



ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD

134002 1. vydání Změna 1	NEINTRUZIVNÍ METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTI HOŘENÍ TUHÝCH RAKETOVÝCH POHONNÝCH HMOT
---	---

ZAVÁDÍ	STANAG 4674, Ed. 1 NON-INTRUSIVE METHODS FOR MEASURING THE BURNING RATE OF SOLID ROCKET PROPELLANTS Neintruzivní metody měření rychlosti hoření tuhých raketových pohonných hmot AOP-4674(A) NON-INTRUSIVE METHODS FOR MEASURING THE BURNING RATE OF SOLID ROCKET PROPELLANTS Neintruzivní metody měření rychlosti hoření tuhých raketových pohonných hmot
NAHRAZUJE	ČOS 134002, 1. vydání NEINTRUZIVNÍ METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTI HOŘENÍ TUHÝCH RAKETOVÝCH POHONNÝCH HMOT

ČOS 134002
1. vydání
Změna 1

(VOLNÁ STRANA)

ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD

NEINTRUZIVNÍ METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTI HOŘENÍ TUHÝCH RAKETOVÝCH POHONNÝCH HMOT

Základem pro tvorbu tohoto standardu byly originály následujících dokumentů:

STANAG 4674, Ed. 1 NON-INTRUSIVE METHODS FOR MEASURING
THE BURNING RATE OF SOLID ROCKET PROPELLANTS
Neintruzivní metody měření rychlosti hoření tuhých
raketových pohonných hmot

AOP-4674(A) NON-INTRUSIVE METHODS FOR MEASURING
THE BURNING RATE OF SOLID ROCKET PROPELLANTS
Neintruzivní metody měření rychlosti hoření tuhých
raketových pohonných hmot

OBSAH

	Strana
1 Předmět standardu.....	5
2 Nahrazení standardů (norem)	5
3 Související dokumenty	5
4 Zpracovatel ČOS.....	5
5 Použité zkratky, značky a definice	6
5.1 Zkratky	6
6 Úvod	7
7 Typy neintruzivních metod	8
7.1 Ultrazvuková měřicí technika	9
7.2 RTG záření	25
7.3 Mikrovlnné záření.....	28
7.4 Kapacitní plazmové snímače	35
7.5 Akustická emise	39
7.6 Zpětný tah.....	41
7.7 Další metody.....	42
8 Hodnocení neintruzivních metod.....	42
9 Perspektivy do budoucna	47
10 Seznam citované literatury	48

1 Předmět standardu

ČOS 134002, 1. vydání, Změna 1 zavádí STANAG 4674, Ed. 1 a AOP-4674(A), do prostředí ČR. Cílem standardu je stanovit požadavky k zajištění bezpečnosti a použitelnosti tuhých raketových pohonných hmot pro vojenské účely, stanovením jejich rychlosti hoření neintruzivními metodami v laboratorním měřítku. Aplikace standardu je podmínkou dosažení co nejvyšší úrovně slučitelnosti a vzájemné zaměnitelnosti munice AČR v rámci NATO a tím posílení interoperability ČR.

2 Nahrazení standardů (norem)

Tento standard nahrazuje ČOS 134002, 1. vydání.

3 Související dokumenty

V tomto ČOS nejsou normativní odkazy na žádné citované dokumenty.

4 Zpracovatel ČOS

Vojenský technický ústav, s. p., odštěpný závod VTÚVM, Mgr. Josef Maryáš.

5 Použité zkratky, značky a definice

5.1 Zkratky a značky

Zkratka	Název v originálu	Český název
AČR		Armáda České republiky
Al	Alluminium	hliník
AP	Ammonium Perchlorate	chloristan amonný
CCD	Charge-coupled device	snímací zařízení obrazu
ČOS		český obranný standard
ČR		Česká republika
EDUM	Electronic Device for Ultrasonic Measurements	elektronické zařízení pro měření ultrazvukem
FR	France	Francie
GE	Germany	Německo
HNF	Hydrazinium Nitroformate	hydrazin nitroformát
HMX	Octogen	oktogen
HTPB	Hydroxyl terminated polybutadiene	hydroxylem terminovaný polybutadien
IT	Italy	Itálie
NATO	North Atlantic Treaty Organization	Organizace severoatlantické smlouvy
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NE	Netherlands	Holandsko
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales	Národní úřad pro letecká studia a výzkum
PMMA	Poly(methyl methacrylate)	polymetylmetakrylát
PSU	The Pennsylvania State University	Pensylvánská státní univerzita
RTG	X-Ray	rentgenové záření
SNPE	Société nationale des poudres et explosifs	Národní společnost pro prachy a výbušniny
STANAG	NATO Standardization Agreement	standardizační dohoda NATO

TNO	The Delft University of Technology	Technická univerzita Delft
TPH	Solid Rocket Propellant	tuhá pohonná hmota
UAH	The University of Alabama in Huntsville	Alabamská univerzita v Huntsville
UK	United Kingdom	Spojené království
UIUC	The University of Illinois Urbana-Champaign	Illinoiská univerzita v Urbana-Champaign
URRA	Ultrasonic Regression Rate Analyzer	ultrazvukový analyzátor rychlosti regrese
USA	The United States of America	Spojené státy americké
VPI	The Virginia Polytechnic Institute	Virginský polytechnický institut
VTÚVM		Vojenský technický ústav výzbroje a munice

Další zkratky a značky lze nalézt v NATOTerm¹ a ostatních souvisejících dokumentech.

6 Úvod

Tento standard uvádí přehled neintruзивních metod pro laboratorní stanovení rychlosti hoření tuhých pohonných hmot (TPH), jejich současná omezení a návrhy pro jejich případné zlepšení. Standard představuje velmi obecný přehled současných poznatků a má sloužit jako obecný náhled do dané problematiky. Cílem tohoto standardu zcela jistě není detailně popsat a vysvětlit veškeré zákonitosti hoření TPH, ale spíše odkázat na příslušné literární zdroje, ve kterých lze tyto informace nalézt (např. vysvětlení proměnných v uvedených rovnicích apod.).

Neintruзивní metody umožňují měření rychlosti hoření tuhé pohonné hmoty bez narušení procesu spalování. Ke stanovení rychlosti hoření tyto měřicí techniky využívají především ultrazvukových vln, rentgenového (RTG) či mikrovlnného záření a změn materiálových vlastností souvisejících se změnou tloušťky TPH. Přestože většina těchto metod byla vyvinuta k měření neustáleného hoření [1], jsou snadno aplikovatelné také pro měření rychlosti ustáleného hoření. Všechny měřicí techniky uvedené v tomto standardu byly již použity pro stanovení rychlosti hoření TPH ve spalovací komoře a některé z nich i přímo v komoře raketového motoru [1,2,3,4]. Standard nicméně žádnou z metod neuvádí jako metodu standardní, jako doporučenou však uvádí metodu ultrazvukového měření.

¹ <https://nso.nato.int/natoterm>

7 Typy neintruzivních metod

Tento standard je rozdělen do kapitol, ve kterých jsou diskutovány jednotlivé neintruzivní metody. V každé kapitole je vysvětlen fyzikální princip měření, jsou shrnuty typické aplikace měřících metod a je posouzen potenciál jednotlivých metod pro fázi zkoušení, vývoje či hodnocení tuhých pohonných hmot. V závěrečné části jsou pak doporučeny nejslibnější techniky pro rutinní hodnocení TPH. Přehled typů neintruzivních metod diskutovaných v tomto standardu je, spolu se stručným popisem principu měření, uveden v tabulce 1. Bylo zjištěno, že stanovovaným parametrem pro určení rychlosti hoření je u všech metod poloha (vzdálenost) hořícího povrchu.

TABULKA 1 – Typy neintruzivních metod

Metoda	Princip měření	Kapitola
Ultrazvuk	Stanovuje se délka zrna TPH na základě odrazu akustické vlny procházející zrnem TPH od hořícího povrchu.	7.1
RTG záření	Stanovuje se délka zrna TPH na základě profilu intenzit rentgenového záření prošlého zrnem TPH.	7.2
Mikrovlnné záření	Stanovuje se délka zrna TPH na základě fázového posunu mikrovlnného záření, které prochází zrnem TPH a odráží se od hořícího povrchu.	7.3
Kapacitní plazmové snímače	Stanovuje se délka zrna TPH na základě změny elektrické kapacity mezi dvěma elektrodami.	7.4
Akustická emise	Stanovuje se akční čas zrna TPH na základě detekce spontánní akustické emise přenášené z hořícího povrchu přes zrno TPH.	7.5
Zpětný tah	Stanovuje se masa zrna TPH na základě měření síly či vibrační frekvence.	7.6

Uvedené neintruzivní metody byly vybrány na základě průzkumu provedeného v rámci zkušebních center jednotlivých států, které se touto problematikou zabývají. V rámci průzkumu byly zjišťovány i důvody (motivace) k použití příslušné metody, silné a slabé stránky, příklady aplikací, posouzení výhod, limitací a možnosti budoucího využití a seznam referenčních dokumentů. Tabulka 2 shrnuje použití jednotlivých metod v rámci zúčastněných států.

TABULKA 2 – Použití metod v rámci jednotlivých států

Neintruzivní měřicí technika	FR	GE	IT	NE	UK	USA
Ultrazvuk	ANO	NE	NE	ANO	NE	ANO
RTG záření	ANO	NE	NE	NE	ANO	ANO
Mikrovlnné záření	ANO	NE	NE	NE	NE	ANO
Kapacitní plazmové snímače	ANO	NE	ANO	NE	NE	ANO
Akustická emise	NE	NE	ANO	NE	NE	ANO
Zpětný tah	NE	NE	ANO	NE	NE	ANO

ANO – metoda byla použita; NE – metoda nebyla použita

7.1 Ultrazvuková měřicí technika

Ultrazvuková metoda (mód impulz-echo) využívá přenosu akustických vln skrze zrno TPH. Na základě doby šíření impulsu z ultrazvukové sondy na povrch TPH a zpět v kombinaci s rychlostí šíření akustické vlny, se v diskrétních časových intervalech určí tloušťka zrna TPH (vzdálenost povrchu). Z derivací vzdálenosti povrchu TPH v čase se poté stanoví rychlost jeho hoření.

První aplikace ultrazvukové měřicí techniky byly zaznamenány již v šedesátých letech minulého století [5,6,7,8]. V sedmdesátých letech tuto metodu rozvinuli a šířeji aplikovali Francouzi a Holanďané. Opravdu pronikavý rozvoj však ultrazvuková měřicí technika zaznamenala v posledních 30 letech. Tabulka 3 sumarizuje vývoj této techniky a uvádí i příklady aplikací v rámci jednotlivých států.

Ultrazvuková metoda se používá především k určení ustálené rychlosti hoření TPH jako funkce tlaku. Ve Francii a USA se tato metoda dnes používá pro charakterizaci nových TPH (pohonné hmoty o novém složení). Ultrazvukovou měřicí techniku lze také použít ke stanovení teplotní citlivosti TPH. Výhodou metody je malý rozměr měřicího zařízení, malé množství TPH nutné ke zkoušce a možnost popsat celou zákonitost rychlosti hoření TPH provedením pouze jedné zkoušky. Ultrazvuková metoda se proto používá především k výzkumným účelům a rutinním kontrolám při průmyslové výrobě TPH. Poměrně nedávno se však objevily i aplikace této metody pro měření neustáleného hoření tuhých pohonných hmot [9,10,11].

TABULKA 3 – Vývoj a aplikace ultrazvukové metody v rámci jednotlivých států

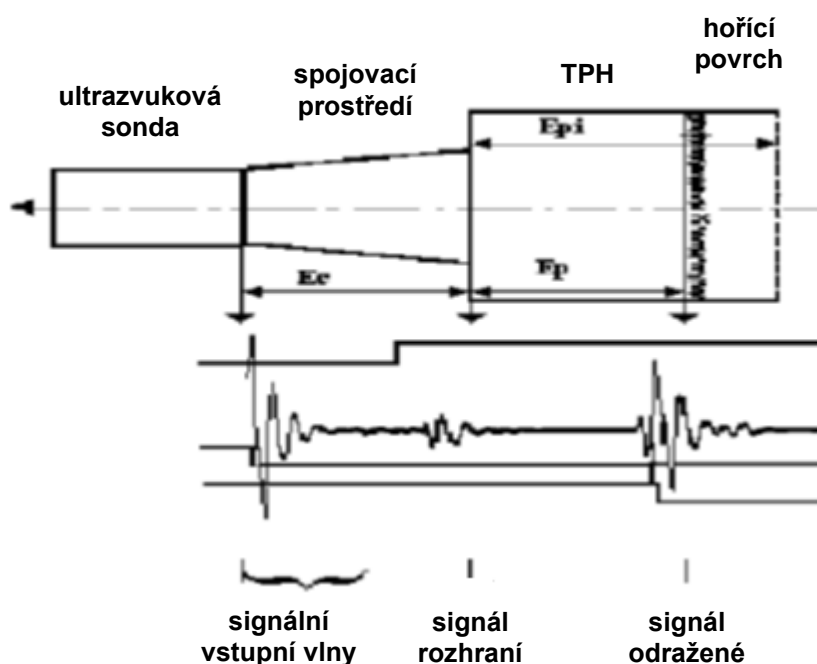
Země	Zkušební centrum/ agentura	Časové období*	Aplikace
Francie	ONERA/SNPE	1979 až dosud	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení rychlosti hoření modifikovaných i nemodifikovaných TPH • stanovení teplotní citlivosti • stanovení reakční funkce TPH • stanovení erozivního hoření • stanovení balistiky raketových motorů • stanovení eroze izolace raketových motorů
Holandsko	TNO/Technická univerzita Delft	1985 až dosud	<ul style="list-style-type: none"> • laboratorní stanovení rychlosti regrese u hybridních raketových motorů • laboratorní stanovení rychlosti regrese u náporových motorů • stanovení rychlosti hoření oxidačního činidla
USA	AEDC	90. léta	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení balistiky a eroze izolace raketových motorů
USA	PSU	80. léta až dosud	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení rychlosti hoření modifikovaných i nemodifikovaných TPH • laboratorní stanovení rychlosti regrese u hybridních raketových motorů • stanovení akustické admitance TPH
	UAH	1995 až dosud	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení rychlosti ustáleného i neustáleného hoření TPH • stanovení teplotní citlivosti • stanovení reakční funkce TPH
	UIUC	1995 až dosud	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení rychlosti ustáleného i neustáleného hoření TPH • stanovení reakční funkce TPH
	VPI	1967	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení rychlosti hoření TPH
Indie	Vikram	90. léta	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení rychlosti hoření u zmenšených raketových motorů
Švédsko	Volvo Flygmotor (dříve Svenska Flygmotor AB)	1964	<ul style="list-style-type: none"> • stanovení rychlosti hoření u hybridních raketových motorů

*značí časové období, kdy se dané zkušební centrum/agentura problematikou zabývaly

7.1.1. Obecný popis měření

Ultrazvuková sonda fungující zároveň jako vysílač i přijímač, vysílá ultrazvukové vlny do hořící pohonné hmoty. Vlna prochází vzorkem TPH a je odražena od hořícího povrchu. Jelikož je obrovský rozdíl v akustickém odporu (impedanci) zrna TPH a vzniklých spalin, dochází k odrazu velké části akustického vlnění. Měřením doby mezi vysláním a příjmem akustické vlny lze odvodit tloušťku nespáleného TPH. Rychlost hoření zrna TPH se pak odvodí na základě numerické derivace jeho tloušťky.

Typické uspořádání experimentu a příklad signálu měřené akustické vlny je uveden na obrázku 1. Mezi měřicí ultrazvukovou sondou a hořícím zrnem TPH je vhodné spojovací prostředí (materiál), které zpomaluje odražené vlnění tak, aby nedocházelo k jeho překryvu se vstupním akustickým impulzem, když se tloušťka stěny zrna TPH blíží nule. Spojovací prostředí také izoluje ultrazvukovou sondu od hořícího prostředí. Na obrázku 1 je hořící povrch TPH zobrazen vpravo a průběh signálu akustické vlny je zobrazen jako funkce času. První signál odpovídá vstupnímu impulzu ultrazvukové sondy. Menší impulz ve středu záznamu odpovídá odrazu akustické vlny od rozhraní spojovacího prostředí (materiálu) a zrna TPH, ke kterému dochází v důsledku jejich rozdílné akustické impedance. Na obrázku 1 zcela vpravo je pak zobrazen signál odpovídající odrazu akustické vlny od hořícího povrchu TPH. Časové zpoždění mezi signálem vstupní a odražené vlny (doba šíření vlny) odpovídá době mezi amplitudami nejvyšších špiček vstupního a odraženého signálu. Při spalování zrna TPH se časové zpoždění stále zmenšuje. Vysíláním periodických ultrazvukových pulzů v průběhu hoření lze tudíž monitorovat změnu tloušťky stěny zrna TPH.



OBRÁZEK 1 – Typické uspořádání ultrazvukového měření a příklad stanovovaného signálu

Je-li rychlost šíření vlny ve vzorku TPH (C_p) a ve spojovacím prostředí (C_c) konstantní, je doba šíření vlny (τ) úměrná tloušťce vzorku TPH (E_p) a spojovacího materiálu (E_c) dle vztahu:

$$\tau = \frac{2E_c}{C_c} + \frac{2E_p}{C_p} \quad (1)$$

Šíření vln (rychlost, tlumení) je nicméně ovlivněno také teplotou prostředí resp. materiálu, kterým vlna prochází (počáteční teplota, teplotní profil) a mechanickým napětím vzniklým v důsledku vnitřního tlaku a geometrie zrna TPH [12]. Kvalita signálu odražené vlny je také silně ovlivněna mechanickými vlastnostmi spojovacího prostředí a to především v případech, kdy se mění počáteční teplota vzorku TPH. Změna rychlosti šíření ultrazvukové vlny je pak úměrná tlaku a teplotě podle následující rovnice:

$$\frac{C_{Pref}}{C_p} = [1 - k_p(P - P_{ref})] \cdot [1 + k_t(T - T_{ref})] \quad (2)$$

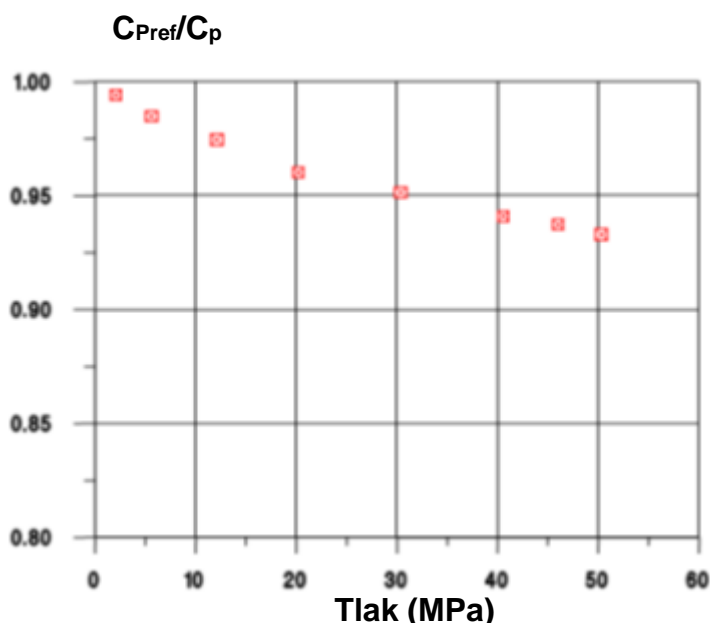
Korekční koeficient k_t se ve výše uvedené rovnici standardně zanedbává. Hodnota koeficientu k_p se pro TPH stanoví na základě příslušného typu TPH (k_{pp}) a stejně tak pro spojovací prostředí je nutné hodnotu tohoto koeficientu znát (k_{pc}) [13]. Obrázek 2 znázorňuje závislost hodnoty koeficientu k_p pro hliník obsahující heterogenní TPH na tlaku. V tabulce 4 jsou pak uvedeny typické hodnoty akustických vlastností (frekvence, rychlost) pro oxidační činidla [14], hydroxylem terminovaný polybutadienový (HTPB) polymer [15], hliník obsahující heterogenní TPH [16] a polymethylmetakrylát [17,18,19,20]. Akustické vlastnosti polymethylmetakrylátu nejsou ovlivňovány změnami tlaku, v provozních podmínkách raketových motorů jsou však velmi citlivé ke změnám teploty. Příklady konkrétních hodnot korekčních koeficientů pro TPH obsahující chloristan amonný a polybutadien: $k_p = 3 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Pa}^{-1}$, $k_t = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ [12]. Výše uvedená rovnice s konkrétními hodnotami korekčních koeficientů se použije pro stanovení rychlosti šíření akustické vlny v zrna TPH i ve spojovacím materiálu a tyto parametry poté společně slouží k výpočtu rychlosti hoření TPH dle následující rovnice [21]:

$$r_b \equiv -\frac{dE_p}{dt} = -\frac{C_{Pref}}{2(1 - k_{pp}(P - P_{ref}))} \cdot \left\langle \frac{d\tau}{dt} - \left[k_{pp} \left(\frac{\frac{2E_c}{C_{ref}} - \tau - \frac{2E_c k_{pc}}{C_{ref}}(P - P_{ref})}{1 - k_{pp}(P - P_{ref})} \right) - \frac{2E_c k_{pc}}{C_{ref}} \right] \frac{dP}{dt} \right\rangle \quad (3)$$

Z důvodu kalibrace křivky tloušťky stěny zrna TPH získané na základě ultrazvukových signálů, je nutné změřit a znát počáteční tloušťku. Tloušťka stěny zrna musí být stanovena s přesností vyšší než 0,5 %, jelikož přesnost tohoto měření ovlivňuje i přesnost stanovení rychlosti hoření TPH. Pro samotné stanovení rychlosti hoření se pak měří následující dva parametry. Jeden z nich je čas mezi signálem emitované a přijaté akustické vlny (doba šíření). V průběhu času byly vytvořeny různé techniky měření doby šíření akustické vlny. Nejstarší metody používaly vysokorychlostní kamery k záznamu průběhu signálu na osciloskopu [6,22]. Později byly vyvinuty elektronické převodníky pro měření doby šíření vlny pomocí analogových obvodů (elektronicky) [20,23]. V nedávné době [24,25] pak byly vyvinuty techniky používající

číslicové počítače k záznamu každé vlny a následné analýze doby šíření této vlny. Druhým stanovovaným parametrem je tlak uvnitř spalovací komory měřený v průběhu hoření zrna TPH, který se zpravidla stanovuje konvenčními metodami. Rychlost hoření tuhých pohonných hmot se poté odvozuje pomocí algoritmů, zohledňujících odchylky v akustické rychlosti jako funkci tlaku a pracujících s derivací naměřených dat v čase.

