

# Experimentální metody stanovení parametrů výbušin pro validaci teoretických predikcí

Diplomová práce

Školitel:  
doc. Ing. Jiří Pachman, PhD.

Bc. Štěpán Jirman

University of Pardubice  
Faculty of Chemical Technology  
Institute of Energetic Materials

---

# Experimental assessment of explosive parameters for the validation of the numerical prediction

Master Thesis

Supervisor:  
doc. Ing. Jiří Pachman, PhD.

Bc. Štěpán Jirman

2023

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán Jirman**  
Osobní číslo: **C21523**  
Studijní program: **N0531A130027 Inženýrství energetických materiálů**  
Téma práce: **Experimentální metody stanovení parametrů výbušin pro validaci teoretických predikcí**  
Zadávající katedra: **Ústav energetických materiálů**

## Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši na téma experimentálních metod používaných pro ověření výsledků termodynamických výpočtů detonačních parametrů výbušin.
2. Vyberte vhodné metody a experimentálně ověřte jejich použitelnost pro stanovení detonačních parametrů vybraných výbušin.
3. Porovnejte experimentálně stanovené výsledky s výsledky získanými z programu EXPLO5 či jiných dostupných alternativ.
4. Výsledky zpracujte formou diplomové práce.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Pachman, Ph.D.**  
Ústav energetických materiálů

Oponent diplomové práce: **Ing. Martin Künzel, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **28. února 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **5. května 2023**

L.S.

---

**prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.**  
děkan

---

**doc. Ing. Jiří Pachman, Ph.D.**  
vedoucí ústavu

V Pardubicích dne 28. února 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Experimentální metody stanovení parametrů výbušin pro validaci teoretických predikcí jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 4. 5. 2023

.....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Pachmanovi, Ph.D. za všeobecné vedení v práci. Dále pak Ing. Jindřichu Kučerovi, Ph.D. za poskytnutí možnosti měření na kalorimetru ve firmě OZM Research s.r.o. Děkuji Ing. Jakobovi Šelešovkému, Ph.D za pomoc při práci s textovým editorem LaTeX. Děkuji také svým rodičům za podporu ve studiu.

# Anotace

Cílem této práce je vybrat experimentální metody měření parametrů výbušin, použitelných pro kalibraci, nebo porovnání s hodnotami těchto parametrů vypočtenými termodynamickými výpočtními programy. Teoretická část obsahuje stručný popis detonace, vývoj modelů pro přiblížení jejího průběhu a jak jsou tyto modely používány pro predikce parametrů ve výpočtních programech. Dále jsou v teoretické části popsány různé metody měření různých parametrů výbušin.

Experimentální část obsahuje popis přístrojů použitých k měření vybraných parametrů výbušin, dále popis experimentálních uspořádání těchto provedených metod a způsoby vyhodnocení naměřených výsledků.

Ve výsledkové části jsou porovnány výsledky jednotlivých metod mezi sebou a s hodnotami vypočtenými programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Také jsou diskutovány jednotlivé techniky vzhledem k opakovatelnosti výsledků a uživatelské náročnosti na provedení.

Závěr shrnuje práci, splnění jejích cílů a diskuzi o budoucím pokračování výzkumu pro zjednodušení a zpříjemění vývoje a charakterizace nových výbušin.

## **Klíčová slova:**

Experimentální metody, Detonační parametry, Termodynamické výpočty

# Anotation

The aim of this work is to select experimental methods of measuring the parameters of explosives, which can be used for calibration, or comparison with the values of these parameters calculated by thermodynamic computing programs. The theoretical part contains a brief description of detonation, the development of models to simplify its behavior and how these models are used for parameter predictions in computer programs. Furthermore, in the theoretical part, various methods of measuring various parameters of explosives are described.

The experimental part contains a description of the instruments used to measure selected parameters of the explosives, a description of the experimental setups of these performed methods and ways of evaluating the measured results.

In the results section, the results of the individual methods are compared with each other and with the values calculated by the EXPLO 5 program (version 6.0.4.). Individual techniques are also discussed with regard to the repeatability of the results and the user-friendliness of preparation.

The conclusion summarizes the work, the fulfillment of its objectives and a discussion of the future continuation of research to simplify and improve the development and characterization of new explosives.

## **Keywords:**

Experimental methods, Detonation parameters, Thermodynamic calculations



# Obsah

<b>I</b>	<b>Teoretická část</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>Teorie detonace</b>	<b>15</b>
1.1	Modely detonace	15
1.1.1	CJ model	15
1.1.2	ZND model	17
1.1.3	Další modely detonace	18
1.2	Teoretické výpočty detonačních parametrů	18
<b>2</b>	<b>Výčet technik pro měření detonačních parametrů</b>	<b>20</b>
2.1	Měření detonační rychlosti	20
2.1.1	Dautricheova metoda	20
2.1.2	Měření pomocí piezoelektrických senzorů	21
2.1.3	Měření pomocí ionizačních senzorů	21
2.1.4	Měření odporovou sondou	21
2.1.5	Měření pomocí streak kamery	23
2.1.6	Měření pomocí optických vláken	24
2.1.7	Rádiová interferometrie	25
2.2	Měření detonačního tlaku	27
2.2.1	Manganinový senzor	27
2.3	Měření rychlosti částic	28
2.3.1	Urychlení kovového disku	28
2.3.2	DAX	29
2.3.3	Rentgenová fotografie	31
2.3.4	Měření rychlosti částic pomocí senzoru v elektromagnetickém poli	32
2.4	Měření detonační teploty	32
2.5	Měření objemu produktů při STP	34
2.6	Měření zakřivení čela detonační vlny	34
2.6.1	Měření pomocí streak kamery	35
2.6.2	Měření pomocí vysokorychlostního snímkování	35
2.6.3	Měření pomocí optických vláken	36
2.7	Stanovení dolních mezních průměrů	37
2.7.1	Stanovení dolního mezního průměru v kónické geometrii	37
2.7.2	Stanovení dolního mezního průměru v jednotlivých průměrech a tloušťkách	37
2.7.3	Micromushroom test	38
2.8	Určení vlivu obalu	39
2.9	Testy pracovní schopnosti	40
2.9.1	Cylinder test	40
2.9.2	Aquarium test	40
2.9.3	Trauzlův blok	41
2.9.4	Balistický moždír	42
2.10	Kalorimetrie	43
2.10.1	Měření spalného tepla	43
2.10.2	Měření detonačního tepla	44

