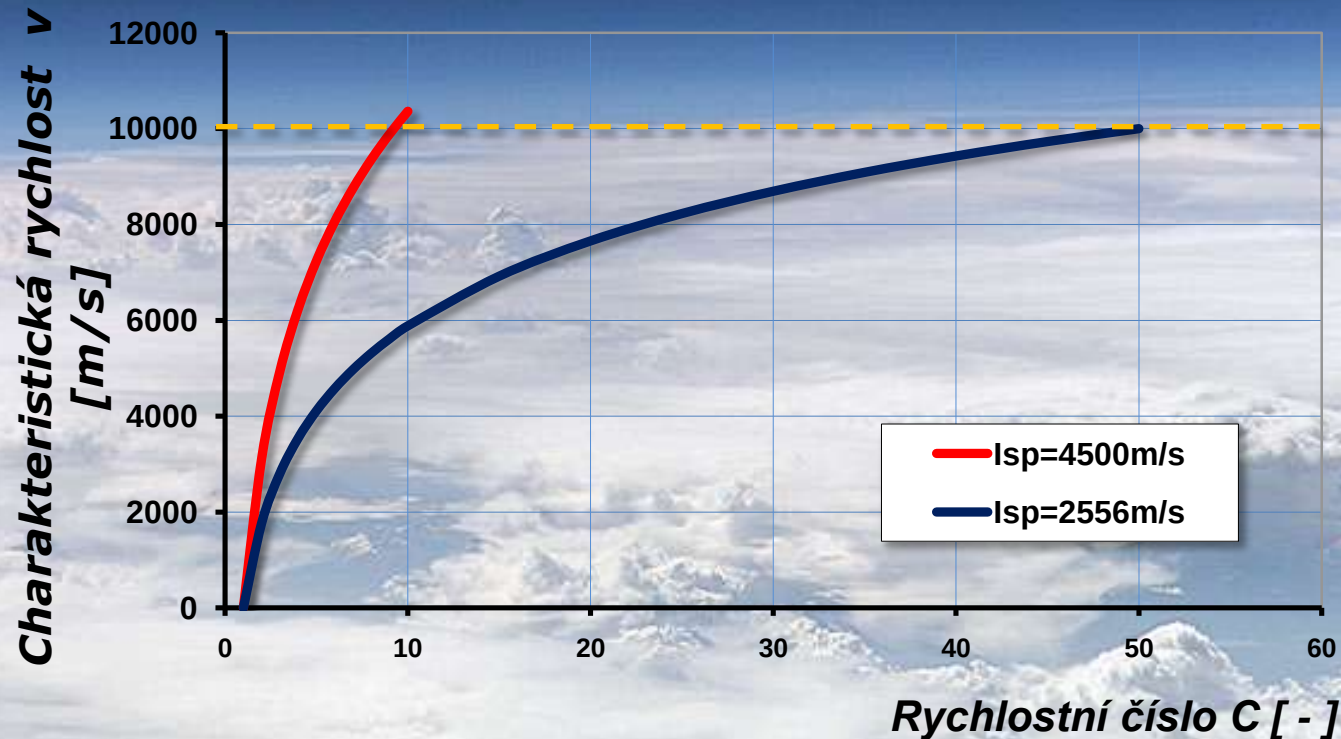


Možnosti zvýšení charakteristické rychlosti rakety

Ciolkovského rovnice

$$v = i_s \cdot \ln C$$

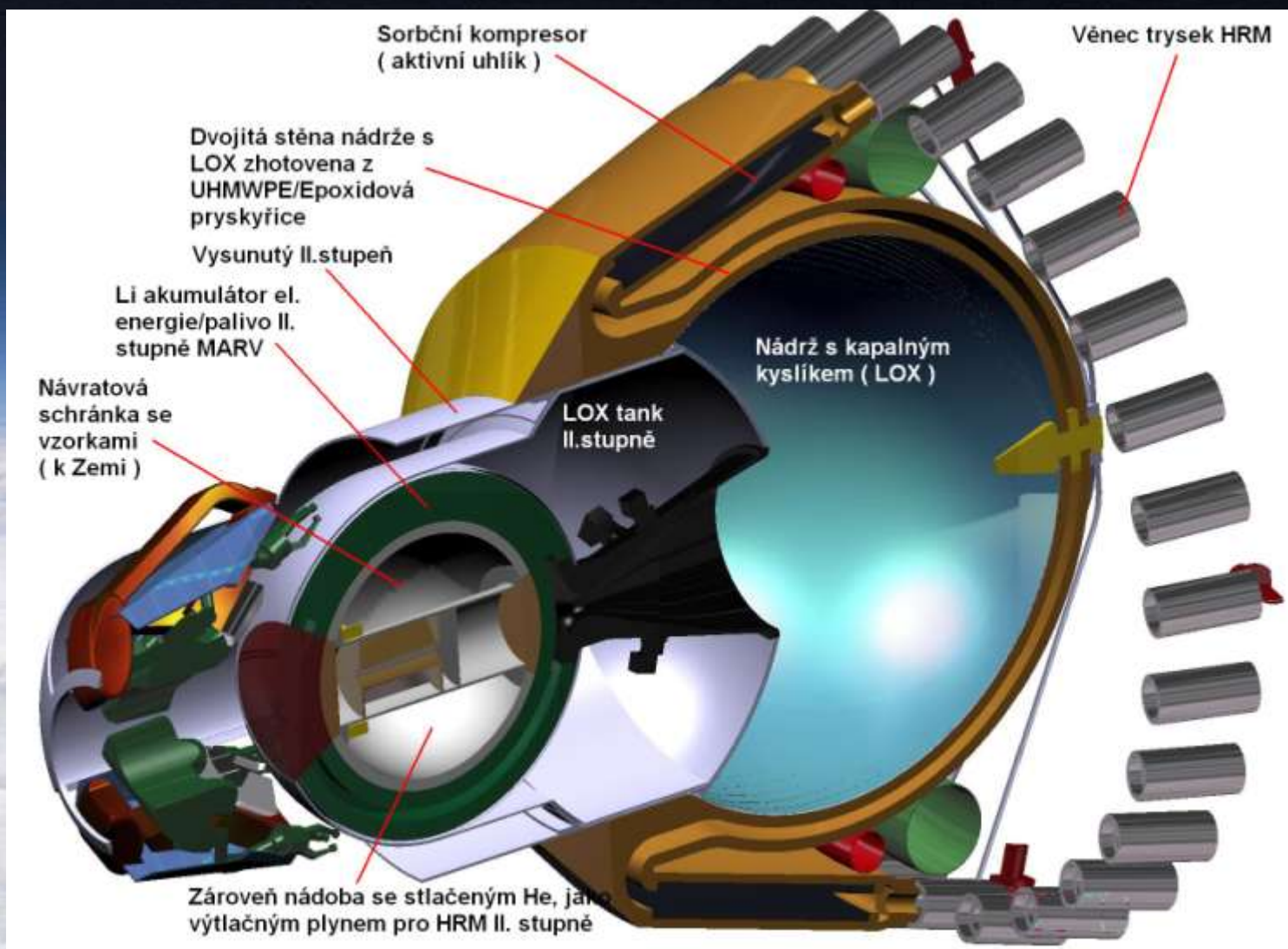
$$C = \frac{M}{K}$$