POZNÁMKA 1 Detailní popis metody, jakož i úplný popis uvedených vztahů, lze nalézt v citovaných publikacích [5–25].



OBRÁZEK 2 – Závislost hodnoty korekčního koeficientu na tlaku u heterogenních TPH obsahujících hliník (ONERA [13])

TABULKA 4 – Akustické vlastnosti vybraných materiálů

Materiál	Frekvence (MHz)	Rychlost (C) při 20 °C (m/s)	Reference
HNF	5,00	3532	[14]
Upravený HTPB	0,25	1960	[15]
AP/HTPB/Al neupravovaný	2,25	2075	[16]
AP/HTPB/Al	2,25	1915	[16]
PMMA	2,50	2750	[17,18,19,20]

7.1.2. Příklady použití a výsledků – spalovací komory

V této části standardu jsou uvedeny aplikace ultrazvukové měřicí techniky ve spalovacích komorách v rámci jednotlivých států a jejich zkušebních center (agentur). V tabulce 5 jsou shrnuty klíčové parametry měření provedených v otevřených i uzavřených spalovacích komorách. U otevřené spalovací komory jsou zplodiny hoření odváděny, aby byl v komoře udržen přibližně konstantní tlak. Uzavřená spalovací komora naopak brání úniku zplodin hoření a v průběhu spalování tak dochází k nárůstu tlaku.

TABULKA 5 – Příklady aplikací ultrazvukové měřicí techniky v otevřených i uzavřených spalovacích komorách

Stát	Zkušební centrum (agentura)	Typ spalovací komory	Typ TPH	Hm. TPH (g)	Tl. stěny zrna TPH (mm)	Rozsah tlaků (MPa)	Rozsah teplot okolí (°C)	Spojovací prostředí (materiál)	Ultra-zvuk. fr. (kHz)	Počet impulzů za 1 s	Způsob detekce signálu	Reference
Francie	ONERA/SNPE	Otevřená Uzavřená Modulovaná	AP/HTPB, homogenní TPH, TPH s HMX, neupravovaný AP/HTPB/AI	< 100	8–15	0,1–50	–60–80	Epoxidová pryskyřice	2,25	5000	EDUM	4, 16, 23, 26
Holandsko	Univerzita Delft/TNO	Otevřená	HNF	1	10	0,1–2	20–60	PMMA (parafin)	5	1000	URRA	14, 30
USA	UAH	Otevřená Uzavřená Modulovaná	AP/HTPB/AI	30	12	34	20	Epoxidová pryskyřice	2,25	5000	EDUM	25, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45
	UIUC	Otevřená Uzavřená Modulovaná	AP/HTPB	25	25	20	20	Vysokoteplotní plast	1,0	2500	Digit./ 25 MHz	46, 47, 48
	VPI/NASA	Otevřená	Dvousložkové TPH	2000	75	2–7	20	Akustický spacer (akustická distanční tyč)	–	–	Vysokorychl. kamera 130 Hz	6, 22
Indie	Vikram	Otevřená	AP/HTPB/AI	–	30	2,2–2,4	20	PMMA (lepený aralditem) 40 mm	2,25	500-5000	PIM 500 Hz	50

7.1.2.1 Francie – ONERA/SNPE [4,16,21,23,26,27]

Veškeré informace uvedené v této kapitole vychází z poznatků a stanovení organizace ONERA resp. SNPE. ONERA provádí rozsáhlé vývojové práce v oblasti ultrazvukové měřicí techniky a ultrazvukových sond a SNPE se zabývá vývojem jejich průmyslových aplikací [28].

Pro stanovení rychlosti hoření TPH ultrazvukovou metodou se používají dva druhy experimentálního uspořádání. První z nich tzv. "uzavřená spalovací komora", je určena pro měření rychlosti hoření při standardním rozsahu tlaků 5 MPa až 45 MPa [21]. Stanovení se obvykle provádí při standardní teplotě 20 °C, rozsah teplot byl nicméně později rozšířen na rozmezí -60 °C až +80 °C. Pro stanovení pomocí uzavřené spalovací komory je nicméně nutný vhodný spojovací materiál a úprava ultrazvukových snímačů (sond) tak, aby se tyto byly schopny přizpůsobit různým počátečním teplotám tuhých pohonných hmot. Druhým typem uspořádání je měření v otevřené spalovací komoře, která je vybavena tryskou namontovanou na prodlužovací tubus. Toto uspořádání je obvykle užíváno pro charakterizaci rychlosti spalování za nízkého tlaku (do 4 MPa) u jednosložkové TPH.

Při měření dochází k tlumení ultrazvukové vlny v důsledku její absorpce materiálem. Pro snadnou detekci a získání spolehlivého signálu odražené ultrazvukové vlny se ukázala jako ideální tloušťka vzorku 40 mm (u všech typů TPH), avšak signál je možné detekovat i při mnohem větších tloušťkách materiálu. Průměr vzorku TPH je pak větší než průměr použité ultrazvukové sondy, v tomto případě 25 mm.

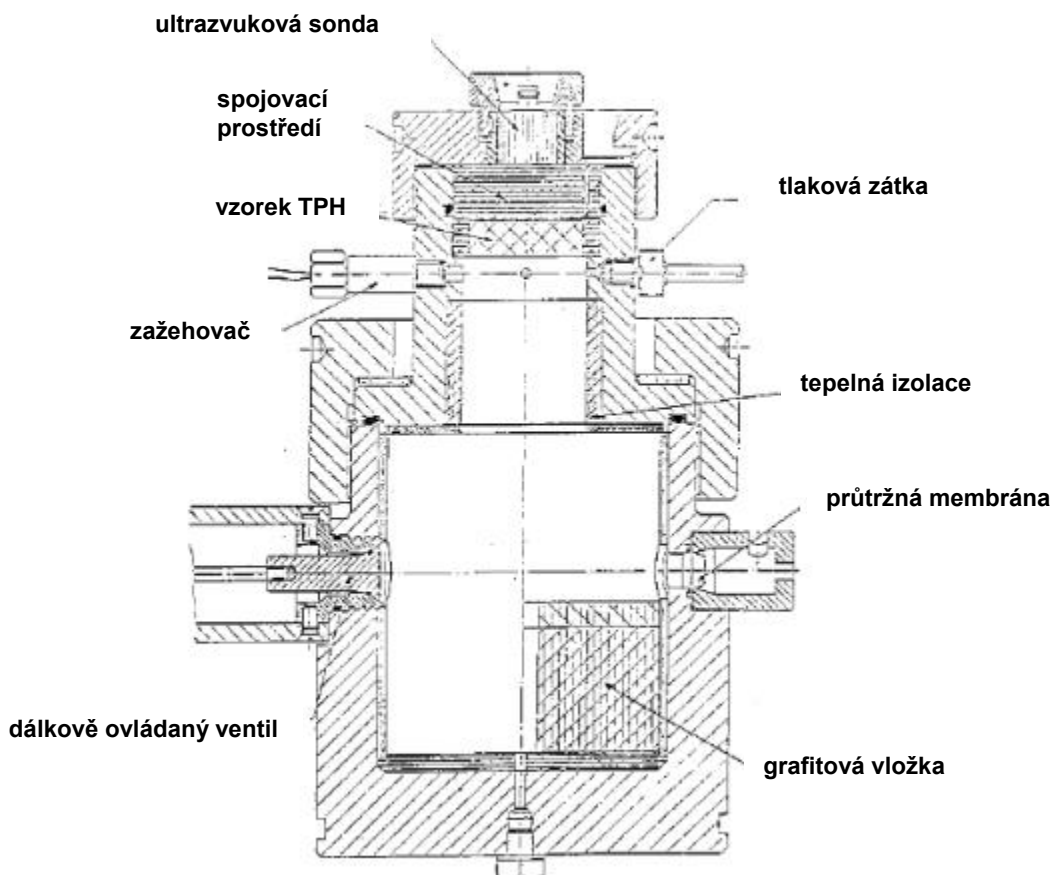
Přesnost stanovení rychlosti hoření je přímo závislá na frekvenci emitované ultrazvukové vlny. Pro standardní TPH se běžně používá frekvence 5 kHz, avšak u TPH s vysokou rychlostí hoření (50 mm/s při 70 MPa) by tato frekvence mohla být příliš nízká k tomu, aby byla rychlost hoření stanovena s požadovanou přesností. V závislosti na tloušťce vzorku TPH, lze použít frekvenci až 20 kHz.

V principu všechny typy TPH by mohly být analyzovány ultrazvukovou metodou. Složení některých TPH však z různých důvodů způsobuje, že signál odražené ultrazvukové vlny není dostatečně kvalitní pro další zpracování. Typickým příkladem mohou být některé lité dvousložkové TPH. Zrno těchto dvousložkových TPH generuje signál, který může překrývat signál hořícího povrchu. Určení rychlosti hoření těchto TPH ultrazvukovou metodou by tedy vyžadovalo dodatečnou úpravu ultrazvukového signálu.

Doba emise ultrazvukových vln by měla být co nejkratší (méně než 10 μ s), aby byla zajištěna správná přesnost měření a detekce signálu odražené vlny. Tyto podmínky se dosahují použitím širokopásmových, vysoce tlumených ultrazvukových převodníků (sond). Ultrazvuková frekvence (1 nebo 2,5 MHz) se poté volí s ohledem na akustickou impedanci TPH. Převodník má průměr 0,025 m (1 palec) nebo 0,013 m (1/2 palce) a je buzen generátorem elektrických impulzů. Aby byla zajištěna optimální frekvence emise ultrazvukových pulzů, je zapotřebí elektronické zařízení, podobné tomu, které navrhla společnost ONERA, využívající interní nebo nastavitelný externí časovač. Pulzní frekvence (1, 5, 10 nebo 20 kHz) se volí s ohledem na tloušťku vzorku a jeho rychlost hoření. Hlavními součástmi výše zmíněného elektronického zařízení jsou: frekvenční zesilovač a specifické elektrické obvody, jako je časové maskování, regulátor detekce prahových hodnot či generátor krokových funkcí pro zobrazení posunutí impulzů odražené vlny.

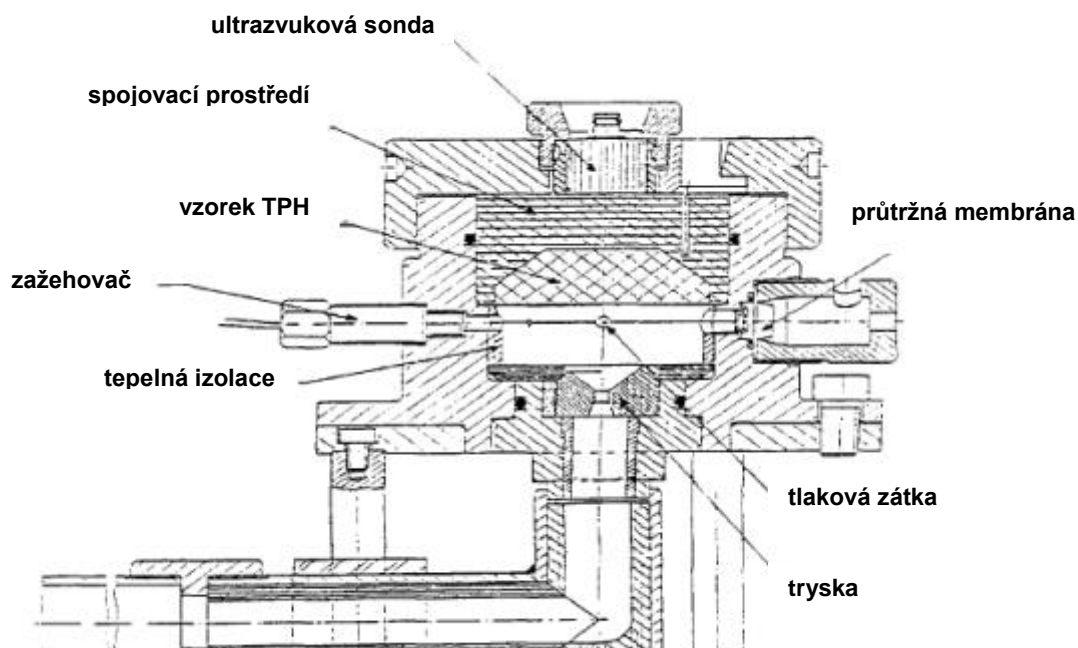
Pro měření tlaku spalin při ultrazvukovém stanovení rychlosti hoření TPH se využívá tenzometrů. Tato zařízení se skládají ze symetrického prstencového snímacího prvku se čtyřmi fóliovými tenzometry, které jsou pomocí tepelně odolné epoxidové pryskyřice spojeny s kontrolovanými oblastmi vzorku. Součástí zařízení je také ocelová membrána, která odděluje a utěsňuje elektrické součásti tenzometru od stlačených kapalin. K ochraně snímačů před korozivními spalinami o vysoké teplotě se používá trubice naplněná olejem nebo tukem. Rozsah tenzometru se typicky volí od nuly do 100 MPa. Pokud není složení TPH dobře známé, je rozsah tlaku snímače zvolen s ohledem na přetlak, který by mohl být ve spalovací komoře dosažen (bere se v úvahu tloušťka průtržné membrány).

Obrázek 3 ukazuje uzavřenou komoru použitou u SNPE pro standardní vyhodnocení rychlosti hoření. Tato komora se typicky používá při tlaku od 1,5 MPa do 50 MPa. Objem spalovací komory je 5 litrů a může být redukován na 1,8 litru pomocí grafitové vložky. Komora může být přednatlakována plynným dusíkem. Pro zapálení zrna TPH se užívá zažehovač, který se skládá z primárního rozněcovadla spojeného s primární prachovou náplní, která umožní okamžité uvolňování plynů (v řádu milisekund). Pro zvýšení účinnosti může být k zažehovači připevněna malá část TPH, což vede k usnadnění jeho vznícení. Horké plyny vznikající při spalování TPH postupně zvyšují tlak v komoře. Aby se předešlo nebezpečným hodnotám přetlaku, je součástí spalovací komory také průtržná membrána. Po ukončení spalování, se komora odtlakuje pomocí dálkově ovládaného ventilu.



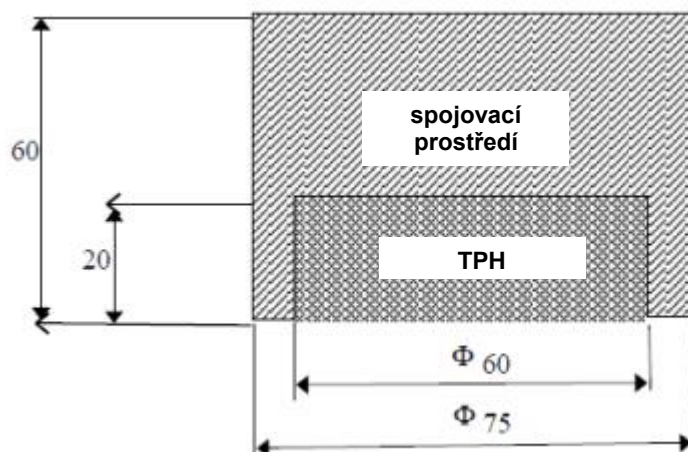
OBRÁZEK 3 – Uzavřená spalovací komora pro měření rychlosti hoření TPH pomocí ultrazvukové metody [29]

Na obrázku 4 je zobrazena otevřená spalovací komora (s tryskou), která se používá pro stanovení rychlosti hoření při nízkých tlacích (0,1 MPa až několik MPa) a ve které je vývoj tlaku v průběhu spalování vzorku TPH určen změnou objemu průtoku spalin (skrze trysku). Zažehnutí vzorku TPH je iniciováno při tlaku, který zajišťuje okamžité vzplanutí jeho povrchu. V první fázi hoření, kdy je regrese povrchu zrna TPH konstantní, zůstává konstantní také tlak v komoře. V další fázi hoření dochází v důsledku stále se zmenšujícího povrchu zrna TPH k poklesu tlaku.