<b>II</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>45</b>
<b>3</b>	<b>Měřicí technika</b>	<b>46</b>
3.1	Osciloskopy . . . . .	46
3.2	Pin mixer a pulzní generátor . . . . .	46
3.3	PDV . . . . .	46
3.4	Optimex . . . . .	47
3.5	Kalorimetr . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Experimentální uspořádání</b>	<b>49</b>
4.1	Detonační rychlost . . . . .	49
4.1.1	Měření ionizačními čidly . . . . .	49
4.1.2	Měření optickými vlákny . . . . .	49
4.1.3	Měření navrtaným optickým vláknem . . . . .	50
4.2	Detonační tlak . . . . .	51
4.3	Rychlost částic . . . . .	52
4.4	Objem produktů při STP . . . . .	54
4.5	Zakřivení detonační vlny . . . . .	55
4.6	Pracovní schopnost . . . . .	55
4.6.1	Zpracování výsledků PDV . . . . .	56
4.6.2	Zpracování UHSi dat . . . . .	56
4.7	Spalná kalorimetrie . . . . .	58
<b>III</b>	<b>Výsledky a diskuze</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky a porovnání</b>	<b>62</b>
5.1	Detonační rychlost . . . . .	62
5.2	Detonační tlak . . . . .	63
5.3	Rychlost částic . . . . .	63
5.3.1	DAX . . . . .	64
5.3.2	Porovnání výsledků . . . . .	65
5.4	Objem produktů při STP . . . . .	65
5.5	Zakřivení detonační vlny . . . . .	65
5.6	Pracovní schopnost . . . . .	67
5.6.1	Vyhodnocení FOP dat . . . . .	67
5.6.2	Program IVV Imprint . . . . .	68
5.6.3	Octave skript . . . . .	68
5.6.4	Porovnání výsledků . . . . .	69
5.7	Kalorimetrie . . . . .	69
<b>IV</b>	<b>Závěr</b>	<b>74</b>
	<b>Literatura</b>	<b>76</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Skript pro Octave</b>	<b>83</b>
<b>B</b>	<b>Výsledky z programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.)</b>	<b>86</b>
<b>C</b>	<b>Kalorimetrické hodnoty z ICT databáze</b>	<b>92</b>

# Seznam obrázků

1.1	Popis detonace podle CJ modelu v souřadnicích $P-V$ . Dosažení CJ bodu (nalevo) a expanze produktů (napravo) [14]. . . . .	16
1.2	Popis detonace podle pístového modelu v souřadnicích $P-t$ . . . . .	16
1.3	Popis detonace podle ZND modelu v souřadnicích $P-t$ [18] [14]. . . . .	17
1.4	Popis detonace podle ZND modelu v souřadnicích $P-V$ [19]. . . . .	17
1.5	Graf závislosti detonační rychlosti na průměru nálože. [24]. . . . .	18
1.6	Snímek obrazovky z výpočetního programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.), zadávání vstupních parametrů. . . . .	19
1.7	Snímek obrazovky z výpočetního programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.), vypočtené hodnoty. . . . .	19
2.1	Obrázek uspořádání Dautriechovy metody [31]. . . . .	20
2.2	Nákres experimentu (vlevo) pro měření detonační rychlosti pomocí piezo pinů a jeho fotografie (vpravo) [33]. . . . .	21
2.3	Foto experimentu (vlevo) pro měření detonační rychlosti pomocí ionizačních pinů a jeho výsledky (vpravo) [34]. . . . .	22
2.4	Různé typy odporových sond. Amster-Gibsonova a), Jaffe-Prícova b) a c), Galyparin-Svedova d), Pittsův typ sendvič e), uzavřený typ f) [27]. . . . .	22
2.5	Nákres experimentálního uspořádání pro kontinuální měření detonační rychlosti osciloskopem [27]. . . . .	23
2.6	Příklad záznamu osciloskopu po provedení experimentu [27]. . . . .	23
2.7	Záznam ze streak kamery pro určení detonační rychlosti, náložka ze dvou výbušnin, první pomalejší a druhá rychlejší. Šipkou je označeno místo, kde se detonace zrychlila. [36]. . . . .	24
2.8	Optická vlákna připevněná na bleskovici (nalevo), optické vlákno několikrát provléknuté skrze nálož (uprostřed), schéma navrtaného optického vlákna (napravo) [39] [38]. . . . .	24
2.9	Schéma PDV měření [42] a příklad výstupního záznamu [43]. . . . .	25
2.10	Vyfrézovaný konec vlákna ve výbušnině s procházející detonační vlnou a záznam z měření metodou CFBG [41]. . . . .	25
2.11	Schéma radiointerferenční metody [44]. . . . .	26
2.12	Rádiový interferogram pro HMX pojené polymerem [44]. . . . .	26
2.13	Fotografie manganinového senzoru. [46] . . . . .	27
2.14	Experimentální uspořádání kalibrace piezorezistivního koeficientu manganinového senzoru (vlevo) a kalibrační závislost (vpravo) [47]. . . . .	28
2.15	Závislost rychlosti volného povrchu na tloušťce disku [19]. . . . .	29
2.16	Záznamu z urychlení disku a místo používané k extrapolaci [53]. . . . .	30
2.17	Schéma experimentu měření rychlosti částic pomocí DAX testu (společně s měřením detonační rychlosti) [52]. . . . .	30
2.18	Záznamy rychlostí volného povrchu v čase a jejich extrapolace [52]. . . . .	31
2.19	$P-u$ diagram pro přiblížení Cooperova výpočtu. . . . .	32
2.20	Nákres experimentu měření rychlosti částic pomocí rentgenové fotografie [56]. . . . .	33
2.21	Nákres umístění elektromagnetické sondy v náloži [58]. . . . .	33
2.22	Výsledný záznam měření rychlosti částic elektromagnetickou sondou [57]. . . . .	34
2.23	Experimentální uspořádání měření zakřivení detonační vlny pomocí streak kamery (dole)[65] a záznam z měření (nahore)[23]. . . . .	35