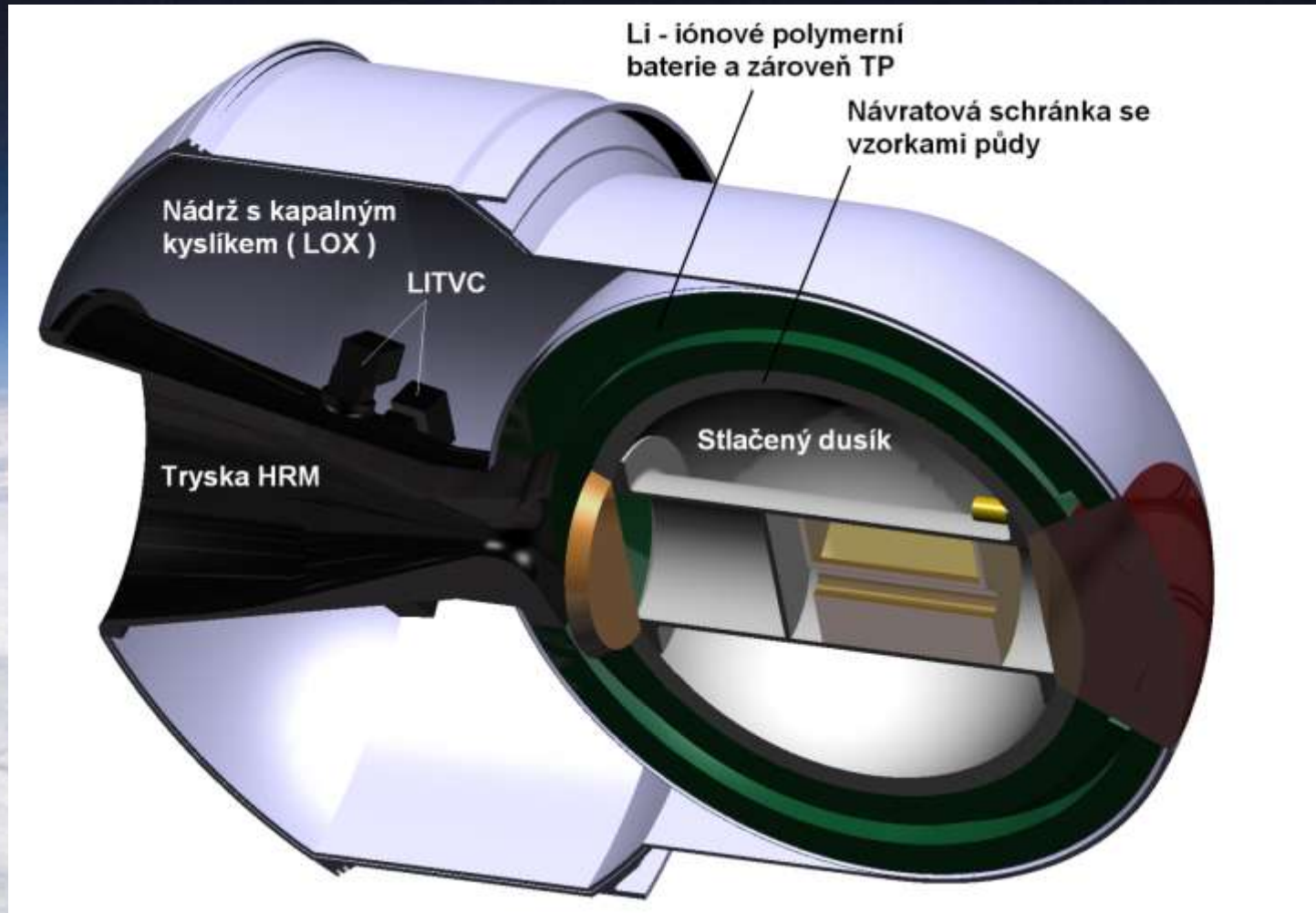
Příklady pro použití spalitelných, multifunkčních struktur

- Adaptéry pro užitečná zatížení (nejvíce namáhány jsou družice při startu – vibrace apod. – pak je daná konstrukce nevyužita)
- Tlakové akumulátory např. pro dopravu kapalných složek do RM
- Energetické zdroje jako tuhé palivo (Li – ionové baterie)
- Hlavňové systémy (pro penetrátory)
- Využití aerodynamických nosných ploch jako TP