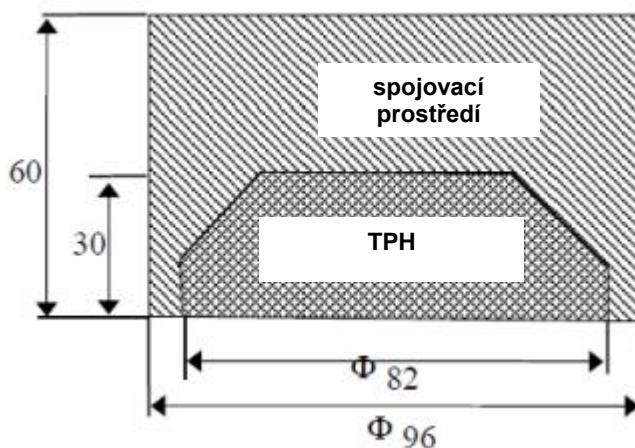


OBRÁZEK 4 – Otevřená spalovací komora pro měření rychlosti hoření TPH pomocí ultrazvukové metody [29]

Typická hmotnost vzorku zrna TPH je asi 100 g. Tvar a rozměry zrna pro stanovení rychlosti hoření v uzavřené resp. otevřené spalovací komoře jsou znázorněny na obrázcích 5a a 5b. Typická tloušťka stěny zrna je mezi 8 a 30 mm. Spojovací prostředí je tvořeno materiálem, který zajišťuje dobrý přenos ultrazvukové vlny. Akustická impedance spojovacího prostředí (definovaná jako $Z = \rho \cdot C$, kde ρ je hustota prostředí a C je fázová rychlost šíření zvuku) by měla navíc být co nejbližší akustické impedanci TPH, aby se minimalizoval odraz ultrazvukové vlny na rozhraní. Pro heterogenní a dvousložkové TPH je materiál spojovacího prostředí poněkud odlišný od materiálu pro jednosložkové TPH. Je třeba poznamenat, že materiál spojovacího prostředí musí být chemicky kompatibilní s TPH a mít dobré termomechanické vlastnosti.



a) Tvar a rozměry (v mm) zrna TPH pro stanovení v uzavřené spalovací komoře



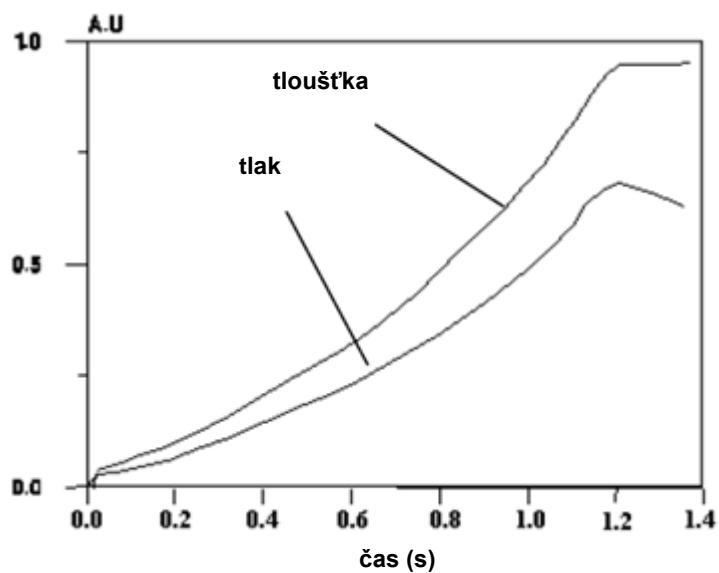
b) Tvar a rozměry (v mm) zrna TPH pro stanovení v otevřené spalovací komoře

OBRÁZEK 5 – Tvar a rozměry zrna TPH pro stanovení rychlosti hoření ultrazvukovou metodou [29]

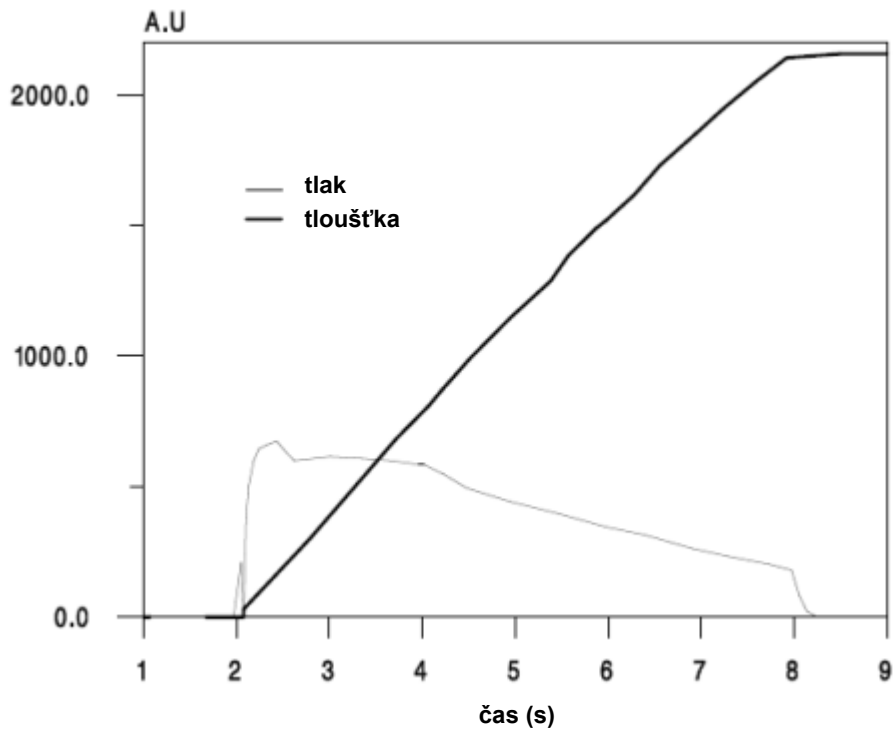
Příklad elektronického zařízení navrženého a používaného společností ONERA [23] je uveden na obrázku 6. Toto zařízení je schopno generovat pulzy a analyzovat signál z ultrazvukových sond (převodníků) tak, že v reálném čase zpracovává a převádí odražený signál na analogové napětí, které je úměrné časovému zpoždění mezi vstupním a odraženým signálem (doba ozvěny). Obrázek 7 znázorňuje typický výsledek vývoje tlaku a tloušťky zrna během stanovení rychlosti hoření v uzavřené spalovací komoře. Obrázek 8 ukazuje podobné výsledky pro zkoušky s otevřenou komorou. Na obrázku 9 je pak uvedena křivka znázorňující vztah rychlosti hoření a tlaku získaná ultrazvukovou měřicí metodou, která ukazuje užitečnost vyjádření teplotní senzitivity TPH jako funkce tlaku [21,26]. Pro zajištění reprodukovatelnosti výsledků se obvykle provádějí dvě stanovení. Obrázek 10 ukazuje srovnání výsledků rychlosti hoření získaných ultrazvukovou měřicí technikou a pomocí zmenšených raketových motorů, přičemž lze říci, že shoda mezi těmito výsledky je poměrně dobrá.



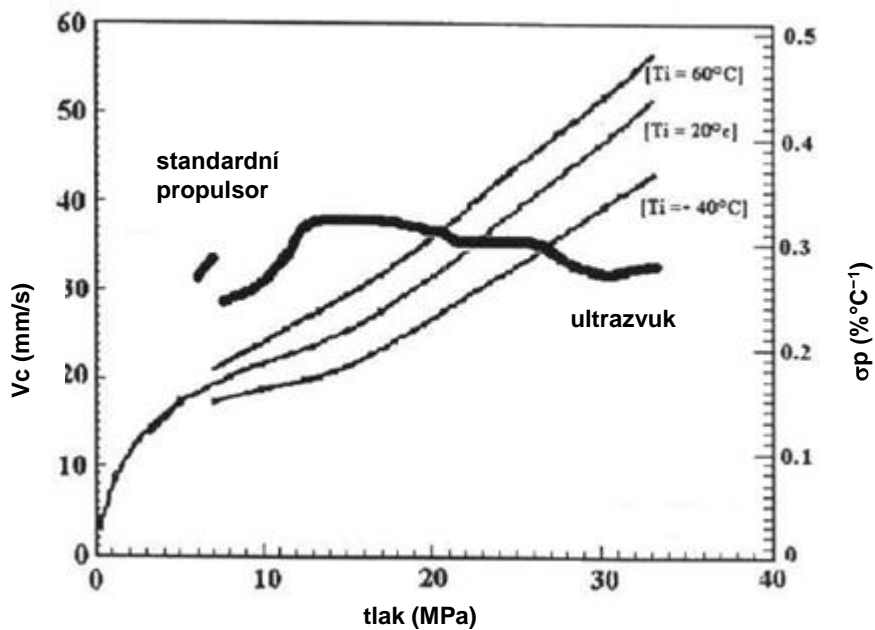
OBRÁZEK 6 – Elektronické zařízení používané společností ONERA (ONERA EDUM) [23]



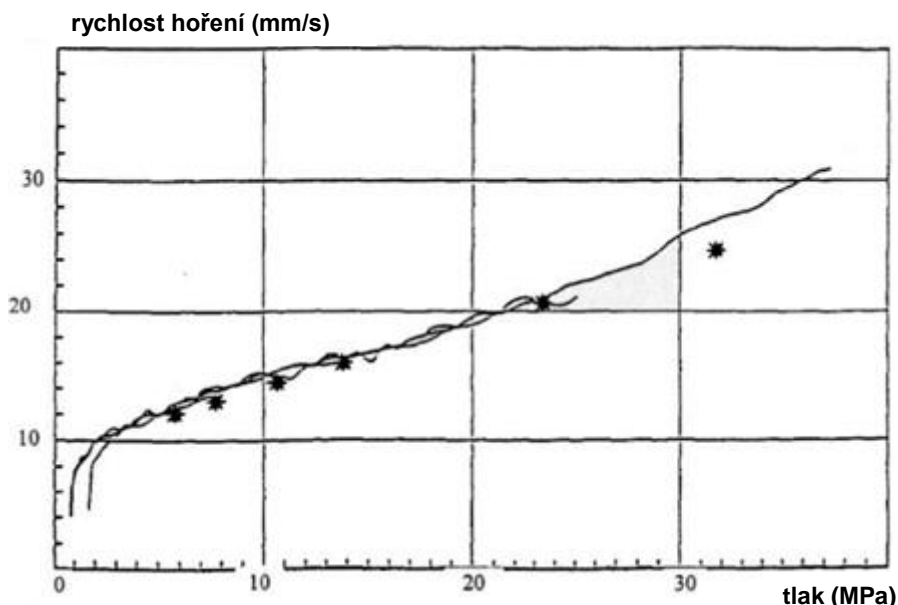
OBRÁZEK 7 – Typický průběh změny tlaku a tloušťky zrna získaný ultrazvukovou měřicí metodou v uzavřené spalovací komoře



OBRÁZEK 8 – Typický průběh změny tlaku a tloušťky zrna získaný ultrazvukovou měřicí metodou v otevřené spalovací komoře



OBRÁZEK 9 – Typický průběh rychlosti hoření získaný ultrazvukovou měřicí metodou v otevřené spalovací komoře



OBRÁZEK 10 – Srovnání výsledků rychlosti hoření získaných ultrazvukovou měřicí metodou a spalováním v raketových motorech [13]

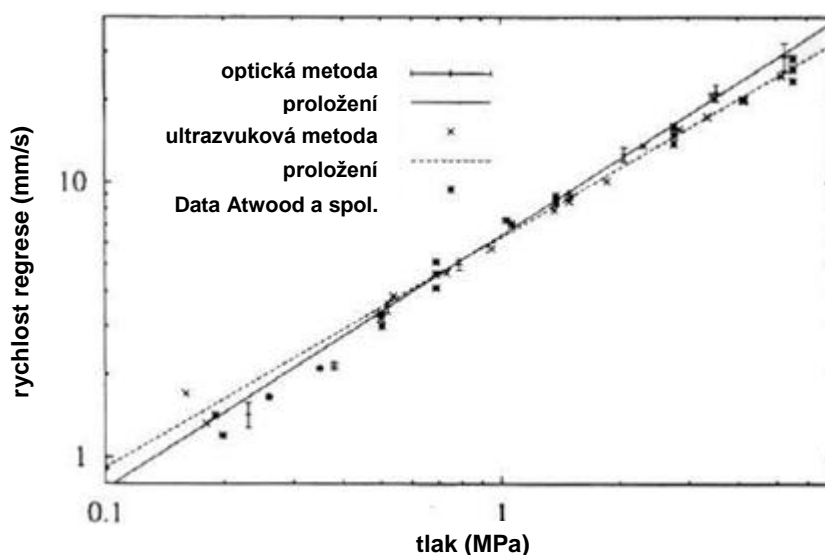
7.1.2.2 Holandsko – Univerzita Delft/TNO [14]

Veškeré informace uvedené v této kapitole vychází z poznatků a stanovení univerzity v Delftu a organizace TNO, prováděných ultrazvukovou měřicí technikou na vzorcích hydrazin nitroformátu (HNF) [14]. Stanovení rychlosti hoření bylo provedeno v otevřené spalovací komoře pomocí ultrazvukového měřicího zařízení použitého již dříve pro měření u náporových motorů. Tloušťka vzorku HNF byla 10 mm a vzorek byl spalován při tlaku 2 MPa.

Pro měření byla použita 5 MHz ultrazvuková sonda, pulzní frekvence 1 kHz a polymethylmetakrylát (PMMA) jako spojovací prostředí. Spojení PMMA se vzorkem HNF bylo zajištěno parafinem. Důvodem použití PMMA jako spojovacího prostředí byla jeho akustická impedance, která je velmi podobná akustické impedanci HNF. Pro stanovení doby ozvěny a její převod na odpovídající hodnoty napětí bylo použito zařízení nazvané „ultrazvukový analyzátor rychlosti regrese“ (URRA).

Obrázek 11 ukazuje typický průběh spalování vzorku HNF. Průběh spalování byl stanoven pomocí ultrazvukové měřicí techniky a porovnán s výsledky optického měření rychlosti hoření vzorku HNF [30]. Optické měření bylo založeno na použití CCD kamery, která snímala hořící povrch vzorku HNF skrze okno ve stěně spalovací komory. Zjištěné rozdíly v rychlostech hoření při vyšších tlacích v rámci první fáze experimentu byly přisuzovány změně části povrchu hoření na kužel. Jinými slovy, v důsledku vyšší rychlosti hoření středu vzorku v přechodovém stavu je rychlost hoření měřená na povrchu vzorku pomocí CCD kamery vyšší než skutečná. Během tohoto experimentu byly pozorovány také nízkofrekvenční oscilace rychlosti hoření, které byly přičítány periodickému praskání vzorku HNF v blízkosti hořícího povrchu.

Louwers a kolektiv také zjistili, že při nízkých hodnotách tlaku (méně než 0,2 MPa) nebyl detekován žádný odraz ultrazvukového signálu, což přisuzovali útlumu ultrazvukového signálu v kondenzované fázi a silné tepelné vlně.



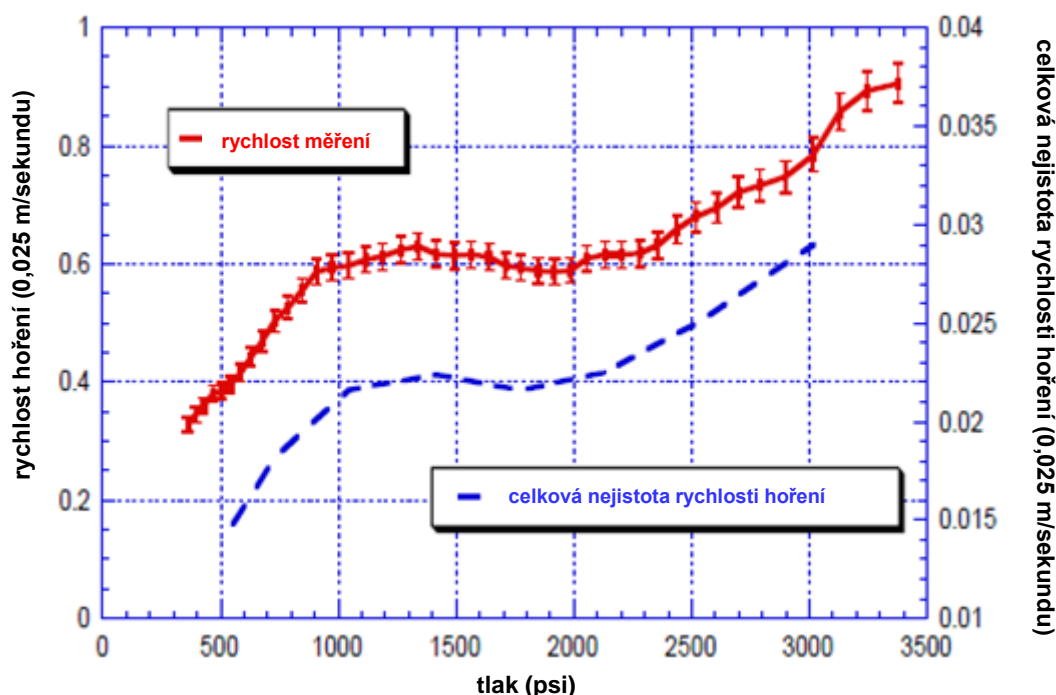
OBRÁZEK 11 – Měření rychlosti regrese ultrazvukovou a optickou metodou [14]

7.1.2.3 USA – UAH [14,25,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45]

Alabamská univerzita v Hunstville (UAH) zakoupila v roce 1995 měřicí zařízení firmy ONERA a na jeho základě vyvinula vlastní ultrazvukový měřicí systém. Tento systém je využíván pro měření v uzavřených, otevřených i tlakově modulovatelných spalovacích komorách. UAH využívá zmíněný systém také pro stanovení balistiky v ustáleném stavu [37], přechodové balistiky [34,36], teplotní citlivosti [44,45] a tlakově závislé charakteristické funkce hoření TPH [34,35,38,39,40]. UAH dále zveřejnila řadu prací zabývajících se nejistotou měření tohoto systému [25,31,32,33,37,41,42,43] a provedla numerická modelování přenosu ultrazvukového signálu skrze TPH a numerická modelování ovlivnění tohoto přenosu hrubostí a tvarem povrchu TPH [25].

V rámci níže popsané výzkumné činnosti UAH byly zkoumány vzorky TPH o složení AP/HTPB dále AP/HTPB/Al a také některá TPH s energetickými pojivy. Typická velikost vzorku TPH byla 30 gramů s balistickou tloušťkou stěny zrna 12 mm. Stanovení teplotní citlivosti bylo prováděno v rozmezí teplot 20 až 60 °C a to i z důvodu, že ultrazvukové sondy pro nižší teploty nebyly pořízeny. Pro stanovení byla použita uzavřená spalovací komora schopná odolat tlaku 34 MPa. Pro zkoušky za konstantního tlaku resp. i pro zkoušky s modulovanými hodnotami tlaku byl využíván regulovaný hořák umožňující periodické vstřikování dusíku.

Obrázek 12 ukazuje typické výsledky ustáleného hoření TPH. Balistická data zde uvedená byla získána v rámci jednoho stanovení. V obrázku jsou vyneseny také nejistoty měření, které silně korelují s průměrnou rychlostí hoření. Detaily ultrazvukového měřicího systému jsou velmi podobné systému používanému společností ONERA, nicméně UAH používá jiný systém kalibrace pro zjištění vlivu teploty a tlaku na rychlost šíření ultrazvukové vlny ve vzorku TPH a v použitých materiálech. Odhad nejistoty měření rychlosti hoření pomocí metody vyvinuté UAH byl 3 %.



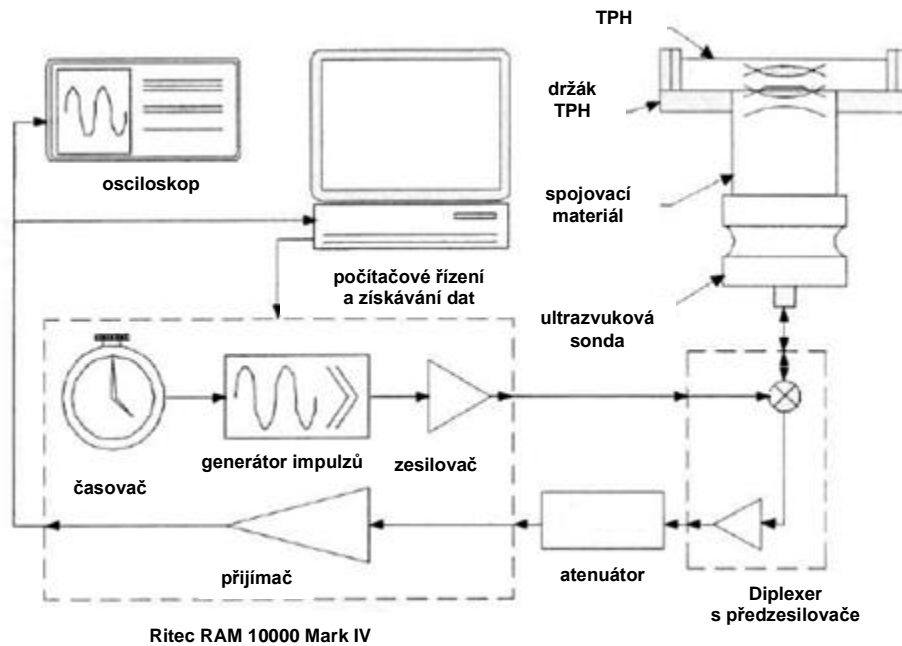
OBRÁZEK 12 – Měření rychlosti hoření vzorku TPH včetně nejistoty měření – UAH [12]

7.1.2.4 USA – UIUC [46,47,48,49]

Illinoiská univerzita v Urbana Champaign (UIUC) vyvíjí ultrazvukový měřicí systém pro výzkum TPH již od roku 1995. Výzkumníci z UIUC využívají tento systém ve spojení s dvěma spalovacími komorami. Jedna z komor je vybavena otočným ventilem a umožňuje modulovat střední hodnotu tlaku v průběhu experimentu. Druhá z komor využívá konfiguraci s „dvojitou tryskou“, kde jedna tryska může být uzavřena, aby během experimentu vznikl monotónní tlakový přechod. Experimenty na výše popsaném zařízení byly prováděny při tlacích do 10 MPa se vzorky o hmotnosti 25 g a balistickou tloušťkou stěny 12 mm.