2.24	Snímky z vysokorychlostního záznamu výstupu detonační vlny ze dna homogenní nálože A-IX 1 [68]. . . . .	35
2.25	Snímky z vysokorychlostního záznamu výstupu detonační vlny ze dna nehomogenní nálože Semtexu 1A [69]. . . . .	36
2.26	Foto umístění optických vláken při měření zakřivení detonační vlny [68]. . . . .	36
2.27	Graf zakřivení detonační vlny získaný z dat naměřených snímkovací metodou a metodou s optickými vlákny [68]. . . . .	36
2.28	Znázornění průběhu detonací ve válcové náloži a v náloži o půdorysu kvádrů [70]. . . . .	37
2.29	Experimentální uspořádání pro měření kritického průměru v kónické geometrii (vlevo)[71]. Záznam z osciloskopu (Vpravo) [73]. . . . .	38
2.30	Experimenty pro určení kritického průměru pro heterogenní a homogenní trhavinu [70].	38
2.31	Sestava pro měření kritické tloušťky trhavin [70]. . . . .	38
2.32	Záznamy micromushroom testu pro trhavinu PETN (nalevo) a HNAB (napravo) [76].	39
2.33	Nákres a rentgenové foto odražení a skládání rázových vln na rozhraní výbušiny a materiálu obalu [77]. . . . .	39
2.34	Obrázek experimentálního uspořádání studia vlivu obalu v ploché (deskové) geometrii [79]. Označené jsou následující části místo iniciace (1), generátor rovinného čela detonační vlny (2), měření detonační rychlosti pomocí piezoelektrických pinů na kraji nálože (3), měření detonační rychlosti pomocí piezoelektrických pinů uprostřed nálože (4), Nálož uzavřená mezi kovovými deskami (5). . . . .	40
2.35	Obrázek cylinder testu. . . . .	41
2.36	Fotografie z aquarium testu. . . . .	41
2.37	Schéma Trauzlova bloku před (nalevo) a po výbuchu (napravo) [85]. . . . .	42
2.38	Obrázky výtrží v trauzlově bloku [88]. . . . .	42
2.39	Obrázek balistického moždíře a detail kyvadla s projektilem [90]. . . . .	42
2.40	Schéma spalného kalorimetru (vlevo) a záznam z měření (vpravo). . . . .	43
3.1	Fotografie použitých osciloskopů, DPO 3034 (vlevo) a DPO 70404C (vpravo). . . . .	46
3.2	Fotografie použitých přístrojů pin mixer (vlevo) a pulzního zdroje napětí (vpravo). . . . .	47
3.3	Fotografie sestavy pro měření pomocí PDV používané na ÚEnM, pin mixer (1), „malý osciloskop“ Tektronix DPO 3034 (2), „velký osciloskop“ Tektronix DPO 70404C (3), LASER (4), zesilovač LASERU (5) a vlastní PDV (6). . . . .	48
3.4	Fotografie přístroje OPTIMEX 16 se zapojenými osmi optickými vlákny v jedné záznamové kartě. . . . .	48
3.5	Fotografie použitého kalorimetru BCA 500. . . . .	48
4.1	Foto Nálože připravené pro měření detonační rychlosti třemi různými způsoby. Nálož před odpalem: elektrická rozbuška (1), počín (2), ionizační čidlo ze zvonkového drátu (3), vlastní nálož (4), držák skleněných optických vláken (5), skleněná optická vlákna (6), FOP připevněná vně (7), FOP uvnitř nálože (8), zvonkový drát v kontaktu s dvoulinkou (9). . . . .	50
4.2	Záznam z osciloskopu po měření detonační rychlosti pomocí ionizačních čidel. . . . .	50
4.3	Příklad záznamu z OPTIMEXu z měření individuálními vlákny (nalevo) a detail místa odečtu času příchodu na prvním kanálu (napravo). . . . .	51
4.4	Souprava pro přípravu navrtaných optických vláken (FOP). . . . .	51
4.5	Příklad záznamu z OPTIMEXu z měření FOP sondou. . . . .	52
4.6	Model spodní náložky (1) se senzorem (3) přilepeným na teflonovou fólii (2) a vyvedenými vodiči (4) (vlevo). Fotografie experimentu s připravenou bleskovicí pro vytvoření zpoždění (vpravo). . . . .	52
4.7	Model a foto experimentu pro měření urychlení kovového disku. Na modelu jsou označeny jednotlivé části: rozbuška(1), centrovací kruh pro rozbušku (2), počínová nálož Semtexu 1A (3), náložka trhavin A-IX-1 (4), kovový disk (5), držák náložky s diskem a UPC sondou (6), UPC PDV sonda (7). . . . .	53

4.8	Záznam rychlosti volného povrchu pro tloušťku disku 0.985 mm. . . . .	53
4.9	Foto připraveného vzorku, jeho upevnění na zážehové dráty a celé bomby TSV 40. . .	54
4.10	Průběh tlaku v bombě po zapálení vzorku. Místo odečtu ustáleného tlaku po cca 30 vteřinách. . . . .	54
4.11	Model experimentu s popsány částmi (vlevo) a foto připraveného (vpravo). Náložka trhavin (1), počínová nálož (2), rozbuška (3), 3D vytištěný prvek (4), místo pro měření detonační rychlosti (5), místo pro měření zakřivení vlny optickými vlákny (6), izolopa zajišťující vzduchový polštář (7), PMMA okno (8), trigger pro kameru (9). . . . .	55
4.12	Model cylinder testu (vlevo) a jeho fotka (vpravo). Označenými částmi jsou držák na počínovou nálož (1), měděná trubka s trhavinou (2), držáky pro uchycení kolimátorových sond (3), kolimátorové sondy (4), držák celé sestavy (5), Navrtané optické vlákno pro měření detonační rychlosti (6) a dřevěné podpěry (7). . . . .	56
4.13	Model celého experimentu cylinder testu. Označenými částmi jsou mžiková elektrická rozbuška (1), počínová nálož Semtexu 1A (2), metr dlouhé kusy bleskovice 12 (Explosia a.s.) (3), Papír pro rozmytí světla z argonové lahve (4), zážehové rozbušky (5), nálož Semtexu 1A pro stlačení argonu (6) a PET lahev naplněná argonem (7). . . . .	57
4.14	Surový záznam na osciloskopu. PDV měření cylinder testu (dva kanály za sebou). . . .	58
4.15	Spektrogram vytvořený ze surového záznamu prvního signálu z PDV měření cylinder testu. . . . .	59
4.16	Interpolace spektrogramů obou kanálů. . . . .	59
4.17	Umístění kurzorů pro odečtení detonační rychlosti programem IVV Imprint na čtvrtém a desátém snímku. . . . .	60
4.18	Snímek 10 před a po úpravě pro použití ve skriptu v programu Octave. . . . .	60
4.19	Foto spodní části kalorimetrické bomby s připravenou tabletou kyseliny benzoové ve skleněném kalíšku se zavedenou zážehovou bavlnkou. . . . .	60
5.1	Graf změřených detonačních rychlostí v závislosti na převrácené hodnotě průměru nálož, červené čáry reprezentují oblast detonačních rychlostí mezi výpočtem pro hustotu 0,9 a 1,1 g/cm <sup>3</sup> . . . . .	62
5.2	Záznam z měření detonačního tlaku manganinovým snímačem. . . . .	63
5.3	Změřená data přeložená přes hodnoty z literatury [106] a odečtení rychlosti volného povrchu pro výpočet detonačního tlaku. Experimentální výsledky jsou označeny modře. . . . .	65
5.4	Změřená data rychlostí volného povrchu pro jednotlivé disky a extrapolované hodnoty naznačené šipkami. . . . .	66
5.5	Série snímků pořízených UHSi kamerou z pozorování zakřivení detonační vlny. . . . .	67
5.6	Záznam a vyhodnocení změřené detonační rychlosti při měření zakřivení detonační vlny. . . . .	68
5.7	Ilustrace zvýšení detonační rychlosti na okraji krátké nálož. Ideální detonace iniciovaná po celé ploše náložky (1), reálná detonace iniciovaná po celé ploše náložky (2), reálná detonace iniciovaná z jednoho bodu uprostřed (3), reálná detonace iniciovaná na části čelní plochy počínovou nálož (4). . . . .	68
5.8	Příklady grafů závislosti pozice detonační vlny v nálož na jejím poloměru. Data vyhodnocená z Optimexu a data vyhodnocená z UHSi kamery. . . . .	69
5.9	Graf závislosti pozice stěny trubky na snímku na čase. . . . .	70
5.10	Graf porovnávající naměřené rychlosti stěny trubky a vypočtený průběh z programu EXPLO 5. . . . .	70
5.11	Záznam průběhu kalorimetrického měření pro 0,527 g PETN v atmosféře 30 bar kyslíku. . . . .	72
A.1	Graf výsledku z Octave, pozice expandující stěny trubky získaná z kamery je znázorněna červenou křivkou a je porovnána s daty získanými z PDV - modrou křivkou. . . . .	85
B.1	Výsledkové okno z výpočtu detonačních parametrů trhavin tetryl o hustotě 0,9 g/cm <sup>3</sup> programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6. . . . .	87
B.2	Výsledkové okno z výpočtu detonačních parametrů trhavin tetryl o hustotě 1,0 g/cm <sup>3</sup> programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6. . . . .	88