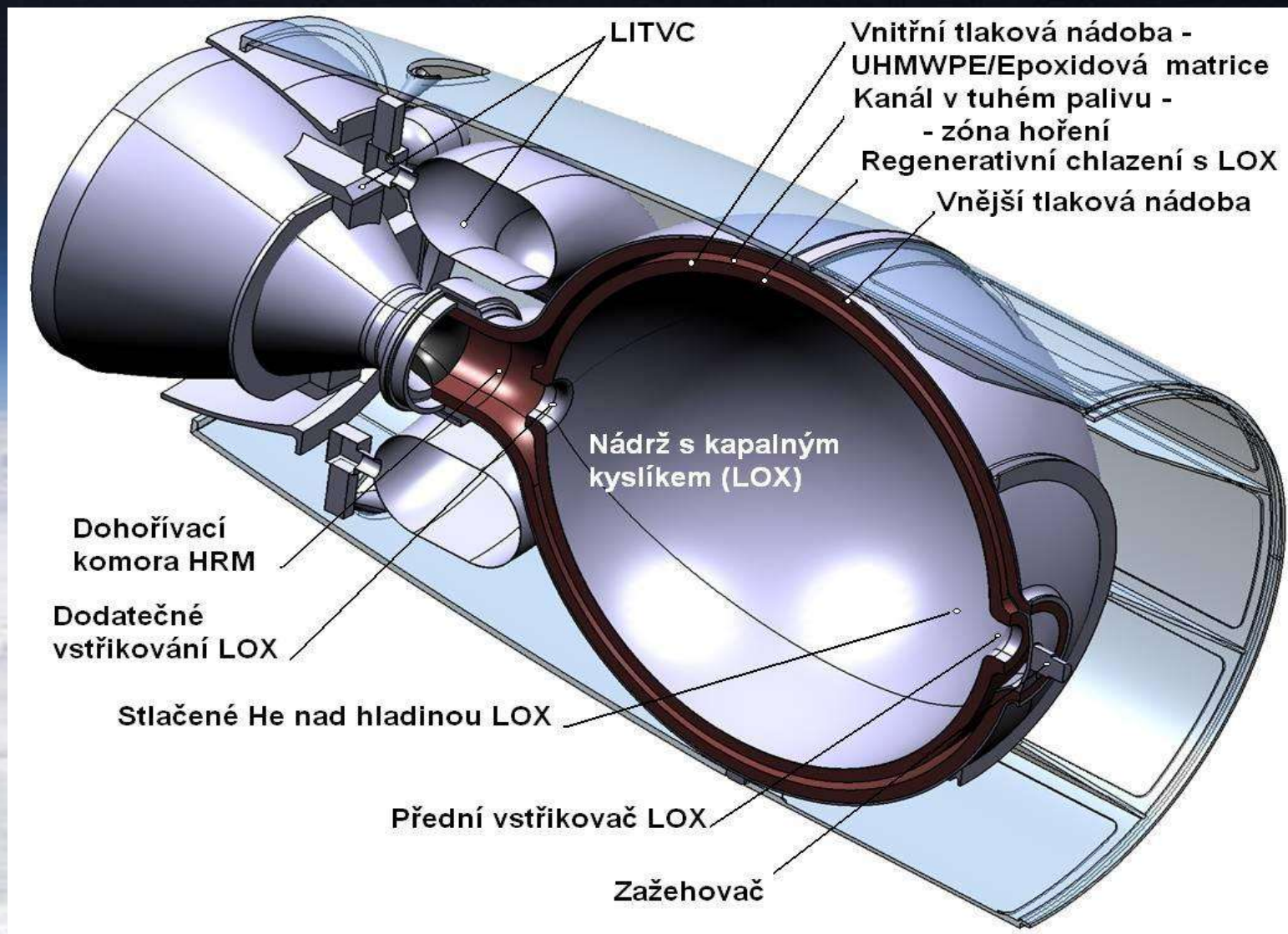
I. Stupeň pro MARV - MSS 1.