Ultrazvukový měřicí systém vyvinutý Illinoiskou univerzitou [48] je znázorněn na obrázku 13. Skládá se z 1 MHz ultrazvukové sondy s frekvencí pulzů 10 kHz, i když většina stanovení byla provedena při frekvenci 2,5 kHz. Jako spojovací materiál byla použita „vysokotlaká spojovací linka Panametrics“, která byla se vzorkem TPH propojena pomocí spojovací „pasty“. Zisk a zpracování dat je zcela digitální a doba odezvy se určuje pomocí digitální křížové korelace. To vyžaduje digitalizaci odražených ultrazvukových vln při 25–50 MHz.

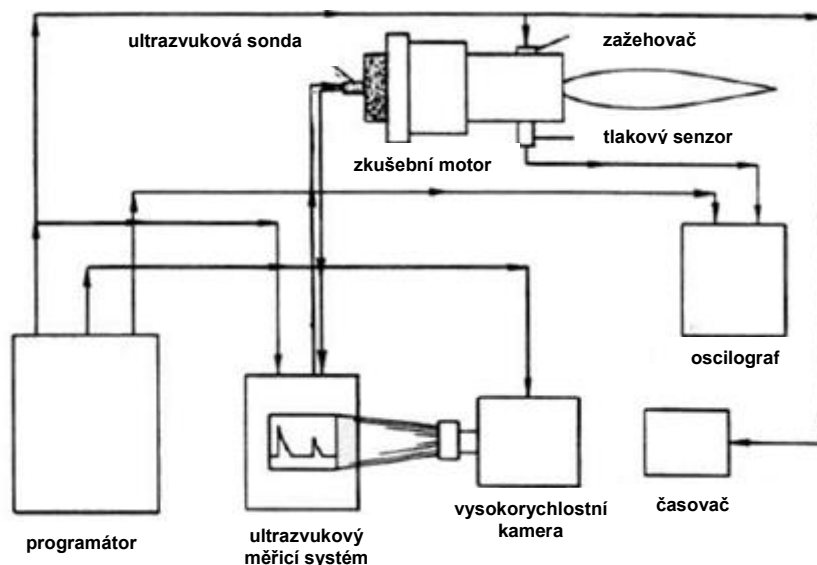
Nedávno publikované studie dokumentují vývoj a aplikaci měřicího systému [50]. Studie prokázaly, že vyvinutý ultrazvukový systém je schopen měřit ustálenou rychlost hoření heterogenních TPH při okolních teplotách, avšak cílem výzkumu bylo měřit také tlakově závislé a přechodové rychlosti hoření TPH [48].



OBRÁZEK 13 – Schematické znázornění ultrazvukového měřicího systému – UIUC [46]

7.1.2.5 USA – VPI/NASA [6,22]

Vědci z výzkumného centra v Langley, NASA [22] a Virginského polytechnického institutu (VPI) [6] se na konci šedesátých let zabývali ultrazvukovým měřením rychlosti hoření TPH. Na obrázku 14 je znázorněn měřicí systém, který byl vyvinut ve spolupráci VPI a NASA a který měřil progresi čelního odhořívání zrna TPH v otevřené spalovací komoře. Z publikované zprávy byla odhadnuta hmotnost vzorku TPH na 2000 gramů a balistická tloušťka stěny 75 mm. Zaznamenaná teplota plamene byla 4000 °F, což naznačuje použití dvousložkové TPH. Tlak v otevřené spalovací komoře byl v rozmezí 2 až 7 MPa a žádná speciální úprava teploty nebyla ve zprávě zmíněna.



OBRÁZEK 14 – Schematické znázornění ultrazvukového měřicího systému vyvinutého VPI/NASA [22]

Měřicí systém se skládal z ultrazvukové sondy, generátoru pulzů, zesilovače a synchronizátoru. Spojení mezi vzorkem TPH a ultrazvukovou sondou bylo zajištěno akustickou distanční tyčí. Výsledný průběh ultrazvukového signálu byl zobrazen pomocí katodové trubice, která byla snímána vysokorychlostní kamerou. Frekvence sběru dat byla 130 vzorků za vteřinu a přesnost měření vzdálenosti 0,025 mm.

7.1.2.6 Nečlenské státy NATO – Indie [50]

Výzkumníci ve Vikram Sarabhai Space Centre v Indii uveřejnili studii o aplikaci ultrazvukové měřicí techniky v prostředí zmenšené spalovací komory a zmenšeného raketového motoru. Měřicí systém byl vyvinut laboratořemi TNO Prins Maurits (Nizozemsko) [51]. Publikované výsledky byly získány s použitím TPH na bázi AP/HTPB/Al s obsahem 18 % hliníku, balistické tloušťce stěny zrna 40 mm a tlacích do 2 MPa. Jako spojovací prostředí byl použit PMMA. Pro měření byla použita 2,25 MHz ultrazvuková sonda schopná emitovat vlny s frekvencí 0,5 až 5 kHz. Doba odezvy odražené vlny je určena elektronicky a zaznamenána do počítače. Autoři studie dospěli k závěru, že uvedená měřicí technika překonává potřeby zkoušek samostatných vzorků TPH či zkoušek pomocí balistických motorů pro charakterizaci rychlosti hoření, jelikož jejím cílem bylo dosáhnout přesnosti měření ± 1 %.

Materiál spojovacího prostředí musí být připraven velmi pečlivě, aby bylo dosaženo dobré ozvěny ultrazvukových vln. Produktivita metody může být zvýšena snížením počtu zkušebních vzorků a hmotnosti jednotlivých zrn, jelikož rychlost hoření je možné získat pouze z jednoho (dvou) zkoušek provedených při velkém rozsahu tlaků. Francouzský výrobce TPH firma SNPE se v současnosti zabývá možnou aplikací tohoto měřicího zařízení v průmyslové praxi.

7.2 RTG záření

7.2.1 Obecný popis měření

Rentgenového záření je při prostupu vzorkem zeslabováno v závislosti na tloušťce a chemickým vlastnostem materiálu vzorku. Tato závislost je popsána následující rovnicí:

$$I = \frac{I_0}{R_S^2} \exp \left[\sum_{i=1}^n u_i l_i \right] \quad (4)$$

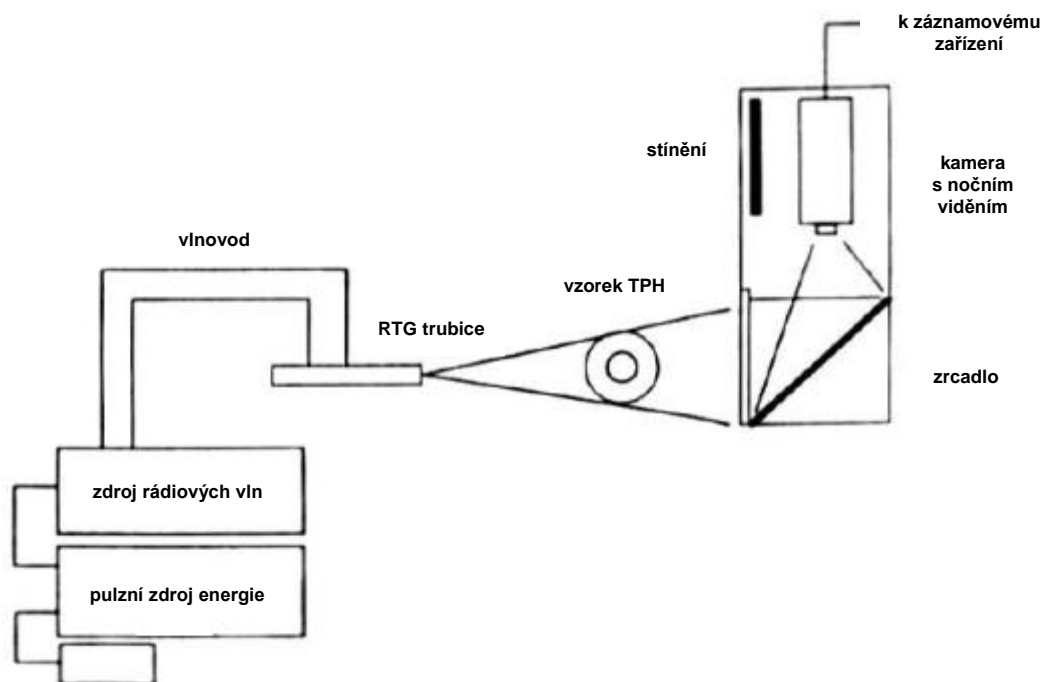
kde	I	-	intenzita záření propuštěné vzorkem,
	I_0	-	intenzita vstupního záření ve vzdálenosti 1 metr od zdroje záření,
	R_S	-	vzdálenost od zdroje záření ke sběrnému místu/detektoru,
	u_i	-	absorpční koeficient daného materiálu,
	l_i	-	délka dráhy, kterou záření prochází skrze materiál.

Výše uvedená rovnice vychází z modelu, který předpokládá, že dochází k lineárnímu útlumu rentgenového záření, jenž je funkcí jak energie zdroje záření, tak chemického složení materiálu, kterým záření prochází. Tento model umožňuje použití dvou přístupů k určení polohy hořícího povrchu vzorku TPH.

V prvním přístupu souvisí změna intenzity prošlého záření s balistickou tloušťkou stěny zrna TPH. V tomto případě je směr paprsku RTG záření kolmý k hořícímu povrchu

TPH. Při spalování TPH je pak prošlé záření stále méně a méně zeslabováno. S použitím vzorků TPH o známé tloušťce stěny zrna, lze sestavit i kalibrační křivku.

V druhém přístupu je směr RTG záření paralelní k hořícímu povrchu TPH a profil prošlého záření má tak ostrý gradient v poloze odpovídající rozhraní TPH/plynné produkty spalování. Základní konfigurace zkušebního zařízení vyvinuté společností AEDC (AEDC RTR) je uvedena na obrázku 15. Zařízení se skládá ze zdroje RTG záření (výbojka či lineární urychlovač), zkušebního vzorku, převodníku RTG záření na záření viditelné a ze záznamového zařízení (fotografický film, či videozáznam). Toto uspořádání umožňuje získat 2D obraz vnitřní struktury raketového motoru v průběhu hoření TPH. Přesná poloha hořícího povrchu TPH se interpretuje na základě hustotních gradientů či „okrajů“ na fotografickém filmu popř. digitálním záznamu.

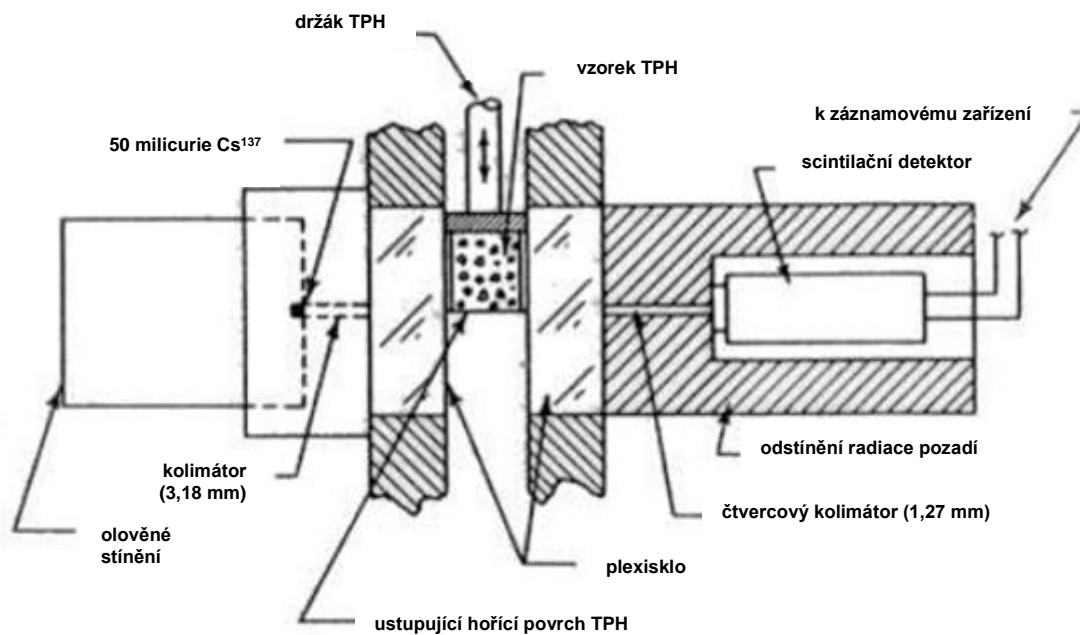


OBRÁZEK 15 – Schematické znázornění konfigurace přístroje pro stanovení rychlosti hoření TPH pomocí paralelně procházejícího RTG záření (AEDC RTR) [31]

7.2.2 Příklady použití a výsledků

7.2.2.1 Celková transmisie – USA, Purdueova univerzita [50]

Klasický experiment, který provedl Osborn a kolektiv [52], využil radioaktivní zdroj RTG záření k měření vývoje hořícího povrchu TPH jako funkce tlaku a průtokové rychlosti. Z obrázku 16 je patrné, že radiační kolektor měřil celkovou transmisí záření skrze zkušební komoru. Jak vzorek TPH hořel, víc a víc záření prošlo komorou. Poloha hořícího povrchu TPH jako funkce času je určena korelací mezi intenzitou prošlého záření a tloušťkou stěny TPH. Použití radioaktivního zdroje RTG záření činí nicméně tuto metodu nevhodnou pro laboratorní použití.



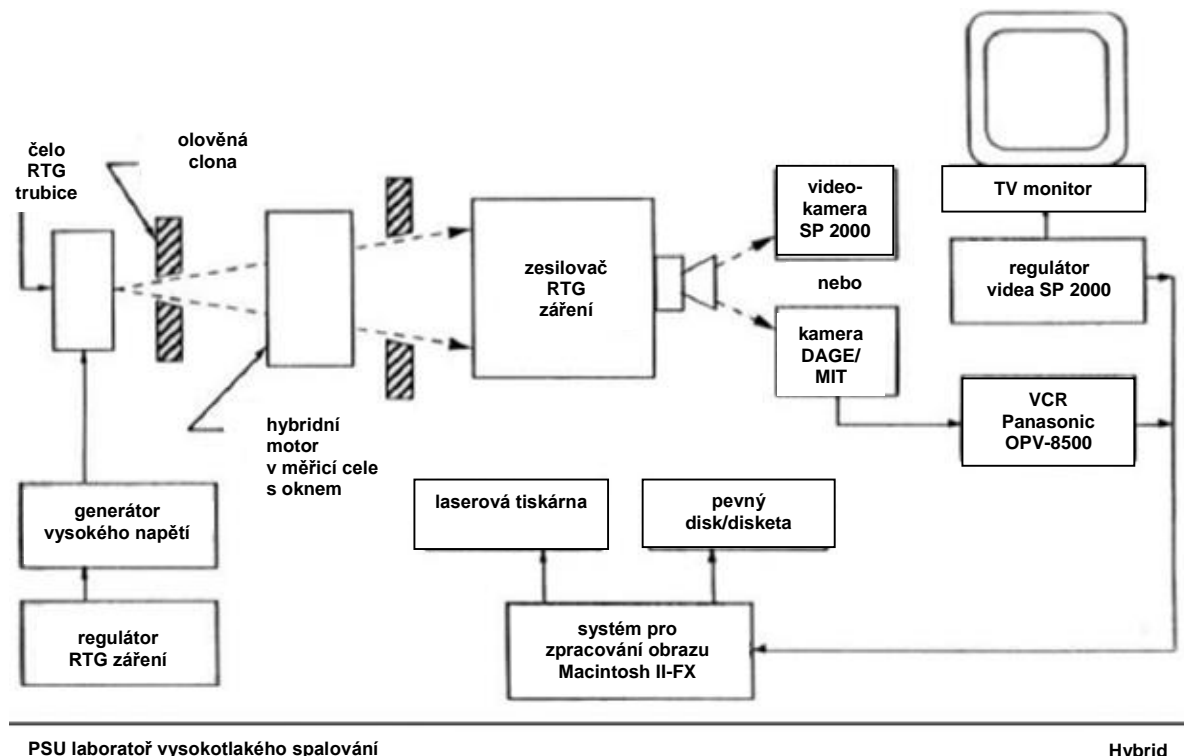
OBRÁZEK 16 – Schematické znázornění konfigurace experimentu s radioaktivním zdrojem RTG záření [52]

7.2.2.2 Záznam na film – USA – Wiley [54], Purdueova univerzita [55,56,57], NASA [53] a AEDC

Raná práce publikovaná vydavatelstvím Wiley [54] demonstrovala použití přenosného systému schopného v reálném čase zaznamenat sled obrazců prostupujícího záření. Tento systém využíval zesilovač obrazu k přeměně prostupujícího RTG záření na viditelné světlo, které poté vstupovalo do kamery, což umožnilo sledovat vývoj a případné anomálie hořícího povrchu TPH v reálném čase. NASA sponzorovala vývoj pulzní radiografie pro pozorování regrese povrchu TPH během chodu raketového motoru. Za použití 150 kV zábleskového zdroje rentgenového záření vyráběného společností Field Emission Corporation a dvou dodavatelů fotografického filmu, byly na tento film zaznamenány snímky hořícího povrchu zrna TPH o průměru 5 cm s čelním odhoříváním. Použitá frekvence impulznů 8 pulzů/s a délka trvání (10 pulzů) jsou omezeny schopnostmi zdroje energie a nárůstem tepla uvnitř rentgenové trubice. Presley a spol. [55,56] demonstroval použití superpozice snímků (získaných ze dvou RTG pulzů) na jeden fotografický film pro stanovení parametrů erozivní rychlosti hoření. Toto stanovení bylo provedeno na AEDC v rámci Presleyho disertační práce s odhadem nejistoty měření rychlosti hoření 3 % [57].

Britské královské letectvo použilo zkušební zařízení RTR pouze v omezeném rozsahu při studiích erozivního hoření TPH [58,59]. V rámci zkoušek bylo provedeno měření parametrů erozivního hoření v konvenčních motorech [58] a v motorech bez trysek, ovšem s omezeným úspěchem především v důsledku tloušťky stěn motorů. Velká Británie uvádí, že výsledky měření erozivních účinků hoření přímo v motorech získané pomocí RTR jsou „zklamáním“.

Pensylvánská státní univerzita (PSU) publikovala studie o laboratorním použití RTR [60,61]. Na PSU je zařízení používáno k měření regrese hybridních pohonných hmot v laboratorním deskovém hořáku. Okamžitá rychlost hoření hybridního paliva v hořáku je měřena pomocí zdroje RTG záření (Phillips model MCN 321). Prošlé záření je zachyceno pomocí zesilovače (Precise Optics model PI 2400 ATF). Publikované studie uvádí prostorové rozlišení řádově 140 mikrometrů. Schematické znázornění RTR zařízení používaného PSU je na následujícím obrázku.



OBRAZEK 17 – Schematické znázornění RTG zařízení používaného Pensylvánskou státní univerzitou

Pro studium chování tuhých pohonných hmot je využívána celá škála konfigurací RTG záření. Motivací obecně bylo a je kvalitativní sledování dynamických dějů uvnitř raketových motorů. Získat údaje o rychlosti hoření TPH pomocí RTG záření je možné, překážkou je však relativní nákladnost těchto metod a časově náročná interpretace dat. Rutinní použití RTG diagnostiky je však i přesto dobrým příslibem do budoucna, vyžaduje nicméně speciálně navržené raketové motory, jejichž stěny umožní přenos RTG záření a také vývoj automatizovaných nástrojů pro zpracování obrazu. Prozatím je použití RTG metod omezeno na pozorování specifických a neobvyklých dějů v průběhu hoření TPH či na oblast výzkumu.