B.3	Výsledkové okno z výpočtu detonačních parametrů trhaviny tetryl o hustotě 1,1 g/cm <sup>3</sup> programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6.	89
B.4	Výsledkové okno z výpočtu detonačních parametrů trhaviny A-IX-1 programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6. . . . .	90
B.5	Výsledkové okno z výpočtu parametrů hoření trhaviny HMX programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). . . . .	91
C.1	Kalorimetrické hodnoty pro kyselinu benzoovou z ICT databáze [102]. . . . .	92
C.2	Kalorimetrické hodnoty pro pentaerytritol tetranitrát z ICT databáze [102]. . . . .	93
C.3	Kalorimetrické hodnoty pro nitroguanidin z ICT databáze [102]. . . . .	94
C.4	Kalorimetrické hodnoty pro methyl-nitroguanidin z ICT databáze [102]. . . . .	95
C.5	Kalorimetrické hodnoty pro polyoxy methylen z ICT databáze [102]. . . . .	96

# Seznam tabulek

5.1	Tabulka naměřených hodnot detonačních rychlostí tetrylu. . . . .	71
5.2	Tabulka naměřených hodnot rychlostí volného povrchu disku. . . . .	71
5.3	Tabulka extrapolovaných hodnot rychlostí volného povrchu disku a vypočítaných hodnot detonačního tlaku. . . . .	72
5.4	Tabulka naměřených a spočítaných hodnot k určování objemu zplodin při STP. . . . .	72
5.5	Tabulka naměřených hodnot detonačních rychlostí při vyhodnocení zakřivení detonační vlny. . . . .	72
5.6	Tabulka naměřených hodnot spalných tepel, z nich vypočtených hodnot slučovacích tepel a rozptylů hodnot slučovacích tepel z literatury [102]. Protože se jedná o záporné hodnoty tak jako symbol „až“ je použit symbol $\div$ . . . . .	73

# Seznam zkratek

DAP	výbušina, Dusičnan Amonný s Palivem
CJ	Chapman-Jouguet, označení stavu, nebo modelu popsaném Chapmanem a Jouguetem
BKW	Becker-Kistiokowsky-Wilson, stavová rovnice popisující zplodiny detonace
JWL	Jones-Wilkins-Lee, stavová rovnice popisující expanzi zplodin detonace
ZND	Zeldovič-von Neuman-Döring, označení teorie, nebo modelu popsaném Zeldovičem, von Neumanem a Döringem
DSD	Detonation Shock Dynamics, jedna z oblastí fyziky výbuchu
FOP	Fiber Optical Probe, plastové optické vlákno s navrtnou izolací
PFP	Perforated Fiber optic Probe, jiné, ekvivalentní označení FOP
PDV	Photonic Doppler Velocimetry, metoda měření rychlosti používající laser
RIF	Radio Interferometry, metoda měření rychlosti používající rádiové vlny
HMX	výbušnina, 1,3,5,7-tetranitro 1,3,5,7-tetraazooktan
RDX	výbušnina, 1,3,5-trinitro 1,3,5-triazin
A-IX-1	výbušina obsahující 95 % RDX a 5 % vosku
A-IX-2	výbušina obsahující A-IX-1 s různým přídatkem práškového hliníku
DAX	Disc acceleration Experiment, experimentální metoda
WBP	Wide Band Pyrometer, přístroj pro měření teploty na základě záznamu vyzářené světelné intenzity
SBP	Single Band Pyrometer, přístroj pro měření teploty na základě záznamu vyzářené světelné intenzity
MBP	Multi Band Pyrometer, přístroj pro měření teploty na základě záznamu vyzářené světelné intenzity
STP	Standard Temperature and Pressure, standardní teplota a tlak (298 K a 101,325 kPa)
PETN	výbušina, Pentaerythritol Tetranitrát
HNAB	výbušina, Hexanitro-azobenzen
PMMA	Poly Methyl Metakrylát
DPO	Digital Phosphorus Oscilloscope, přístroj pro měření změny napětí v čase
DHP	Deoxidized High Phosphorus, typ mědi
NQ	Nitroguanidin
M-NQ	Methyl-Nitroguanidin
POM	Polyoxymethylén
ICT	Institut für Chemische Technologie



## Úvod

S rozvojem společnosti roste její potřeba nejen stavebního a výrobního materiálu. Dobývání kamene, vápence, uhlí i železné rudy se provádí, ať už přímo či nepřímo, pomocí výbušnin. Stejně tak i pro rozšiřování infrastruktury vytvářením tunelů jsou výbuštiny potřeba. Všeobecně se rozmáhající trend zvyšování ekologie průmyslových procesů a i jejich konečných výrobků zasáhl i oblast energetických materiálů (výbušnin, střelivin a pyrotechnických směsí). Z tohoto hlediska je žádoucí některé z dosud používaných výbušnin nahradit ekologičtějšími, výkonnějšími a ekonomicky výhodnějšími. Zároveň s rozvojem mezinárodní situace v posledních letech je zájem o nové, výkonnější, stabilnější a ekologičtější výbuštiny pro vojenské účely.