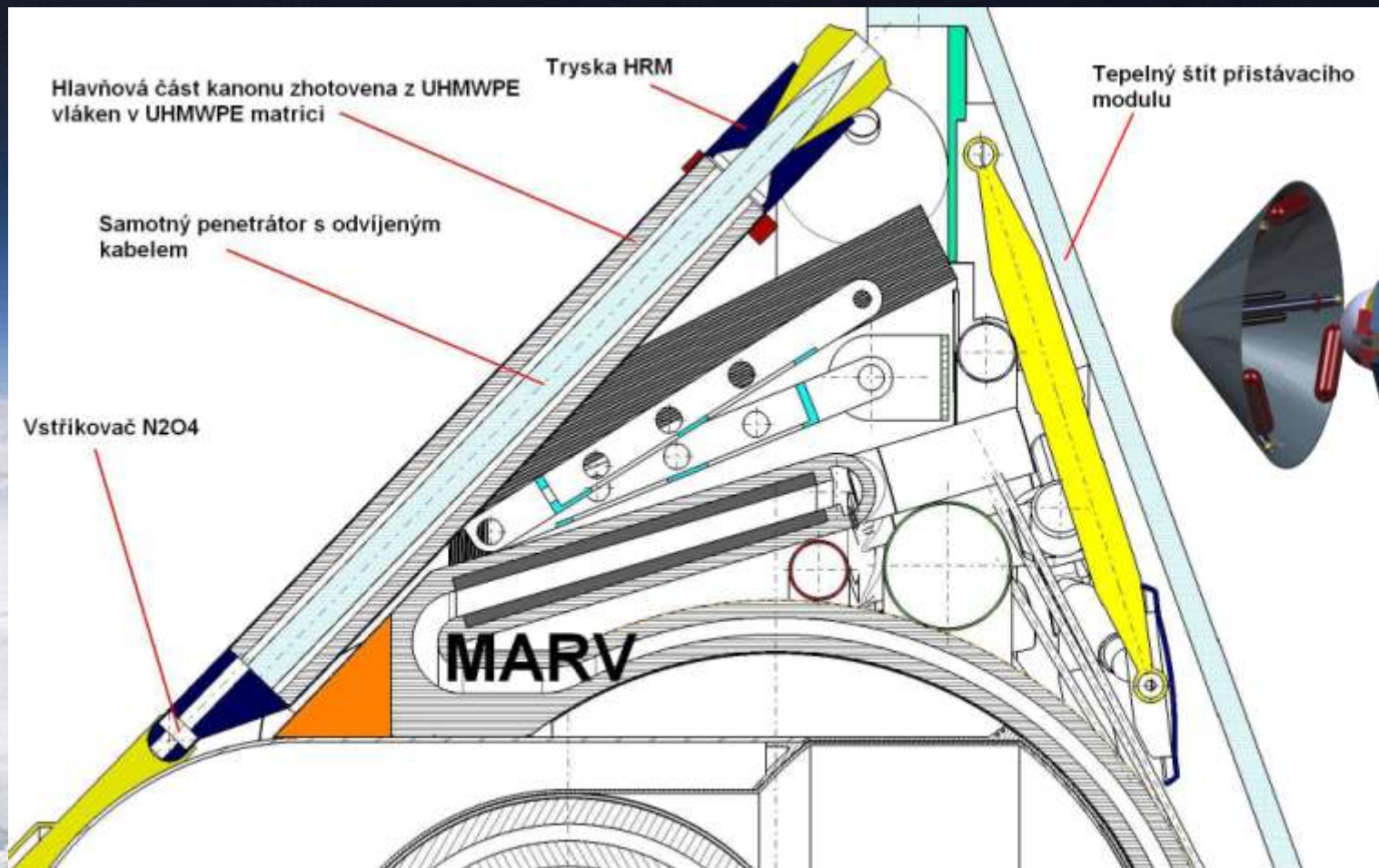
II. Stupeň pro MARV - MSS 2.



I. Stupeň pro MARV - MSS 3.



Spalitelná hlaveň - MSS 4.



Závěr

- Daný pohon je perspektivní pro pilotovanou i nepilotovanou kosmonautiku (napr. boostery)
- Možné využití multifunkčních struktur pro nosiče nano/pikodružic a pro planetární průzkum
- HRM je výhodný pro svou nízkou cenu vývoje především pro univerzity a amatérské stavitele raket.

Děkuji za pozornost !

- **Reference**

- *Martin J. Chiaverini, Kenneth K. Kuo, : " Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion " Volume 218 PROGRESS IN ASTRONAUTICS AND AERONAUTICS Frank K. Lu, Editor-in-Chief, University of Texas at Arlington, Published by AIAA 2007*
- *Cs. Boros, : "Příspěvek k řešení hybridního raketového motoru" – disertační práce, Univerzita Obrany, Brno 2009*
- *Cs. Boros: "Mars Sample Return Mission Using Multifunctional Design, Consumable Structures and In-Situ Propellant Production- Project Mars GULLYVER (GULLY Visit and Earth Return) - Mars Sample Return In-Situ Resource Utilization Mission design Contest – <http://www.marsdrive.com> – upgraded version 2008*
- *04_kosmonautika-2009_JKusakVALMEZ2009 – audionahrávka přednášky p. Prof. Ing. Jan Kusáka, CSc.*