7.3 Mikrovlnné záření

7.3.1 Obecný popis měření

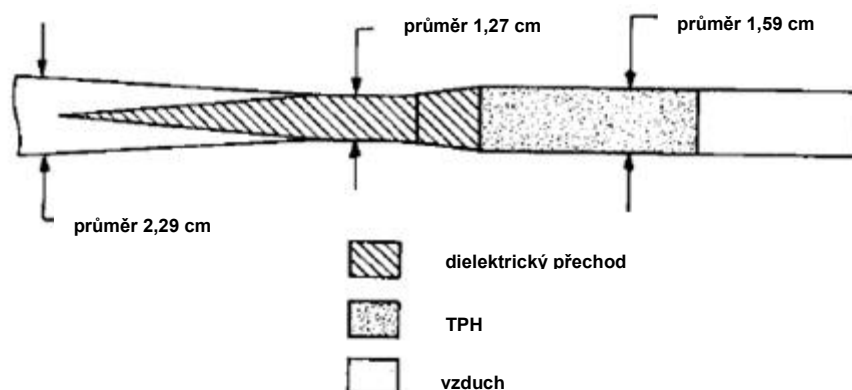
Principem metody je šíření elektromagnetických vln (o frekvenci až 10 GHz) v materiálech schopných tyto vlny absorbovat. Zdroj mikrovlnného záření generuje elektromagnetické vlnění, které vstupuje do měřeného vzorku TPH a následně se odráží na jeho hořícím povrchu, z důvodu vysokého rozdílu elektrické impedance vzorku TPH a plyných produktů hoření. V důsledku rozdílných dielektrických vlastností plyných produktů hoření a vzorku TPH se elektromagnetická vlna může šířit vzorkem TPH, nikoli však produkty hoření. Postup hoření povrchu TPH vede

ke změnám fáze odraženého vlnění, což se poté využívá ke stanovení rychlosti hoření TPH. Metody využívající mikrovlnného záření mají mnoho stejných výhod i nevýhod jako metody ultrazvukové. Ultrazvukové metody využívají ultrazvukových vln a mikrovlnné metody elektromagnetického vlnění. Na rozdíl od ultrazvukových technik, které stanovují rychlost hoření z odrazu vlnění procházejícího nejprve spojovacím materiálem a vzorkem, musí u mikrovlnných metod být elektromagnetické záření namířeno přímo na hořící povrch TPH. Toto uspořádání může mít nepříznivé účinky na odraz vlnění od plynných produktů spalín a může vést k možné nespolehlivosti měření.

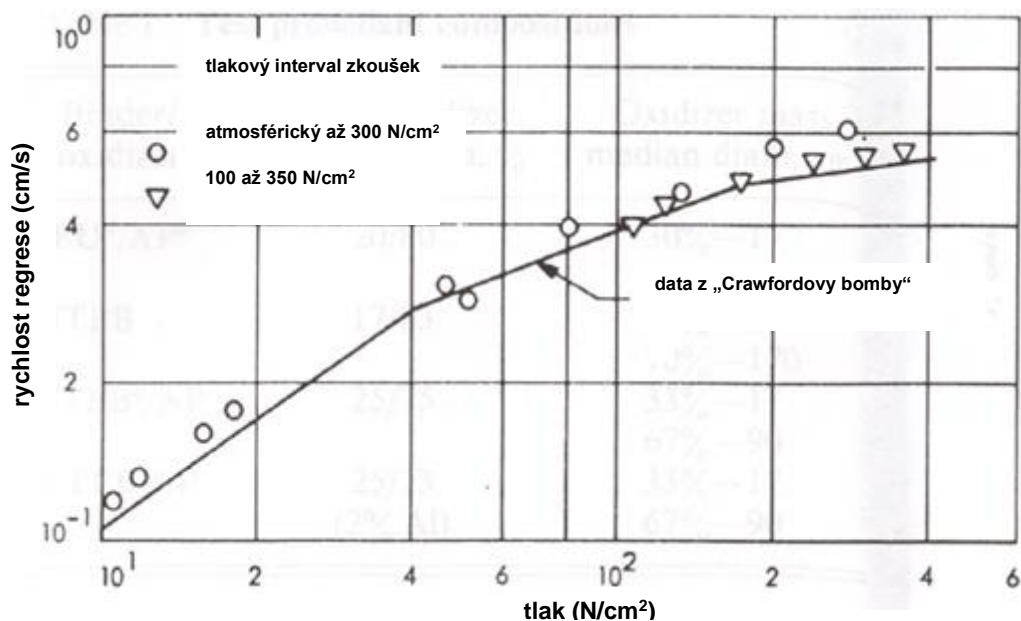
7.3.2 Příklady použití a výsledků

7.3.2.1 USA – laboratoř proudového pohonu [62,63,64]

Na začátku sedmdesátých let vyvinul Strand a jeho tým [62] v laboratoři proudového pohonu mikrovlnnou techniku pro studium tlakově závislé reakční funkce tuhých pohonných hmot, která představuje vyjádření vlivu dynamických tlakových oscilací na rychlost regrese hořícího povrchu TPH. Ve dvou rozdílných experimentech zaměřených na stanovení přechodové rychlosti hoření byl využit Dopplerův jev. Konkrétně šlo o experimenty využívající spalovací komoru s možností rapidního snížení tlaku resp. vysokofrekvenční komoru s „T-hořákem“. V obou případech byly vzorky TPH uzavřeny v ocelových trubkách, které sloužily jako vlnovody pro mikrovlnné záření. Aby došlo k minimalizaci nespojitosti na dolním rozhraní vzorku TPH, byl mezi vzorek a obdélníkový vzduchem naplněný vlnovod vložen dlouhý kužel z plastu s dielektrickými vlastnostmi podobnými vlastnostem zkoumané TPH (tzv. dielektrický přechod), jak je uvedeno na obrázku 18. Bylo předběžně ověřeno, že v hrubém rozsahu rychlosti regrese typického vzorku TPH, zůstává hořící povrch TPH vůči mikrovlnnému signálu planární. Byly zkoušeny různé heterogenní TPH na bázi AP, poslední vzorek i s obsahem hliníku (2 %). Získané výsledky kvazi-ustálené přetlakové zkoušky (hořící vzorek TPH natlakuje spalovací komoru) jsou uvedeny na obrázku 19 a byly srovnány s výsledky získanými v „Crawfordově bombě“. Shoda výsledků je docela slušná, avšak v případě stanovení neustáleného hoření poskytuje mikrovlnná technika nereálné výsledky, které byly připisovány vlivu plamenové ionizace.

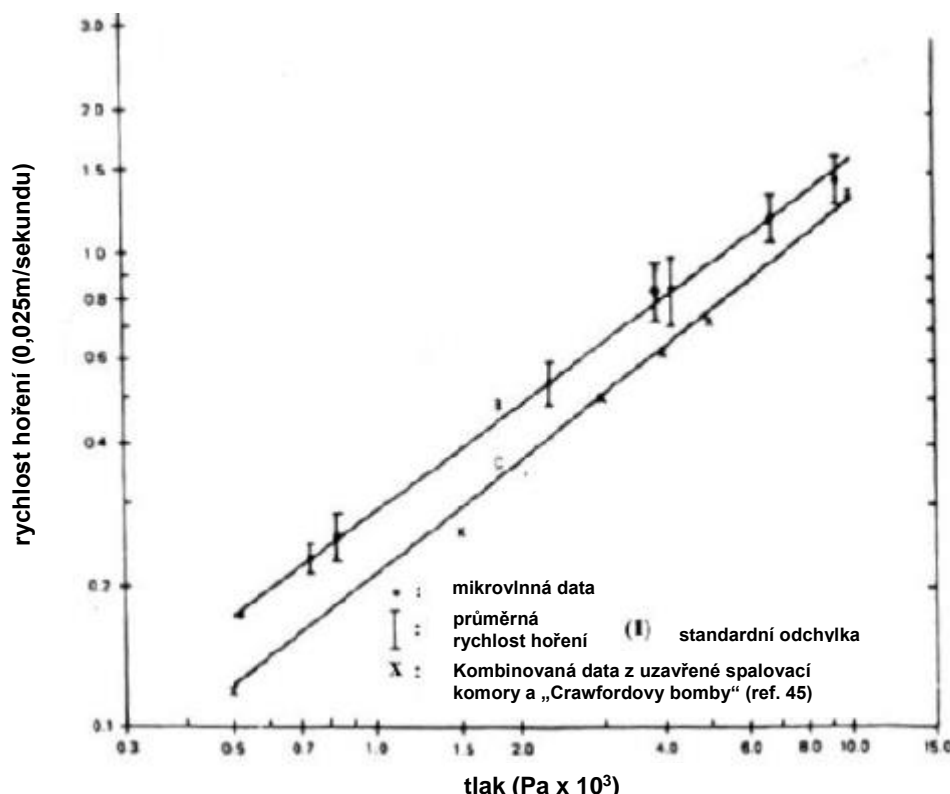


OBRÁZEK 18 – Schematické znázornění prostředí, kterým prochází mikrovlnné záření [62]



OBRÁZEK 19 – Srovnání hodnot regresní rychlosti získaných pomocí metody využívající mikrovlnného záření s hodnotami získanými v „Crawfordově bombě“ [62]

V sedmdesátých letech Russel [63] vyvinul další systém využívající mikrovlnné záření k měření vlivu rapidního nárůstu tlaku na rychlost hoření bezdýmných prachů, který využívá diferenciálního systému dvojitého hnacího motoru k oddělení vlivu spalování TPH od jeho mechanické odezvy. U tohoto systému byly zaznamenány značné problémy při měření rychlosti hoření v neustáleném stavu, avšak u předběžných měření v kvazi-ustáleném stavu byly získány signifikantní výsledky kvalitativně shodné s referenčními údaji získanými v uzavřené spalovací komoře a „Crawfordově bombě“ (viz obrázek 20).

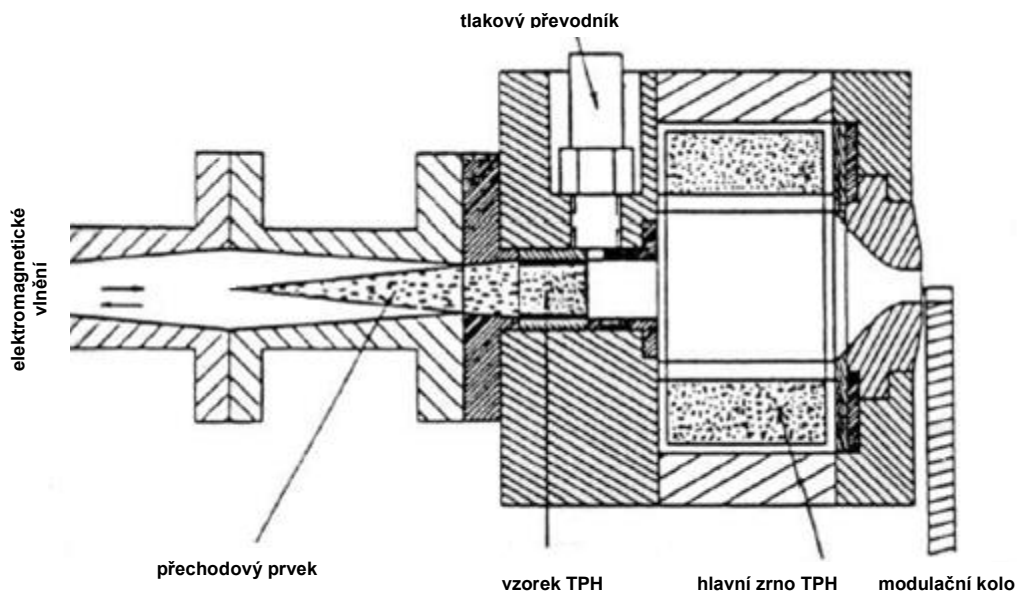


OBRÁZEK 20 – Shoda výsledků mezi mikrovlnným systémem [63], uzavřenou spalovací komorou a „Crawfordovou bombou“

7.3.2.2 Francie – ONERA [27]

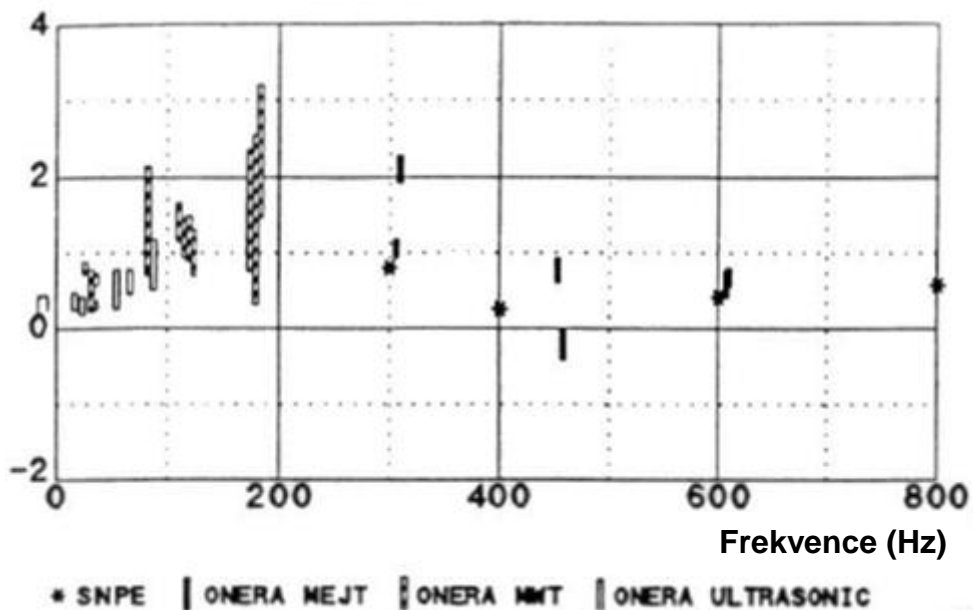
Společnost ONERA vyvinula v 70. a 80. letech malou spalovací komoru v kombinaci s mikrovlnnou technikou pro měření tlakově závislé reakční funkce. Metoda byla úspěšně použita pro stanovení nízkofrekvenční reakční funkce u TPH s obsahem i bez obsahu kovů, které byly používány ve zkušebním programu u zmenšených raketových motorů pro posouzení stability přídavných raketových motorů na pevné palivo pro Ariane 5.

Experimentální uspořádání využívá metodu vzorkem generované modulace spalin ve výfukové (výstupní) trysce, kterou společnost ONERA používá již od šedesátých let. Provozního tlaku se dosahuje pomocí „hlavního“ zrna TPH (bez obsahu kovů) a modulačního kola, které částečně a periodicky uzavírá hrdlo trysky a vytváří tak tlakové výkyvy. Mikrovlnné záření je vysíláno na hořící povrch skrze kuželový přechodový prvek, jenž musí být vyladěn podle dielektrických vlastností zkoumané TPH. Schéma kompletního uspořádání je uvedeno na obrázku 21. Specifický homodynní vysílač-přijímač spojený s můstkem reflektometru byl navržen tak, aby bylo možné získat informaci o stálých i nestálých složkách fázového posunu mezi dopadající a odraženou vlnou, z kterých se poté určuje reakční funkce. Jako nezbytná se ukázala nutnost kalibrace pomocí „studeného“ průtoku plynu zabraňující nedokonalému spojení přechodového prvku s TPH. Během let výzkumu byl také vyvíjen a aktualizován ad-hoc software. Příklad reakční funkce získané mikrovlnnou technikou je uveden na obrázku 22, který také demonstruje, že výsledky jsou v dobré shodě s výsledky získanými organizacemi ONERA a SNPE pomocí nepřímých měřících metod při vyšších frekvencích.



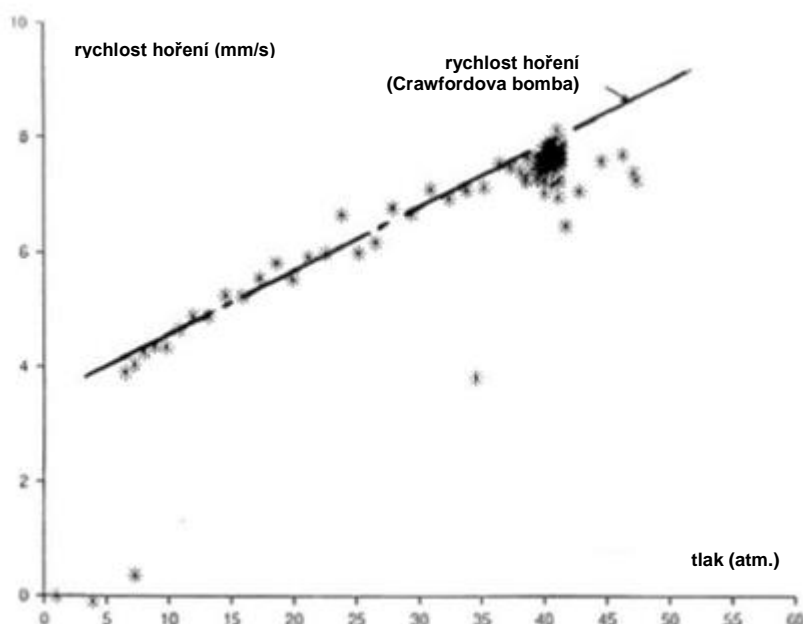
OBRÁZEK 21 – Schematické uspořádání měřicího zařízení společnosti ONERA

Reálná část reakční funkce



OBRÁZEK 22 – Tlakově závislé reakční funkce pro TPH nosné rakety Ariane 5

Ačkoli výše zmíněná technika byla použita pro měření rychlosti hoření v neustáleném stavu, bylo mimoděk zjištěno, že je vhodná i pro stanovení rychlosti hoření TPH v ustáleném stavu. Obrázek 23 ukazuje výsledky získané při zkouškách provedených při stálých hodnotách tlaku (kolem 4 MPa). Výsledky ukazují jasnou shodu se standardním zákonem rychlosti hoření TPH (Crawfordova bomba).

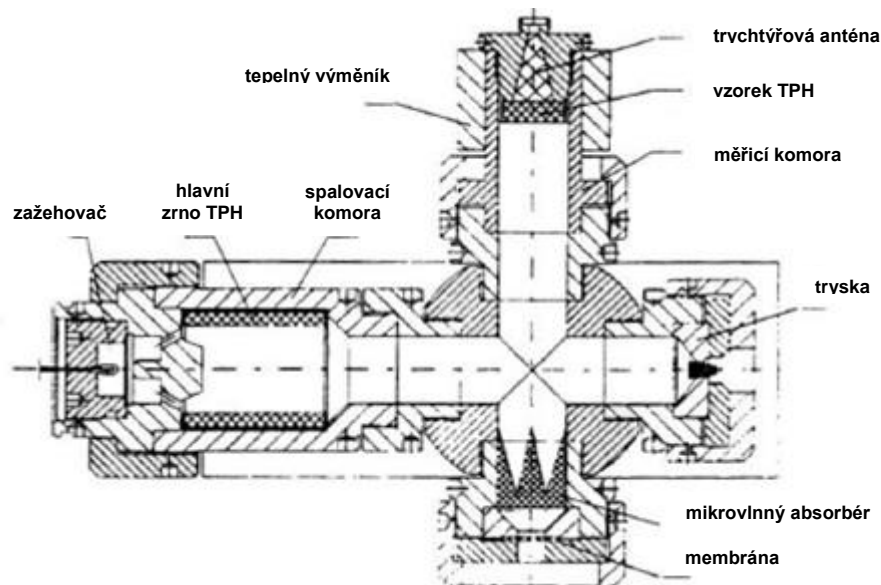


OBRÁZEK 23 – Závislost rychlosti hoření na tlaku získaná mikrovlnnou měřicí technikou

7.3.2.3 Srbsko – Bělehradská univerzita [65]

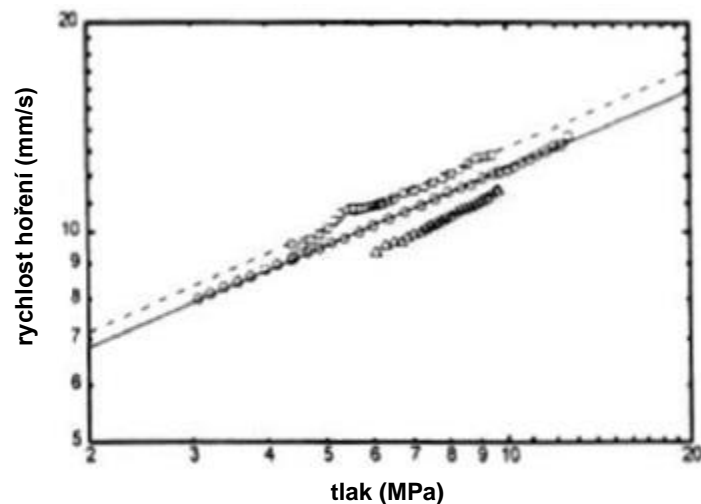
V článku publikovaném v časopise „Journal of Propulsion and Power“ [65] byly uvedeny výsledky získané s použitím experimentálního zkušebního motoru a mikrovlnného reflexního interferometru. Cílem uveřejněné práce bylo vyvinout metodu pro rychlé, přímé a nepřetržité měření rychlosti hoření TPH při různých teplotách za laboratorních podmínek podobných těm, které jsou typické pro provoz běžných raketových motorů.