Vývoj nových výbušnin je drahá a pomalá záležitost a je žádoucí tento proces ulehčit. Zjednodušení vývojového procesu může být dosaženo předpovědí toho, jestli zrovna zkoumaná látka má potenciál být použitelnou novou výbušninou. Výbuštiny se dají charakterizovat různými vlastnostmi, kde podle aplikace dané výbuštiny jsou některé parametry důležité a jiné méně, například pro výbuštiny používané v kamenolomu budou důležité parametry objem vytvořených plynných produktů a pracovní schopnost, kdežto pro výbuštinu použitou v protitankové střele budou důležité detonační rychlost a detonační tlak. Předpovídání vlastností výbušnin lze provádět na základě jejich chemického složení pomocí různých matematických (termodynamických) modelů. Syntéza nových látek nebo optimalizace směsí je často zdoluhavá a drahá na lidskou práci. Předpovězením toho, které látky mají potenciál se tyto vstupy redukovat. Až teprve po tom, co je nasyntetizovaná látka či směs připravena ve větším množství je možno její výbušninářské parametry změřit experimentálně. Dobrá shoda předpovězených parametrů a experimentálních výsledků je stěžejní pro ekonomicky unesitelný vývoj nových výbušnin.

Tato práce se soustředí na popis experimentálních metod použitelných a používaných ke stanovení parametrů výbušnin pro potenciální kalibraci, nebo porovnání výsledků z výpočetních programů. Porovnáním rozdílu mezi výpočetními modely, jejich úpravou a zpřesněním lze dosáhnout ekonomicky přijatelnějšího a příjemnějšího vývoje.

V teoretické části je stručně popsána detonace, vývoj jejího porozumění, některé z používaných modelů pro představu a popis detonačního děje. Je zmíněn výpočetní program EXPLO 5 (verze 6.0.4.), který je pro předpovídání detonačních parametrů používán na Ústavu Energetických Materiálů na Univerzitě Pardubice. Dále teoretická část obsahuje popis a princip různých experimentálních metod pro měření různých detonačních parametrů.

V experimentální části jsou shrnuty metody stanovení některých detonačních parametrů používané na Ústavu Energetických Materiálů na Univerzitě Pardubice. Jsou popsány měřící přístroje potřebné pro provedení těchto měření a jsou popisovány pracovní postupy pro měření jednotlivými technikami. Experimentální část obsahuje i popis vyhodnocení naměřených výsledků.

Výsledková část obsahuje výčet naměřených parametrů z experimentální části a diskuzi porovnávající mezi sebou jednotlivé techniky, na základě náročnosti, opakovatelnosti výsledků a uživatelské příjemnosti. Potom následuje porovnání experimentálních výsledků s teoretickými předpověďmi vypočtenými programem EXPLO 5.

Cílem této práce je provést rešerši týkající se experimentálních metod stanovování různých detonačních parametrů, popsat princip a pracovní postup vybraných experimentálních metod a následně jejich výsledky porovnat s teoretickými predikcemi vypočtenými programem EXPLO 5.

**Část I**

**Teoretická část**

## Kapitola 1

# Teorie detonace

Výbušiny jsou energetické materiály, které mají vysokou reakční rychlost. Po dodání aktivační (iniciační) energie se reakční zóna pohybuje nadzvukovou rychlostí (vztaženou na materiál nezreagované výbušiny) skrze nálož. Reakční zóně postupující skrze výbušinu se říká detonační vlna [1].

V průběhu reakcí v detonační vlně je velmi rychlý vzrůst termodynamických parametrů jako jsou tlak a teplota. Společně s nadzvukovou rychlostí reakční zóny to má za důsledek, že nezreagovaný materiál před detonační vlnou je nenarušen až do chvíle kdy přes něj detonační vlna přejde. Narozdíl od deflagrace, nebo hoření, kde materiál před reakční zónou je předehříván teplem z chemické reakce [1].

Detonace je složitý jev kombinující termodynamiku s kinetikou, rázovou hydrodynamikou a dynamikou kapalin popisující expanzi detonačních produktů. Detonace probíhá v řádu mikrosekund, což stěžuje její měření. Hlavně na počátku jejího studia na konci devatenáctého století, kdy byly jen těžko k dispozici měřicí přístroje schopné takových rychlostí. Asi první měření detonační rychlosti bylo provedeno Berthelotem a Vieillem [2] a nezávisle Mallardem a Le Chatelierem [3]. Jak se rozšířilo povědomí o tom, že v látkách, které vybuchují nedochází pouze k rychlému hoření ale i k jinému jevu začalo být žádoucí ho nějak popsat, tím se zrodily modely detonace.

## 1.1 Modely detonace

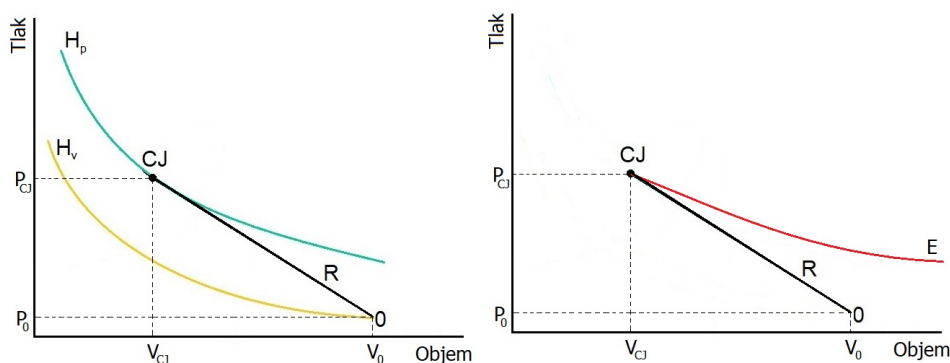
Pro porozumění fyzikálních a jiných dějů se často vytvářejí modely, přibližují chování jevu a vysvětlují experimentální výsledky, nebo zkušenosti. Ve chvíli, kdy se reálné výsledky začnou příliš vymikat modelu je potřeba model upravit aby vycházel nejen s novými poznatky, ale i s předchozími. Tímto způsobem se postupně tvoří model schopný skutečně popsat daný jev. První vytvořená představa o tom co se vlastně ve výbušině děje byla vytvořena nezávisle na sobě Chapmanem [4], Jouguetem [5] a Michaelsonem [6] informace o Michalesonově práci však neopustila rusko po několik desítek let, takže se model spojuje pouze s Chapmanem a Jouguetem. Tento model se udržel do druhé světové války, kdy opět nezávisle na sobě navrhli Zeldovič [7], von Neuman [8] a Döring [9] úpravu CJ teorie. V moderní době je snaha do detonačních modelů zavést reakční kinetiku a hydrodynamiku a strukturu čela detonační vlny, tento vývoj však ještě není ukončený. Popis historického vývoje modelů a základní teorie je popsán například v [1].