Uspořádání zkušebního motoru je uvedeno na obrázku 24. Tento motor se podobá motoru, který při svých experimentech používá společnost ONERA. I zde je vzorek umístěn ve vlnovodu za plastovým přechodovým prvkem s dielektrickými vlastnostmi podobnými TPH a spalovací komora je natlakována spaliny vzniklémi hořením „hlavního“ zrna TPH. Toto zrno hoří progresivně, což zajišťuje kontinuálnost jeho hoření při různých tlacích, přičemž poměr mezi horní a dolní hodnotou tlaku může být až 1:4. Zkušební motor je konstruován tak, aby umožňoval dosažení teploty, tlaku a rychlosti proudění spalin TPH podobné těm, kterých se dosahuje v raketových motorech s čelním odhoříváním zrna TPH.



OBRÁZEK 24 – Uspořádaní zkušebního motoru – Bělehradská univerzita [65]

Vše od zahájení zkoušky přes její monitorování, sběr, redukce a vyhodnocení dat je prováděno pomocí osobního počítače. Byla provedena spousta zkoušek s heterogenními i dvousložkovými TPH při počátečních teplotách v rozmezí 248 K až 323 K a v rozsahu tlaků min. 2 MPa (pro každý experiment). Příklad výsledků pro heterogenní TPH je uveden na obrázku 25. Výsledky prokázaly, že metoda je přinejmenším tak přesná jako jiné klasické metody.



--	$T=248\text{ K}$	$n=0.427$	$b=1.18 \cdot 10^{-5}$	$\Delta Q=0.33\%$
—	$T=293\text{ K}$	$n=0.366$	$b=3.41 \cdot 10^{-5}$	$\Delta Q=0.47\%$
.....	$T=323\text{ K}$	$n=0.379$	$b=2.91 \cdot 10^{-5}$	$\Delta Q=1.04\%$

OBRÁZEK 25 – Stanovení rychlosti hoření mikrovlinnou měřicí technikou – Bělehradská univerzita [65]

7.3.3 Hodnocení metody

Mikrovlnná měřicí metoda je aplikována především pro stanovení reakční funkce v závislosti na tlaku a to v USA a Francii. Tato technika vyžaduje značně specifické nastavení a uspořádání měření, které není použitelné pro standardní metody měření rychlosti hoření TPH. Pokud příprava vzorku a softwarové vyhodnocení dat proběhlo pečlivě, byly výsledky získané mikrovlnnou technikou, jak pro hoření v ustáleném i neustáleném stavu, považovány za uspokojivé. Hlavní nevýhodou této techniky je nicméně nutnost pořízení nákladného vybavení a zdlouhavý výcvik technického personálu. Metodu je tedy třeba považovat spíše za výzkumný a nikoli průmyslově použitelný nástroj pro stanovení rychlosti hoření TPH.

V rámci studie [65] bylo navrženo také konvenční použití mikrovlnné techniky, konkrétně pro stanovení rychlosti hoření v ustáleném stavu při různých hodnotách tlaku a počáteční teploty, kdy mikrovlnná měřicí technika poskytovala velmi uspokojivé výsledky. Tato technika má tu výhodu, že poskytuje reprezentativní výsledky pro skutečné podmínky, které panují ve zmenšených raketových motorech. Povzbudivým faktem do budoucna je také použití relativně jednoduchých zařízení a softwaru.

7.4 Kapacitní plazmové snímače

7.4.1 Obecný popis měření

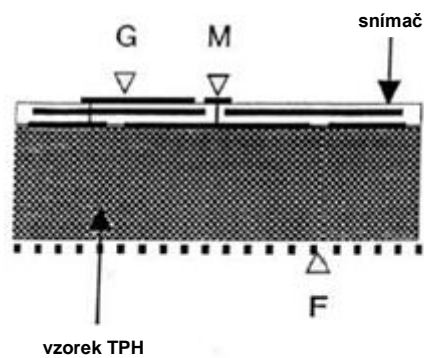
Technika využívající plasmových kapacitních snímačů byla vyvinuta během 80. a 90. let v USA a Francii především k měření eroze izolace raketových motorů. Tato technika využívá změn elektrické kapacity v čase, která přímo souvisí se změnou tloušťky materiálu (vzorku) mezi dvěma elektrodami. První elektroda je umístěna podél komory raketového motoru, druhou elektrodu pak tvoří plazma generované spaliny vzniklémi při hoření TPH.

Touto technikou bylo provedeno měření eroze izolace zmenšených i nezmenšených raketových motorů (startovních i letových). Základní výhodou této techniky spočívá v její schopnosti měřit a poskytovat relevantní výsledky i u materiálů, ve kterých je šíření RTG či ultrazvukového záření velmi obtížné.

7.4.2 Příklady použití a výsledků

7.4.2.1 Francie – ONERA [66]

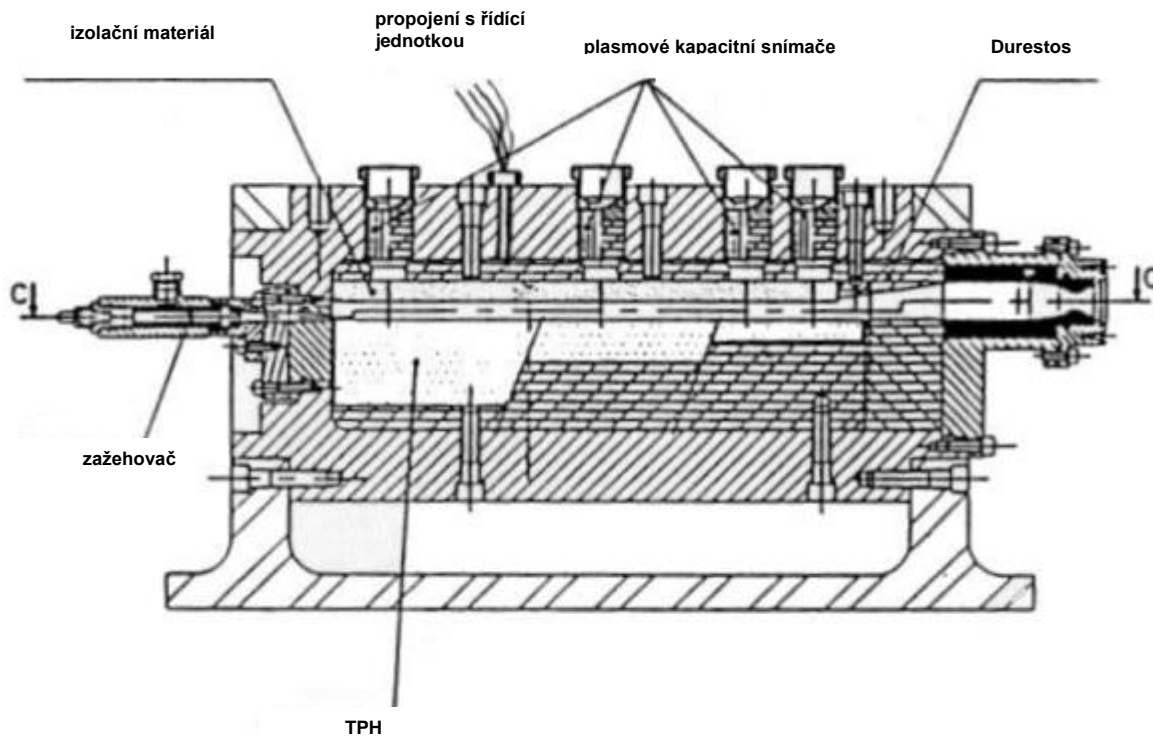
V 90. letech vyvinula společnost ONERA řadu kapacitních snímačů pro měření eroze izolace u zmenšených motorů. Obrázek 26 ukazuje řadu pevných (pro čelní odhořívání a desková zrna) a tvarovatelných (pro cylindrická zrna) kapacitních snímačů. Před každou zkouškou byla prováděna pečlivá kalibrace na různých vzorcích izolačních materiálů.



- M : měřicí elektroda
- G : kontrolní elektroda
- F : fiktivní elektroda

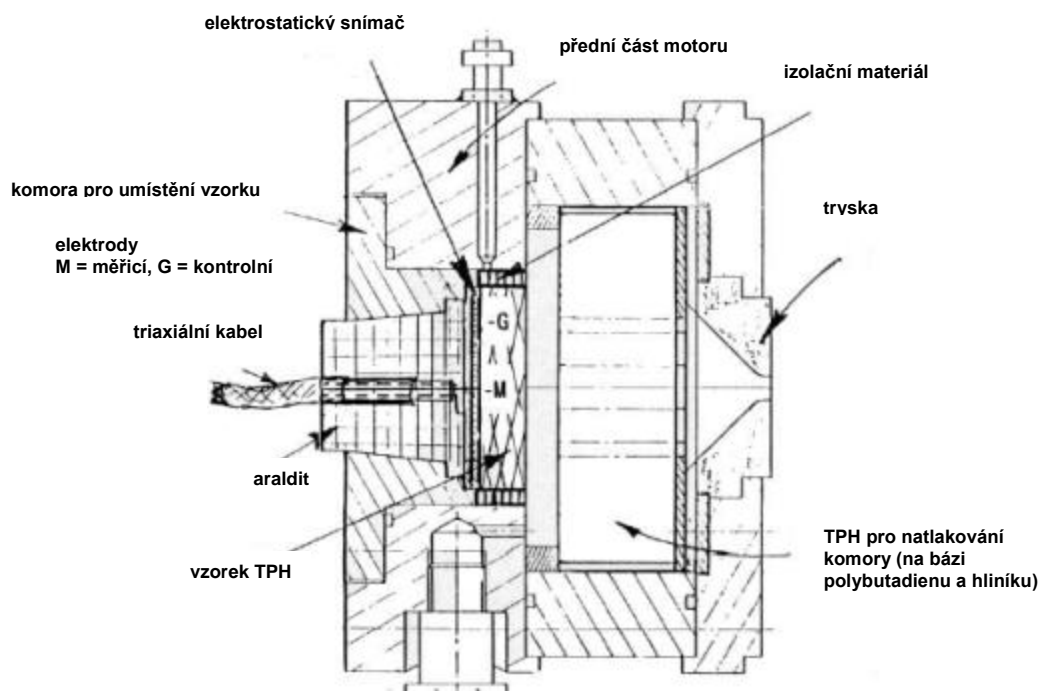
OBRÁZEK 26 – Plazmové kapacitní snímače společnosti ONERA [65]

Obrázek 27 ukazuje dva režimy eroze, které byly pozorovány pomocí 4 plazmových kapacitních snímačů u dvourozměrného hoření raketového motoru. V zadní části motoru, kde v důsledku toku spalin dochází ke smetení uhlíku z povrchu izolace, byla pozorována velmi dobrá shoda mezi erozí stanovenou pomocí plazmových kapacitních snímačů a erozí odvozenou na základě pozorování po odpálení. V přední části raketového motoru, kde vrstva uhlíku na povrchu izolátoru zůstává zachována, je však shoda mnohem horší.

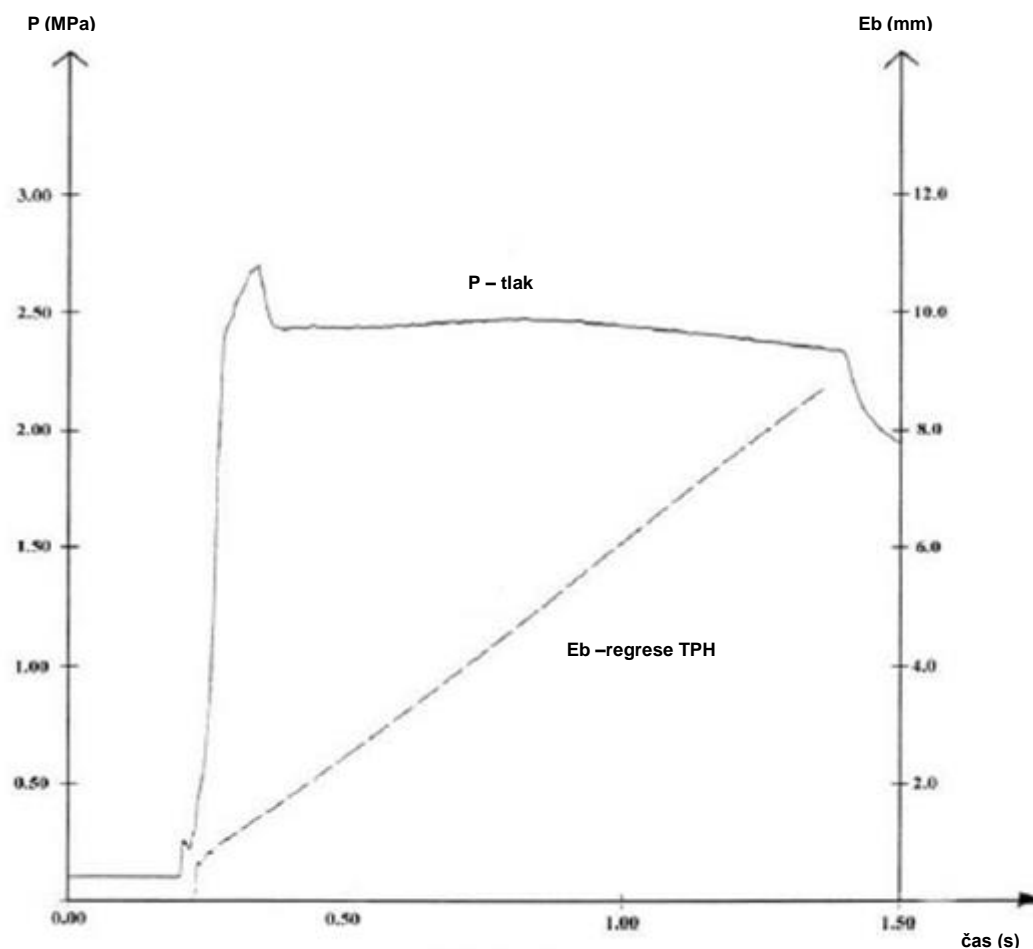


OBRÁZEK 27 – Aplikace plazmových kapacitních snímačů společnosti ONERA v raketovém motoru s dvourozměrným hořením TPH [66]

Na základě výše uvedených pozorování se předpokládalo, že přímá aplikace pro stanovení rychlosti hoření zrna TPH bude u metody společnosti ONERA možná bez nutnosti větší modifikace experimentálního uspořádání. Ověřovací pokus byl proveden s využitím malého raketového motoru, který obsahoval vzorek TPH (tloušťka stěny 10 mm), vrstvu izolačního materiálu o tloušťce 4 mm a zrno TPH pro natlakování komory raketového motoru, viz obrázek 28. Pro měření rychlosti hoření TPH byla standardně používaná ultrazvuková sonda nahrazena plazmovým kapacitním snímačem. Typické časové průběhy tlaku a napětí plazmového kapacitního snímače (převáděno na regresi stěny TPH) jsou uvedeny na obrázku 29. Hoření vzorku TPH je ukončeno v čase 1,4 s. Po uplynutí této doby je eroze izolačního materiálu určena napětím na plazmovém kapacitním snímači. Správnost měření pomocí plazmového kapacitního snímače byla ověřena jeho kalibrací na místě. S využitím kalibrace snímače na místě (in-situ), bylo správné měření rychlosti hoření sledáno v poměrně dobré shodě se standardní rychlostí hoření pohonné hmoty.



OBRÁZEK 28 – Aplikace metody společnosti ONERA v malém raketovém motoru [66]



OBRÁZEK 29 – Časový průběh tlaku a napětí (vyjádřeno jako regrese TPH) u metody společnosti ONERA [66]

7.4.3 Hodnocení metody

Metoda plasmových kapacitních snímačů je primárně využívána pro měření eroze izolačního materiálu. Jakkoli je tato metoda úspěšná, bylo prokázáno, že některé režimy eroze vytvářejí na povrchu izolačního materiálu vrstvu uhlíku, která přesnost metody omezuje. U TPH, kde k tomuto jevu nedochází, se metoda plasmových kapacitních snímačů zdá být stejně vhodná jako použití ultrazvukových sond. První výzkumné pokusy provedené ve Francii se v tomto ohledu zdají být velmi slibné. Zbývá však udělat ještě spoustu práce, zejména v oblasti pochopení vlivu teplotní citlivosti na elektrické vlastnosti TPH a dalších technologických problémů. Očekává se také, že metoda plasmových kapacitních snímačů by mohla být velmi levná a méně omezující, co se týká měření různých typů TPH, než metoda ultrazvukových sond, neboť u metody plasmových kapacitních snímačů není nutné používat žádný spojovací materiál.

V Itálii byla také zkoušena alternativní metoda založená na využití deskového kondenzátoru. Tato technika, která je stále ve fázi vývoje, je použitelná pouze pro TPH bez obsahu kovů a je omezena pouze na měření za atmosférického tlaku. V současnosti nelze činit adekvátní závěry o použitelnosti této metody pro standardní měření rychlosti hoření TPH.

7.5 Akustická emise

7.5.1 Obecný popis měření

Při hoření heterogenních TPH dochází v důsledku rozkladu částic oksylichovadla k emisi vysokofrekvenčních zvukových vln. Připojením snímače akustické emise ke spalovací komoře či raketovému motoru je možné zachytit akustický signál, který se emituje a přenáší ve vzorku TPH. Vzorek TPH s našroubovaným zažehovačem (žhavicí spirála) je umístěn do teplotní lázně (voda či jiná kapalina), popřípadě inhibován dusíkem a spálen na vzduchu. Získaný signál je integrován na efektivní amplitudu zvuku, která dobře koreluje s dobou hoření. Tento integrovaný signál zapíná stopky na začátku a vypíná na konci doby hoření TPH a lze tedy určit dobu trvání hoření. V některých případech se ve stěně zrna TPH vytvoří malé zářezy, jejichž přítomnost vede k prudkému nárůstu efektivní amplitudy zvuku. Metoda akustické emise je považována za rychlou a spolehlivou techniku pro stanovení doby hoření TPH.