### 1.1.1 CJ model

Chapman Jouguetův (CJ) model detonace je první a nejjednodušší z modelů detonace. Tento model uvažuje okamžitou chemickou reakci a pohyb detonace v jednorozměrném prostoru v nekonečně širokém vzorku výbušiny. Chemická reakce, která okamžitě dosáhne rovnováhy neztrácí energii do okolí a pohání detonační vlnu konstantní rychlostí skrze nezreagovanou výbušinu. Nezreagovaná výbušina v prostoru je charakterizována vlastnostmi jako objem (nebo hustota) teplota a tlak okolí. V  $P$ - $V$  souřadnicích lze stav výbušiny v klidu označit objemem  $V_0$  a tlakem  $P_0$ . CJ model uvažuje okamžité zreagování výbušiny v detonační zóně, výbušina je tedy okamžitě přeměněna na plynné produkty reakce. Tyto produkty lze, podobně jako ideální plyn, popsat stavovými rovnicemi. Příklady stavových

rovnice produktů detonace jsou Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) [10], EXP-6 [11] a JCZ3 [12]. Zreagovaná výbušina se může teoreticky dostat kamkoliv na této stavové rovnici produktů, nazývanou hugoniotou (rázovou adiabatou) produktů.

Finální stav jakého detonační produkty dosáhnou je charakterizován pěti parametry, tlakem  $P$ , detonační rychlostí  $D$ , rychlostí částic materiálu  $u$ , hustotou  $\rho$  (nebo reciprokým objemem  $V = \frac{1}{\rho}$ ) a vnitřní energií  $e$  [13]. CJ teorie udává podmínku, že nejpravděpodobnější průběh detonace je takový, kde je detonační rychlost rovna součtu rychlosti částic a rychlosti zvuku v nezreagované výbušině, to odpovídá nejmenší směrnicí vedoucí z původního stavu výbušiny do hugonioty detonačních produktů. Průběh detonace podle CJ modelu je znázorněn na obrázku 1.1 nalevo.

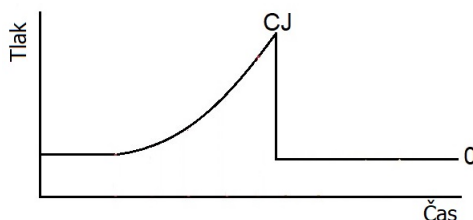


Obrázek 1.1: Popis detonace podle CJ modelu v souřadnicích  $P$ - $V$ . Dosažení CJ bodu (nalevo) a expanze produktů (napravo) [14].

Na obrázku 1.1 je stav výbušiny před detonací je označen bodem 0, který leží na rázové adiabatě (hugoniotě) nezreagované výbušiny  $H_v$ . Rychlost detonace určuje směrnicí Rayleigho přímky  $R$  jejíž směrnicí je zapsána v rovnici (1.1), kde  $D$  je detonační rychlost a  $\rho_0$  hustota výbušiny před detonací. Rayleigho přímka je tečnou k hugoniotě detonačních produktů  $H_p$ , jejich společný bod je označen jako CJ (Capman-Jougetův bod). Detonační parametry v CJ bodě se označují jako CJ parametry. CJ bod je definován pomocí tlaku  $P_{CJ}$ , objemu  $V_{CJ}$  a zmíněné detonační rychlosti  $D_{CJ}$ .

$$R = \rho_0^2 D^2 \quad (1.1)$$

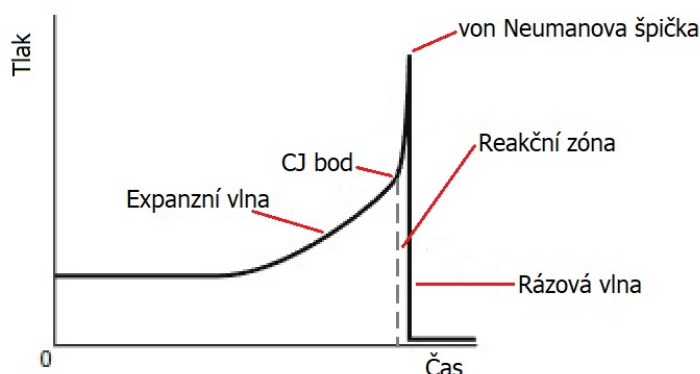
Po tom co výbušina zreaguje na detonační produkty a dosáhne CJ parametrů začnou detonační produkty expandovat podél expanzní izentropy, tato křivka je opět popsána stavovou rovnicí, nejčastěji Jones-Wilkins-Lee (JWL) [15]. Tato expanze plynů je to, čím výbušina koná práci a je charakterizována parametry JWL rovnice. Rayleigho přímka je tečnou k expanzní izentropě stejně jako k hugoniotě produktů. Průběh expanze po dosažení CJ bodu je znázorněn na obrázku 1.1 vpravo. Průběh detonace lze také znázornit v souřadnicích  $P$ - $t$ , kde dosažení CJ bodu je kolmý nárůst tlaku a expanzní izentropa je postupný pokles tlaku za reakční zónou je znázorněn na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Popis detonace podle pístového modelu v souřadnicích  $P$ - $t$ .

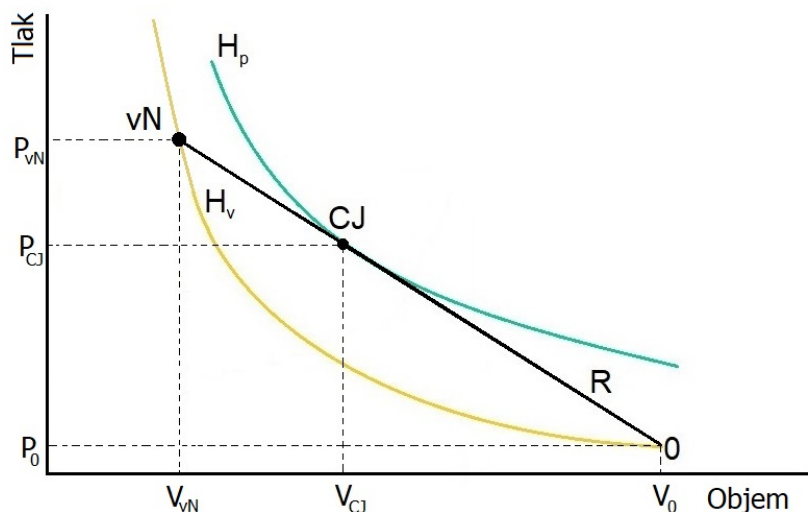
### 1.1.2 ZND model

Model detonace upravený Zeldovičem, von Neumanem a Döringem již oproti CJ modelu uvažuje nenulovou dobu trvání chemické reakce, ustálení rovnováhy a přítomnost rázové vlny, která inicjuje detonační reakci. Stále neuvažuje expanzi do stran, tedy stále se jedná o planární detonační vlnu. Znázornění tohoto modelu v  $P-x$  souřadnicích je na obrázku 1.3. Při příchodu detonační vlny je nejdříve výbušina stlačena rázovou vlnou, vyvolanou a poháněnou chemickou reakční zónou za ní. Protože toto stlačení probíhá v původním materiálu výbušiny, jeho stav musí být na Hugoniotě nezreagované výbušiny. Po stlačení touto rázovou vlnou na tlak takzvané Von-Neumanovy špičky začnou probíhat chemické reakce, které dosáhnou rovnováhy v CJ bodě. V průběhu chemických reakcí tlak klesá z hodnoty ve von-Neumanově špičce  $P_{VN}$  na tlak v rovnovážném stavu  $P_{CJ}$ . Po dosažení chemické rovnováhy nastává expanze plynů až do vyrovnání tlaku s okolím [8][16][17].



Obrázek 1.3: Popis detonace podle ZND modelu v souřadnicích  $P-t$  [18] [14].

ZND model detonace zobrazený v  $P-V$  souřadnicích (na obrázku 1.4) je podobný pístovému modelu. Na něm bod 0 znázorňuje výbušinu před příchodem detonační vlny. Detonační rychlost je opět stanovena Rayleigho přímkou která je tečnou k hugoniotě produktů. V ZND modelu, ale pokračuje dokud znovu neprotne hugoniotu nezreagované výbušiny. V tomto průsečíku se nachází bod vN který odpovídá objemu a tlaku ve von Neumanově špičce. Následně probíhá chemická přeměna výbušiny na detonační produkty, tedy z hugonioty výbušiny se přechází na hugoniotu produktů detonace zpět podél Rayleigho přímky do CJ bodu. Z CJ bodu probíhá expanze produktů podél jejich hugonioty.

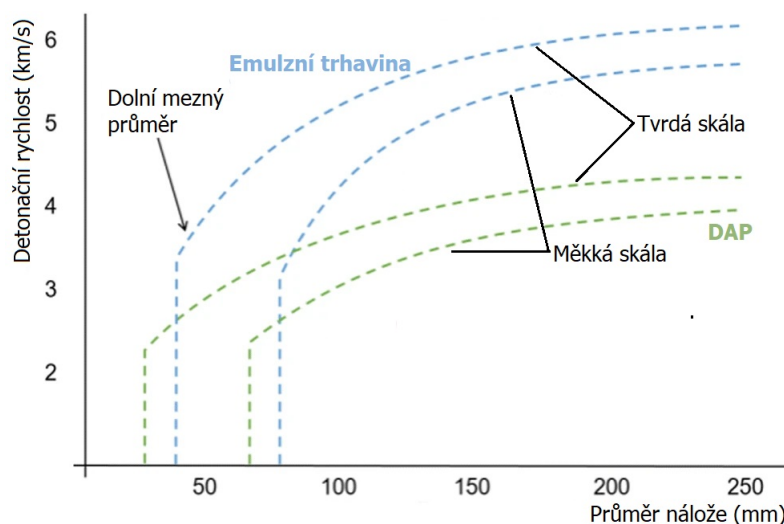


Obrázek 1.4: Popis detonace podle ZND modelu v souřadnicích  $P-V$  [19].

### 1.1.3 Další modely detonace

Další vývoj v modelech detonace představuje například zahrnutí konečného rozměru nálože se stranovou expanzí a zakřivením detonační vlny, diskutovaný Eyringem a dalšími [20]. Na něj navazující model popsany Woodem a Kirkwoodem [21]. Ti uvažují, závislost mezi detonační rychlostí a velikostí zakřivení čela detonační vlny. Zakřivení detonační vlny jemožno popsat DSD modelem (Detonation Shock Dynamics). Jeho nejjednodušším vyjádřením je normálová detonační rychlost (kolmá na tečnu detonační vlny v daném bodě) jako funkce lokálního zakřivení  $\kappa$ . Této funkci se říká  $D_n - \kappa$  parametr a je závislý na konkrétním materiálovém rozhraní (vlastnost trhaviny). Pro konkávní zakřivení je  $\kappa > 0$ , pro konvexní je  $\kappa < 0$  a pro nulové zakřivení se rovná 0. Tedy normálová rychlost v místě nulového zakřivení se rovná detonační rychlosti  $D_{CJ}$ . DSD model může být aplikován i na interakci detonační vlny s materiálem obalu, kde opět závisí  $\kappa$  na konkrétní kombinaci trhaviny a obalu [22][23].

Toto zakřivení je standardním projevem reálných detonací a dá se ovlivnit průměrem nálože. Čím širší nálož tím menší efekt bude stranová expanze mít, naopak při zmenšování průměru může dojít až k tomu, že stranová expanze úplně zastaví detonaci. Průměru výbušiny takového pod kterým už není schopna stabilní detonace se říká dolní mezný průměr. Se zvětšujícím se průměrem rostou detonační parametry, dokud je dosaženo takzvaného horního mezného průměru, nad kterým už dalším zvyšováním průměru nálože se detonační parametry nemění. Pro ilustraci je na obrázku 1.5 závislost detonační rychlosti na průměru nálože.



Obrázek 1.5: Graf závislosti detonační rychlosti na průměru nálože. [24].