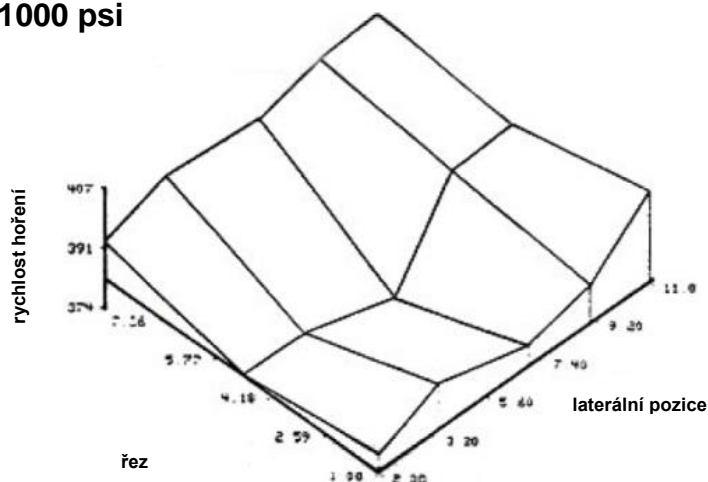
7.5.2 Příklady použití a výsledků

7.5.2.1 USA [67,68,69]

Metoda akustické emise byla použita k měření rychlosti hoření u stovek různých vzorků TPH. K určení balistických vlastností a vlivu tvaru litého zrna na rychlost hoření TPH bylo v rámci jedné studie proměřeno okolo 400 vzorků heterogenních TPH. Získem co největšího množství informací metodou akustické emise (analýzou akustického signálu) se pak zabývala následující studie [69].

Na obrázku 30 je uveden příklad výsledků pro trojsložkovou TPH, získaných z horní části litého zrna. Každý vzorek byl pečlivě rozřezán a označen podle umístění v původním zrně. Výsledky ukazují, že v centrální části zrna dochází k poklesu rychlosti hoření. Jedná se o obecný trend pozorovaný u většiny litých TPH, přičemž nebyly výjimkou ani 20 až 30% rozdíly mezi maximální a minimální naměřenou rychlostí hoření v rámci jednoho zrna. Získané výsledky nejsou způsobeny chybou měření, ale různým složením v různých částech zrna TPH. Detailní výsledky experimentu jsou uvedeny v tabulce v rámci následující studie [68].

a) TPH L-I, 1000 psi



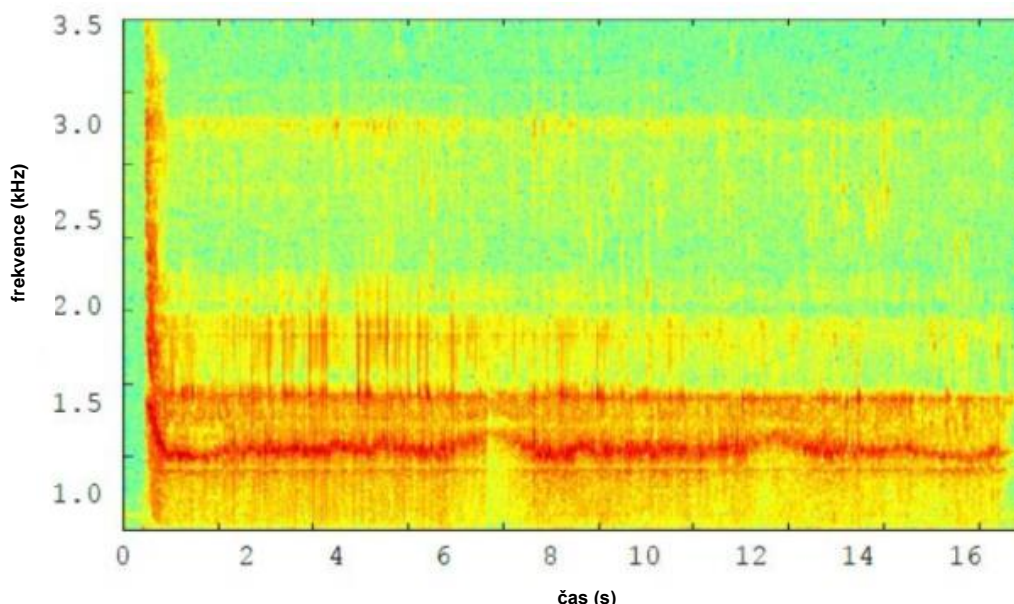
OBRÁZEK 30 – Prostorové změny rychlosti hoření v závislosti na pozici uvnitř zrna TPH

7.5.2.2 Itálie – Milánský polytechnický institut [70]

Měření byla prováděna na vzorcích TPH o délce 3 cm a čtvercovém průřezu (0,5 x 0,5 cm). Na boční straně vzorků byly ve vzdálenosti 1 cm zhotoveny zářezy ve tvaru písmene „V“. Rychlost hoření v ustáleném stavu byla stanovena třemi různými metodami: pomocí videozáznamu, pomocí mikrofону zaznamenávajícího dobu hoření celého vzorku na základě záznamu generované zvukové vlny a pomocí mikrofону zaznamenávajícího dobu hoření vzorku mezi dvěma zářezy tvaru „V“. V rozsahu tlaků 1 až 20 atmosfér nebyly zjištěny žádné významné rozdíly při spalování TPH v různých médiích (voda, dusík) a nebyly zjištěny ani žádné významné rozdíly mezi různými technikami spalování TPH pod vodou. Akustické metody mohou tedy poskytnout levné, snadné a rychlé hodnocení ustálené rychlosti hoření, které je zvláště užitečné pro prvotní charakterizaci nových typů TPH. Velmi dobrá schopnost časového rozlišení navíc činí z akustických technik vhodnou metodu pro studium uniformity hoření TPH. Přesnost akustických metod je také mnohem vyšší (0,7 %) ve srovnání např. s vizuálními technikami (2,7 % v atmosféře dusíku, 4 % pod vodou) a to právě díky přesnějšímu časovému rozlišení. Graf zobrazující energii zvukové vlny je počítán z digitalizovaného mikrofonního signálu získaného průměrně ze 100 vzorků, což umožňuje časové rozlišení (časový krok) 4,5 m/s při vzorkovací frekvenci 22 kHz. Takového časového rozlišení lze u vizuálních metod dosáhnout pouze pomocí vysokorychlostních kamer.

Signály spektrální akustické emise byly převedeny a analyzovány také do frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovy transformace. Vzhledem k tomu, že akustická spektra nejsou v průběhu spalování stabilní, byl časový krok Fourierovy transformace 20 ms. Spektrogram získaných spekter je uveden na obrázku 31, kde horizontální osa představuje čas, vertikální osa frekvenci a barva míru spektrální hustoty (červená představuje vysokou hustotu). Toto zobrazení umožňuje identifikovat období (v průběhu hoření TPH), kdy spektra v čase zůstávají téměř konstantní. Pořízené videozáznamy pak potvrzují, že tyto oblasti odpovídají ustálenému hoření. Zdá se, že přinejmenším za použitých zkušebních podmínek, produkuje ustálené hoření časově invariantní tvar spektra.

Provedené studie byly zaměřeny na časové období hoření TPH mezi dvěma zářezy ve stěně zrna, kde je hoření vzorku TPH ustálené. Akustická spektra získaná během ustáleného hoření odhalila při nízké frekvenci existenci četných vysokoenergetických vrcholů. Dva takové vrcholy jsou viditelné na obrázku 31, což indikuje ustálené hoření. Frekvence prvního vysokoenergetického vrcholu je značně ovlivněna nastavenými parametry zkoušky, zatímco ostatní frekvenční hodnoty zůstávají v podstatě stálé. Provedené experimenty ukazují, že frekvence vysokoenergetického vrcholu se zvyšuje se zvyšujícím zkušebním tlakem a klesající hladinou vody.



OBRÁZEK 31 – Spektrogram hoření vzorku TPH

Závislost ustálené rychlosti hoření na tlaku nebyla ovlivněna hladinou vody. V rozmezí tlaků 1 až 20 atmosfér získané spektrogramy prokázaly, že i při konstantním tlaku dochází k významným změnám frekvence vrcholů při průchodu hořícího povrchu místem zářezu ve vzorku, kde je značně snížen průřez (–40 %). Výše uvedené závěry potvrzují spektrogramy shromážděné během přechodných zážehů či zhášení. Neobvyklé jevy v průběhu hoření se projevují změnou ve frekvenci vrcholů, což bylo potvrzeno i videozáznamy (porozita vzorku ovlivňující hořící povrch či lokální zhášení).

Měření rychlosti hoření pomocí nízkofrekvenčních (< 3,5 kHz) zvuků vznikajících při spalování vzorku TPH pod vodou, představuje tedy techniku konkurenceschopnou k jiným používaným metodám. U zvolených experimentálních podmínek nebyly pozorovány žádné významné rozdíly při spalování TPH pod vodou či v atmosféře dusíku, ani při použití různých měřicích technik. Experimentální zařízení pro spalování pod vodou je jednoduché, levné a metoda jako taková je rychlá. Navíc, schopnost velmi dobrého časového rozlišení umožňuje akustickým metodám měření za hranicemi, kterých dosahují tradiční techniky. Spektrogramová analýza zvuku hoření TPH pomocí standardní počítačové zvukové karty může být vhodným nástrojem pro zkoumání nerovnoměrného či abnormálního hoření, obzvláště by pak mohla přispět k pochopení heterogenních jevů.

7.6 Zpětný tah

Při zpětném tahu generovaném hořením TPH [71,72,74] může být jednorozměrná ustálená či střední rychlost hoření určena z průměrné ztráty hmotnosti TPH v čase podle následujícího jednorozměrného vztahu:

$$\bar{r}_b = \frac{\bar{m}}{\rho_c} \quad (5)$$

Hodnota proměnné složky r_b' se získá z naměřené hodnoty nestabilní tahové síly F' při $P' = 0$ jako linearizovaná funkce odezvy frekvence hoření R_q vzhledem k oscilační laserové energii:

$$R_q = \frac{r_b'/r_b}{q'/q} = \frac{F' m' q}{q' F' m} = \frac{F' \rho_g q}{q' 2m m} \quad (6)$$

Nejistota odhadu hustoty plynných produktů hoření TPH (ρ_g) ztěžuje přímé použití výše uvedeného vztahu. Tento problém však lze částečně odstranit použitím zjednodušené rovnice:

$$R_q = \frac{F' m' q}{q' F' m} = \frac{F' q}{q' 2F} \quad (7)$$

Tuto zjednodušenou rovnici lze použít, pokud je platný předpoklad o jednorozměrnosti a zároveň platí že $r_g = 0$. V takovém případě je hustota plynných produktů hoření relativně necitlivá na změny tepelného toku a střední rozsah tahových sil je úměrný příslušným hodnotám \bar{m}^2 .

Rozsah zkušebních tlaků uvedený v Brewstedově práci [73] je 1 až 5 atmosfér, použitý převodník byl piezoelektrický. Výhodou metody je rychlost, nízká cena a malé množství vzorku (~ 1 gram). Nevýhodami jsou: 1) omezení na nízký zkušební tlak a 2) přeměna tahu na změnu hmotnosti, jenž je podmíněna předpoklady o zachování hybnosti (jednorozměrnost a konstantní hustota, přičemž hustota je obvykle neznámá).

POZNÁMKA 2 Detailní popis metody využívající ke stanovení rychlosti hoření TPH zpětný tah, jakož i úplný popis uvedených vztahů, lze nalézt v citovaných publikacích [71,72,73,74].

7.7 Další metody

Kromě výše zmíněných metod existuje ještě několik dalších technik používaných pro měření rychlosti hoření TPH. Mezi tyto techniky patří vysokorychlostní fotografie [72,74,75,76] a impulzní laserová fotografie [77]. V rámci výzkumu byly dále použity ionizační sondy, uzavřené spalovací motory, laserová skenovací zařízení [78] a laserové servomotory [79]. Tyto metody jsou využitelné pro zkušební ve spalovacích komorách a laboratorních zařízeních, jejich použití u zmenšených raketových motorů se však jeví jako nepraktické, takže zde nejsou rozebírány. Zarko a Kou nicméně vypracovali podrobný přehled těchto metod [1].

8 Hodnocení neintruzivních metod

Výše uvedený text je výčtem několika pokročilých metod pro měření ustálené rychlosti hoření TPH. Z historického hlediska byl vývoj neintruzivních technik způsoben požadavkem na existenci rutinní metody pro charakterizaci balistických vlastností TPH. Tabulka 6 uvádí souhrnné hodnocení neintruzivních metod zmíněných v tomto ČOS. Toto hodnocení je napsáno s cílem poukázat na perspektivní oblasti dalšího vývoje a investice pro realizaci rutinní charakterizace balistických vlastností TPH. Tabulka 6 zahrnuje provozní omezení, časové rozlišení, prostorové rozlišení, nejistotu měření rychlosti hoření, relativní náklady, konkrétní výhody, omezení a vyhlídky jednotlivých neintruzivních technik pro použití v rutinní balistické charakterizaci TPH.

Jelikož za základní prostředek pro charakterizaci balistických vlastností TPH je považován zmenšený raketový motor, musí být vlastnosti neintruzivních metod posuzovány vzhledem k možnostem tohoto zařízení. Důležitými faktory při rozhodování, zda nahradit stávající metodu charakterizace TPH novou či nikoli, jsou relativní náklady vzhledem k množství obdržených informací, potenciálního zlepšení přesnosti, dále požadované množství vzorku TPH, složitost metody a také její spolehlivost. Faktorem pro rozhodování je také velikost počáteční investice nutná k vybudování metody a náklady na její udržení.

Použití ultrazvukových měřících technik se doporučuje pro charakterizaci balistických vlastností TPH ve výzkumu i praxi. S vývojem těchto metod začala francouzská společnost ONERA a následně se vývoj rozběhl i v jiných zemích a došlo i k průmyslové aplikaci společností SNPE. V laboratorních podmínkách umožňuje ultrazvuková metoda charakterizaci balistických vlastností vzorků TPH až do 40 mm a to v rozsahu teplot a tlaků, které jsou analogické podmínkám uvnitř raketového motoru. Nejistota měření rychlosti hoření je pak srovnatelná s nejistotou měření ve zmenšených raketových motorech. Hlavní výhodou je schopnost ultrazvukových metod získat přesné balistické údaje a údaje o teplotní citlivosti s použitím relativně malého množství TPH. Po počátečních nákladech a výcviku obsluhy je stanovení srovnatelné se stanovením pomocí zmenšených raketových motorů, přičemž ultrazvukové techniky poskytují více informací. Zkušenosti a výsledky publikované společností SNPE ukazují navíc praktickou použitelnost ultrazvukových metod v průmyslové praxi. Hlavním omezením bránícím rozsáhlému zavedení těchto metod do průmyslové praxe nicméně zůstává nutnost počáteční investice a zaškolení obsluhy.

Metody využívající RTG záření, především radiografické metody v reálném čase, jsou teoreticky aplikovatelné v průmyslové praxi, avšak pouze v laboratorním měřítku. Prostorové a časové rozlišení by však pravděpodobně bylo nižší než u ultrazvukových metod. Problémem zůstávají také vysoké počáteční náklady na vybavení a proškolení personálu a požadavky na speciální materiály pro zajištění dobrého pronikání RTG záření do vzorku. Z uvedených důvodů nejsou v současnosti RTG metody doporučeny jako vhodný nástroj pro rutinní charakterizaci balistických vlastností TPH a měly by zůstat pouze výzkumným nástrojem.

Podobně jako u RTG záření, ani techniky využívající mikrovlnné záření nejsou doporučeny pro rutinní charakterizaci balistických vlastností TPH. Tyto techniky sice v řadě výzkumných aplikací vykazují vynikající rozlišení a časovou odezvu, avšak hodnocení komplexních dat zůstává v současnosti problémem. Nevýhodou metod je také nutnost použití složitých spojovacích prostředků (materiálů) a přístrojové techniky. Z těchto důvodů se mikrovlnné měřící techniky nyní nevyužívají, v širokém měřítku, ani v oblasti výzkumu. Z hlediska průmyslové aplikace se neočekává, že by budoucí technologické pokroky snížily vysokou nákladovost těchto metod a tak by mikrovlnné měřící techniky měly zůstat pouze nástrojem pro výzkum.

Použití plasmových kapacitních snímačů bylo s jistou mírou úspěchu aplikováno i v průmyslové praxi. Tyto metody jsou poměrně jednoduché a mají nízké počáteční i udržovací náklady. Hlavním problémem v tomto okamžiku je nutnost pochopení a zlepšení kalibrace a interpretace získaných dat. Omezením je také snížená použitelnost těchto metod pro TPH s obsahem kovů. V důsledku nízkých nákladů, dobrých výsledků při měření eroze izolace a dosavadnímu skromnému rozvoji těchto

metod, je doporučen další vývoj a aplikace plazmových kapacitních snímačů pro charakterizaci balistických TPH.

Metody využívající pasivní sledování akustické emise poskytly údaje o době hoření částí TPH v různých místech raketového motoru. Z hlediska nákladů se jedná o velice efektivní techniky, které jsou navíc schopny poskytnout požadovaná balistická data či informace o vlivu stárnutí na vlastnosti TPH jak v laboratorním uspořádání, tak v prostředí nezmenšených raketových motorů. Metody akustické emise jsou nicméně omezeny pouze na určení doby hoření (počátek a konec hoření) vzorku TPH omezené tloušťky, čímž je jejich schopnost prostorového rozlišení značně omezena. Tyto metody také vyžadují pro měření rychlosti hoření TPH udržení konstantního tlaku v průběhu zkoušky. Metody založené na akustické emisi jsou i přes své nevýhody schváleny jako rutinní metody pro hodnocení balistických vlastností páskových prachů a tuhých pohonných hmot. Doporučuje se také další rozvoj těchto metod pro sledování vývoje hoření zrna TPH v prostředí reálných raketových motorů.

TABULKA 6 – Příklady aplikací ultrazvukové měřicí techniky v otevřených i uzavřených spalovacích komorách

Metoda	Praktické použití metody	Pracovní limitace	Časové omezení	Prostorová limitace	Nejistota	Náklady	Stupeň rozvoje	Výhody	Nevýhody	Doporučení pro použití jako rutinní nástroj pro charakterizaci balistických vlastností TPH
Ultrazvuk	Charakterizace balistických vlastností malých vzorků	Tloušťka max. 40 mm, teploty (-40 až +60)°C	10000 Hz	100–500 mikronů	3 %	Nízké	Vysoký	Přímý způsob měření	Výcvik obsluhy; akceptace v průmyslu	Doporučeno pro okamžité zavedení do praxe
	Informace o rychlosti hoření v raketových motorech	Tloušťka max. 40 mm	500 Hz	100–500 mikronů	Není k dispozici	Nízké	Střední	Přímé lokální měření	Přístup akustické sondy do motoru	Doporučeno pro okamžité zavedení do praxe
RTG záření	Laboratorní pozorování dějů uvnitř motorů	Parametry závisí na typu TPH, nastavení a analýze	30–1000 Hz	100 mikronů [1]	3–6 % [57]	Vysoké	Střední	Snadná detekce přechodů	Speciální materiály a složitá analýza dat	Není doporučeno pro zavedení do průmyslové praxe
	Diagnostika poruch reálných raketových motorů (informativní)	Parametry závisí na typu TPH	30 Hz	1–5 mm	10 %	Velmi vysoké	Střední	Vizuální data	500 mm TPH	Není doporučeno pro zavedení do průmyslové praxe
Mikrovlnné záření	Stanovení reakční funkce TPH	$0 < f < 1000$ Hz	Omezeno sběrem a vyhodnocením dat	24 mikronů	3–4 % [62]	Vysoké	Střední	Přímý způsob měření	Náklady a složitost	Není doporučeno pro zavedení do průmyslové praxe

Metoda	Praktické použití metody	Pracovní limitace	Časové omezení	Prostorová limitace	Nejistota	Náklady	Stupeň rozvoje	Výhody	Nevýhody	Doporučení pro použití jako rutinní nástroj pro charakterizaci balistických vlastností TPH
Kapacitní plazmové snímače	Měření rychlosti hoření TPH, eroze izolace a tepelného toku	Porozumění probíhající m komplexním fyzikálním procesům	100 Hz	Není k dispozici	10 %	Nízké	Nízký	Malé rozměry , aplikace v letové fázi	Pouze TPH bez obsahu hliníku	Doporučeno pro další výzkum a vývoj
Akustická emise	Stanovení doby hoření páskových prachů, vývoj hoření zrna TPH v raketovém motoru	Měří pouze dobu hoření vzorku TPH	0,01 sekundy		1–5 %	Nízké	Střední	Snadné použití, aplikace jak v letové fázi, tak při statických zkouškách	Vzorek musí být inhibován či spalován v kapalném prostředí	Schválena pro páskové prachy a TPH

9 Perspektivy do budoucna

Větší snaha o pochopení zákonitostí hoření tuhých pohonných hmot vedla k rozvoji neintruzivních technik pro měření ustálené rychlosti hoření TPH. Existuje řada měřicích technik založených na různých fyzikálních principech, přičemž dle studie Zarka a Kuo [72] se v budoucnu mohou vyvinout nové průlomové metody vycházející ze základních fyzikálních principů, avšak další pokrok v této oblasti bude do značné míry záviset na rozvoji a zlepšení stávajících technik. Většina technik popsaných v tomto ČOS byla vyvinuta pro laboratorní použití či použití ve zmenšených raketových motorech. Pro měření rychlosti hoření v širokém rozsahu provozních podmínek neexistuje v současnosti žádná univerzální metoda. Zdá se však, že ultrazvukové měřicí metody a metody využívající plazmových kapacitních snímačů vykazují charakteristiky splňující požadavky na univerzální metodu měření rychlosti hoření TPH a to při omezených nákladech nutných pro použití v průmyslové praxi. Výběr metody měření nicméně nadále závisí především na povaze TPH a dostupnosti konkrétních metod v rámci zkušebny či laboratoře [72].

Hlavním omezením všech zmíněných technik je, že měří vlastnosti, které jsou úměrné vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že zájmovým parametrem je rychlost hoření TPH, mělo by se uvažovat o vývoji metody, která by byla citlivá či úměrná přímo rychlosti hoření a nikoli změně polohy hořícího povrchu TPH. Tím by se zabránilo poměrně velkým nejistotám měření, které jsou ještě zesíleny časovou derivací získaných dat.

U doporučených metod je zajímavou perspektivou do budoucna porovnání dat získaných ze zkoušek různé úrovně. Ultrazvukové metody i plazmové kapacitní snímače mohou být v zásadě použity pro měření v laboratorních podmínkách, v průmyslových podmínkách při kontrole výrobků či statických i letových zkouškách reálných raketových motorů. Sběr dat ze zkoušek různých úrovní by umožnil vytvoření databáze pro sledování balistických vlastností TPH v závislosti na jejich složení, způsobu výroby, provozních podmínkách či době stárnutí. Další rozvoj elektroniky by pak mohl vést k vývoji zařízení, která budou schopna zaznamenávat, zpracovávat a přenášet data do zkušebních či řídicích jednotek raketových motorů v reálném čase pro okamžitou detekci chyb a provedení nápravných opatření.

Prioritu, co se týká investic a rozvoje, by měly mít metody plazmových kapacitních snímačů, a to díky jejich velkému potenciálu. Bude-li jejich rozvoj úspěšný, mohly by tyto metody poskytnout užitečné informace o balistických vlastnostech TPH na všech úrovních výzkumu a použití raketových motorů.

Vzhledem ke všem dosud uvedeným informacím by hlavním přínosem tohoto ČOS mělo být doporučení zavést ultrazvukové měřicí techniky, jako rutinní metody pro charakterizaci balistických vlastností, do procesu nových TPH.

10 Seznam citované literatury

1. Zarko, V.E., and Kuo, K.K., "Critical Review of Methods for Regression Rate Measurements of Condensed Phase Systems," *Non-Intrusive Combustion Diagnostics*, edited by K. Kuo and T. Parr, 1994.
2. Frederick, R.A., Jr., Traineau, J.-C., and Popo, M., "Review of Ultrasonic Technique for Steady State Burning Rate Measurements, AIAA článek 2000-3801, červenec 2000.
3. Cauty, F., "Non-Intrusive Measurement Methods Applied to Energetic Material Regression Rate Determination," *Second International High Energy Materials Conference and Exhibit*, IIT Madras, Chennai, India, prosinec 1998.
4. Cauty, F., "Mesure Non-intrusive de la Vitesse de Régression d'un Matériau Énergétique (Non-Intrusive Measurement of an Energetic Material Regression Rate)," *AGARD Conference Proceedings 598, Advanced Non-Intrusive Instrumentation for Propulsion Engines*, str. 34-1 až 34-11, 1998.
5. Ankarswärd, B., "The Hybrid Rocket Engine," *Interavia*, No. 12, prosinec 1964, str. 1838-1840.
6. Hale, H.J., "The Demonstration of an Ultrasonic Technique to Measure Solid Propellant Burning Rates Under Actual Combustion Conditions", M.Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia, červen 1967.
7. Ho, P.J., "Feasibility Study of the Microwave and the Ultrasonic Techniques on the Continuous Measurement of Solid Propellant Burning Rates", M.Sc. Thesis, Purdue University, Lafayette, Indiana, srpen 1965.
8. Waesche, R.H.W., "Oscillatory Burning of Solid Rocket Propellants", Ph.D. Dissertation, Princeton University, 1965.
9. Cauty, F., "Measurement of Solid Propellant Response Function at Low Frequency by Means of Ultrasonic Method", *Colloque CNES/ONERA/CNRS sur les Ecoulements Propulsifs dans les Systèmes de Transport Spatial*, Bordeaux (France), září 1995.
10. Murphy, J.J., Chai, S., Brdar, R., and Krier, H., "Response Function Measurement using an Ultrasonic Technique in an Oscillating Burner," *AIAA článek 2000-3797*, červenec 2000.
11. Di Salvo, R., Frederick, R.A., and Moser, M.D., "Development of the Inert Gas Injection Modulated Motor for Response Function Measurements," *AIAA článek 2000-3799*, červenec 2000.
12. Traineau, J.C., and Kuentzmann, P., "Ultrasonic Measurements of Solid Propellant Burning Rates in Nozzleless Rocket Motors," *AIAA Journal of Propulsion and Power*, Vol.2, No. 3, 1986, str. 215-222; také *AIAA článek 84-1469*, 1984.
13. Traineau, J.C., Private communication, AGARD WG27, Toulouse, France.
14. Louwers, J., Gadiot, G., Versluis, M., Landman, A.J., van der Meer, T., and Roekaerts, D., "Measurement of Steady and Non-Steady Regression Rates of Hydrazinium Nitroformate with Ultrasound", *International Workshop on Measurement of Thermophysical and Ballistic Properties of Energetic Materials*, Milano, Italy, červen 1998.

15. Boardman, T.A., Porter, L.G., Brasfield, F.W., Abel, T.M., "An Ultrasonic Fuel Regression Rate Measurement Technique for Mixture Ratio Control of a Hybrid Motor", AIAA článek 95-3081, 1995.
16. Cauty, F., Démarais, J.C., "Ultrasonic Measurement of the Uncured Solid Propellant Burning Rate," "Mesure par ultrasons de la vitesse de combustion d'un propergol non réticulé," 21st International Congress of ICT, Karlsruhe, červenec 1990.
17. Merx, A.W. and van den Berg, R.P., "Instantaneous Solid Fuel Regression Rate Measurements at More than One Location – An Ultrasonic Pulse Echo Multiplexer System", Report LR-501, Report PML 1986-C76, SFCC Publication No. 36, Delft/Rijswijk, The Netherlands, srpen 1986.
18. Kono, R., "The Dynamic Bulk Viscosity of Polystyrene and Polymethyl Methacrylate," Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 15, No. 4, 1960.
19. North, A.M., Pethrick, R.A., Phillips, D.W., "Ultrasonic Studies of Solid Poly (akyl methacrylates)," Polymer, Vol., 18, duben 1977.
20. Korting, P.A.O.G., den Hertog, E.H., Schöyer, H.F.R., "Determination of the Regression Rate of Solid Fuels in Solid Fuel Combustion Chambers by Means of the Ultrasonic Pulse-Echo Technique. Part 1. The Measurement Technique," Report LR-453, Report PML 1985-C-5, SFCC Publication No. 18, Delft/Rijswijk, duben 1985.
21. Cauty, F., Démarais, J.C., Eradès, Ch. "Determination of Solid Propellant Burning Rate Sensitivity to Initial Temperature by the Ultrasonic Method," 3rd International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion, Scheveningen, The Netherlands, květen 1993, ONERA TP no. 1993-69.
22. Wright, W.A., "Ultrasonic Thickness Monitoring Technique", Aerospace Related Technology for Industry, NASA SP-5075, str. 69-73, květen 1969.
23. Cauty, F., "Electronic Device for Ultrasonic Measurements (EDUM) of Regression Rates of Solid Materials", ONERA Report, květen 1995.
24. Murphy, J.J., Martin, A.A., Krier, H., "Precision Technique for Measuring Burning Rates of Solid Propellants During Pressure Transients," AIAA článek 98-0560, 1998.
25. Moser, M. D., Dauch, F., McQuade, W. W., "Surface Roughness Effects on Ultrasonic Burning Rate Measurements," 1999 National Heat Transfer Conference, článek NHTC99-0285, srpen 1999.
26. Cauty, F., Démarais, J.C., Eradès, Ch. "Determination of Solid Propellant Burning Rate Sensitivity to Initial Temperature by the Ultrasonic Method," Non Intrusive Combustion Diagnostics, Eds. K.K. Kuo and T.P. Parr, Begell House, Inc., New York, str. 642-653, 1994.
27. Cauty, F., "Solid Propellant Combustion Response Function From Direct Measurement Methods: a Review of ONERA's Experience," International Workshop on Combustion Instability of Solid Propellants and Rocket Motors, Politecnico di Milano, červen 1997.
28. Reynaud, J.P., Personal Communication Concerning AGARD WG27 X-Ray Information, srpen 1998, SNPE Propulsion Group.

29. Reynaud, J.P., Personal Communication Concerning Ultrasonics, SNPE, duben 1998, SNPE Propulsion Group.
30. Louwers, J., Gadiot, G.M.H.J.L., Brewster, M.Q., Son, S.F., Parr, T., and Hansson-Parr, D., "Model for Steady-State HNF Combustion," <http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00412712.pdf>.
31. Dauch, F., Moser, M.D., Frederick, Jr., R.A., and Coleman, H.W., "Uncertainty Assessment of Ultrasonic Measurement of Propellant Burning Rate." CPIA Pub 680, Vol. I, str. 293-304, prosinec 1998.
32. Dauch, F., and Moser, M.D., Frederick, R.A., Jr., and Coleman, H.W., "Uncertainty Assessment of Ultrasonic Measurement of Propellant Burning Rate", AIAA článek 99-2224, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE) Joint Propulsion Conference, Los Angeles, CA, červen 1999.
33. Dauch, F., "Uncertainty Analysis of the Ultrasonic Technique Applied to Solid Propellant Burning Rate," M.Sc. Thesis, březem 1999, The University of Alabama in Huntsville.
34. Di Salvo, R., Frederick, R.A., Jr., and Moser, M.D., "Experimental Determination of Pressure Coupled Response Function", AIAA článek 98-3553, červenec 1998.
35. DiSalvo, R., Frederick, R.A., Jr., and Moser, M.D., "Experimental Determination of Pressure Coupled Response Functions." CPIA Pub 680, Vol. I, str. 407-414, prosinec 1998.
36. Di Salvo, R., Frederick, R.A., Jr., and Moser, M.D., "Direct Ultrasonic Measurements of Solid Propellant Combustion Transients", AIAA článek 99-2223, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Los Angeles, CA, červen 1999.
37. Di Salvo, R., Dauch, F, Frederick, R. A. Jr., Moser M. D, "Direct Ultrasonic Measurement of Solid Propellant Ballistics" The Review of Scientific Instruments, Vol. 70, No. 11, listopad 1999.
38. Di Salvo, R., Frederick, R.A., Jr., and Moser, M., "Development of the Inert Gas Injection Modulated Motor for Response Function Measurements," AIAA článek 2000-3799, červenec 2000.
39. Di Salvo, R., Frederick, Jr., R.A., and Moser, M.D., "Effect of Oxidizer Particle Size on Response Function," CPIA Pub 701, Vol. I, str. 615-626, listopad 2000.
40. Di Salvo, R., "Experimental Measurements of Solid Propellant Response Function," Ph.D. Dissertation, The University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL, 2001.
41. McQuade, W., Dauch, F., Moser, M.D., and Frederick, R.A., Jr., "Determination of the Ultrasonic Burning Rate Technique Resolution", AIAA článek 98-3555, červenec 1998.
42. McQuade, W., "Ultrasonic Instrument Development for Solid Propellant Burning Rate Measurement", M.Sc. Thesis, březem 1998, The University of Alabama in Huntsville.

43. Moser, M.D., Dauch, F., and McQuade, W., "Surface Roughness Effects on Ultrasonic Burning Rate Measurements," HTD99-285, Proceedings of the 33rd ASME National Heat Transfer Conference, Albuquerque, NM, srpen 1999.
44. Rochford, E., Temperature Sensitivity Measurements of Solid Rocket Propellants, M.Sc. Thesis, únor 1999, The University of Alabama in Huntsville.
45. Chiyarath, Kairali, Ballistic Characteristics of Bi-Plateau Solid Propellants, M.Sc. Thesis, říjen 1998, The University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL.
46. Murphy, J.J., Personal Communication, leden 1998.
47. Krier, Herman, Martin, Alan O., Murphy, Jeffrey J., "Precision Techniques for Measuring Burning Rates of Solid Propellants During Pressure Transients", 34th JANNAF Combustion Subcommittee Meeting, Vol. 2, str. 225-236, říjen 1997.
48. Krier, H. Murphy, J., Brdar, C. and Chai, S., "Response Function Measurement Using an Ultrasonic Technique in an Oscillatory Burner", AIAA článek 2000-3797, červenec 2000.
49. J.J. Murphy, "Unsteady Solid Propellant Combustion: Theory and Experiment", Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, srpen 2000.
50. Deepak, D., Jeenu, R., Sridharan, P., and Padmanabhan, M.S., "Determination of Pressure Dependence of Burning Rate in Solid Motors Using Ultrasonic Technique", AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 3, str. 290-294, květen-červen 1998.
51. Dijkstra, F., Korting, P.A.O.G., and van der Berg, R.P., "Determination of the Regression Rate in Solid Fuel Ramjets by Means of the Ultrasonic Pulse Echo Method," AIAA článek 90-1963, červenec 1990.
52. Osborn, J.R., Burick, R.J., and Panella, R.F., "Continuous Measurement of Solid Propellant Burning Rates", Review of Scientific Instruments, Vol. 37, No. 1, str. 86-92, 1966.
53. Godai, T., Tanemura, T., Fujiwara, T., Shimizu, M., "Studies of Solid Propellant Combustion with Pulsed Radiography," srpen 1987 NASW-4005
54. Wiley, R.G., "Photo Recording the Internal Ballistics and Flame Fronts of Solid Propellant Engines by Cine-x Data Process," Proceedings of the 9th Annual Technical Symposium of SPIE, srpen 1964, Miami Beach, Florida.
55. Pressley, H. and Glick, R.L., "Burning Rate Measurements in Solid Rocket Motors," AIAA článek 83-0481, 1983.
56. Pressley, H. and Glick, R.L., "In-Situ Burning Rate Determination Using Flash Radiography," CPIA Publication 412, Vol. 1, str. 261-273, říjen 1984.
57. Pressley, Homer Mars, Jr., "In Situ Burning-Rate Determination using Flash Radiography," Ph.D. Dissertation, leden 1987.
58. Ayris, J., Petrovic, S., "Erosive Burning in Solid Propellant Rocket Motors", AIAA článek 90-22315, červenec 1990.
59. Whitehouse, T., "Personal Communication Concerning AGARD/RTO WG27 UK X-Ray Information", prosinec 1997, British Aerospace, Royal Ordnance, Worcestershire, UK.

60. Watson, T.J., Kuo, K.K., and Thynell, S.T., "Assessment of Dynamic Burning Behavior for JA-2 Propellant Rods," The 31st JANNAF Combustion Subcommittee Meeting, Volume 2, str. 247-257, říjen 1994.
61. Chiaverini, M.J., Serin, N., Johnson, D.K., Lu, Y.C., and Kuo, K.K., "Instantaneous Regression Behavior of HTPB Solid Fuels Burning with GOX in a Simulated Hybrid Rocket Motor", Fourth International Symposium on Special Topics in Combustion, Stockholm, Sweden, květen 1996.
62. Strand, L.D., Schultz, A.L., and Reedy, G.K., "Microwave Doppler Shift Technique for Determining Solid Propellant Transient Regression Rates" Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 11, No. 2. únor 1974.
63. Russel, L.H., "Burning Velocities of a Solid Propellant via a Microwave Technique at Elevated Pressures and Pressurization Rates", Ph.D. Dissertation, University of Pittsburgh, 1979.
64. Mathes, H.B. and Battles, J.W., "A 35 Gigahertz System Measurement of Solid Propellant Acoustic Combustion Response", Proceedings of the 18th JANNAF Combustion Meeting, Pasadena, CA, CPIA Pub. 347, Vol. III, str. 161-165, říjen 1981.
65. Bozic, V.S., Blagojevic, D.J., Anicin, A.B., "Measurement System for Determining Solid Rocket Propellant Burning Rate Using Reflection Interferometry", Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 4, str. 457-467, 1997.
66. Traineau, J.-C., Personal Communication, Toulouse, FR.
67. Craig, J.I., Strahle, W.C., and Palfrey, J., "Audible and Ultrasonic Acoustic Emissions From Composite Solid Propellants," AFOS-75-2805.
68. Frederick, R.A., "Wide Distribution Propellants," AFAL-TR-88-073, Air Force Rocket Propulsion Laboratory, Edwards AFB, CA, červen 1988.
69. Caveny, L.H., Saber, A.J., and Summerfield, M., "Propellant Burning Rate Uniformity Identified by Ultrasonic Acoustic Emission," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 14, No 7, str. 433-437, červenec 1977.
70. De Luca, L., Private Communication Concerning Acoustic Measurements, červen 2001.
71. Son, S. F. and Brewster, M.Q., "Unsteady Combustion of Homogeneous Energetic Solids Using the Laser-Recoil Method," Combustion and Flame, 100, str. 283-291, 1995.
72. Zarko, V.E., and Kuo, K.K., Critical Review of Methods for Regression Rate Measurements of Condensed Phase Systems," Non-Intrusive Combustion Diagnostics, edited by K. Kuo and T. Parr, 1994.
73. Brewster, Q, Personal Communication Regarding Laser Recoil, červen 2001.
74. Boggs, T.L., Crump, J.E, Kraerle, K.J., and Zurn, D.E., "Cinicrophotography and Scanning Electron Microscopy as used to Study Solid Propellants," Experimental Diagnostics in Combustion, progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 63, str. 20-48, AIAA 1978.

75. Shelukin, G.G., Bulkdov, V.P., and Belov, V.P., "Experimental Investigation of Combustion Processes in Heterogeneous Condensed Media," *Fizika Goreniya i Vztyva*, Vol. 5, No. 1, str. 42-51, 1969.
76. Osborn, J.R., Murphy, J.M., Kershner, S.D., "Photographic Measurement of Burning Rates in Solid Propellant Rocket Motors," *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 34, No. 3, str. 305-306, březen 1963.
77. Becker, R.J., "High Speed Photography," Final Report, Air Force Office Astronautics Laboratory, AFAL-TR-88-50, AD20293, srpen 1988.
78. Frederick, R.A., "Measuring the Regression of a Burning Solid Propellant," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 67, No. 8, srpen 1996.
79. Osborn, J.R., Burick, R.J. and Panella, R.F., "Continuous Measurement of Solid Propellant Burning Rates," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 37, No. 1, str. 86-92, 1966.

ČOS 134002
1. vydání
Změna 1

(VOLNÁ STRANA)

(VOLNÁ STRANA)

Účinnost českého obranného standardu od: **27. července 2020**

Změny:

Změna číslo	Účinnost od	Změnu zpracoval	Datum zpracování	Poznámka
1	4. 9. 2023	Odbor obranné standardizace	4. 9. 2023	

Upozornění: Oznámení o českých obranných standardech jsou uveřejňována měsíčně ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví v oddíle „Ostatní oznámení“ a Věstníku MO.

V případě zjištění nesrovnalostí v textu tohoto ČOS zasílejte připomínky na adresu distributora.

Rok vydání: 2023, obsahuje 28 listů

Distribuce: Odbor obranné standardizace Úř OSK SOJ, nám. Svobody 471/4, 160 01 Praha 6

Vydal: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti
www.oos.army.cz

NEPRODEJNÉ