Jak lze vidět z obrázku 1.5, ovlivnit zakřivení detonační vlny lze také utěštěním, podle materiálu okolního prostředí se mohou zpětně odrážet rázové a expanzní vlny, které mohou ovlivnit reakční zónu, nebo produkty detonace. Například uzavřením nálože do kovové trubky, nebo při adjustování trhaviny do vrtu v lomu je možné aby stabilně detonovala i pod dolním mezným průměrem stanoveným s neuzavřenou náloží.

## 1.2 Teoretické výpočty detonačních parametrů

Pomocí teoretických výpočtů se parametry výbušin dají vypočítat ze znalosti pouze několika základních vlastností, kterými jsou chemické složení, hustota a slučovací teplo. Pro charakterizaci detonace bylo zmíněno, že je žádoucí zjistit hodnoty pěti parametrů ( $P$ ,  $V$ ,  $D$ ,  $u$ ,  $e$ ). Pro jakoukoliv soustavu pěti neznámých vlastností je potřeba pět nezávislých rovnic. Tři z těchto jsou zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Tyto rovnice (1.2), (1.3) a (1.4) popisují stavy před a po průchodu rázové vlny [13].

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{U - u_0}{U - u_1} = \frac{v_0}{v_1} \quad (1.2)$$

$$P_1 - P_0 = \rho_0(u_1 - u_0)(U - u_0) \quad (1.3)$$

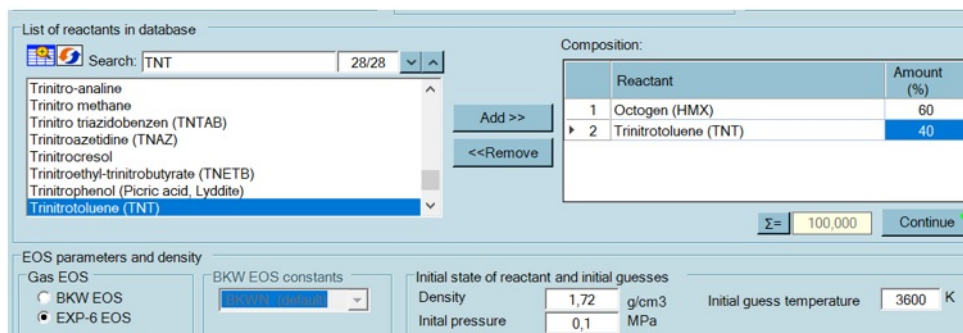
$$e_1 - e_0 = \frac{P_1 u_1 - P_0 u_0}{\rho_0(U - u_0)} - \frac{1}{2}(u_1^2 - u_0^2) \quad (1.4)$$

Čtvrtou rovnicí potřebnou do soustavy je jedna vybraná stavová rovnice popisující hugoniotu detonačních produktů (zmiňované BKW, JCZ3, EXP 6). Pátou potřebnou rovnicí je vyjádření CJ podmínky, tedy toho, že nejpravděpodobnější detonační rychlost se nachází na tečně k hugoniotě produktů.

Pro výpočet expanze produktů detonace se používá zmíněná Jones-Wilkins-Lee (JWL) vypsaná jako rovnice (1.5), kde  $P$  je tlak,  $A$ ,  $B$  a  $C$  jsou tlakové koeficienty,  $V$  je specifický objem,  $E$  je specifická vnitřní energie,  $R_1$  a  $R_2$  jsou kontrolní parametry (například poloměry trubky při cylinder testu) a  $\omega$  je adiabatický exponent. Tyto rovnice tvoří základ výpočetních softwarů, jako jsou CHEETAH a EXPLO 5, pro stanovení detonačních parametrů z několika vstupních dat [25][26].

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \omega \frac{E}{V} \quad (1.5)$$

Vstupní informace, které jsou potřeba do výpočetních softwarů zadat pro provedení výpočtu jsou chemické složení zkoumané látky, její hustota a její spalné teplo. Na základě těchto vstupů a zmíněných stavových rovnic je možno předpovědět výsledky experimentů, nebo teoreticky charakterizovat nově syntetizovanou látku. Pro složitější výpočty je možné jako vstup do programu uvést i experimentálně změřené zakřivení detonační vlny. Snímek obrazovky ze zadávání vstupních údajů a z výsledného listu vypočtených hodnot z programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.) jsou na obrázcích 1.6 a 1.7.



Obrázek 1.6: Snímek obrazovky z výpočetního programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.), zadávání vstupních parametrů.

```

DETONATION PARAMETERS (at the C-J point) :
-----
Heat of detonation                = -4063,011  kJ/kg
Detonation temperature            = 3712,8    K
Detonation pressure               = 6,90252  GPa
Detonation velocity               = 5379,942  m/s
Particle velocity                 = 1425,546  m/s
Sound velocity                    = 3954,396  m/s
Density of products               = 1,224447  g/cm3
Volume of products                = 0,8166953 cm3/g
Exponent 'Gamma'                  = 2,773911
Moles of gaseous products         = 10,82119  mol/mol explosive
Moles of condensed products       = 7,055295E-05 mol/mol explosive
Volume of gas at STP              = 921,6454  dm3/kg
Mean molecular mass of gas. prod. = 26,5351   g/mol
Mean molecular mass of cond.prod. = 12,011    g/mol
Mean molecular mass of all prod.  = 26,535   g/mol
Entropy of products               = 7,8723   kJ/kg K
Internal energy of products        = 5079,132  kJ/kg, i.e. 4,571218 kJ/cm3
Compression energy                = 1016,12   kJ/kg, i.e. 0,9145082 kJ/cm3

```

Obrázek 1.7: Snímek obrazovky z výpočetního programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.), vypočtené hodnoty.

## Kapitola 2

# Výčet technik pro měření detonačních parametrů

Detonační parametry je možno měřit různými technikami, v této části budou zmíněny některé techniky pro měření detonační rychlosti, detonačního tlaku, rychlosti částic, detonační teploty, objemu produktů, zakřivení čela detonační vlny, stanovení dolních mezních průměrů, testů pracovní schopnosti a stanovení spalného a detonačního tepla.

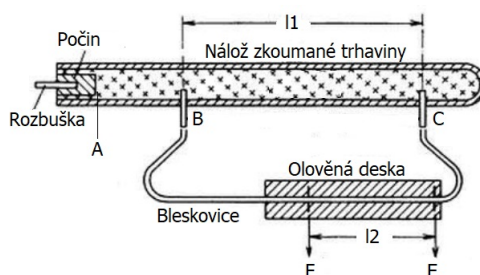
## 2.1 Měření detonační rychlosti

Nejjednodušší způsob určení detonační rychlosti spočívá ve změření času, za který detonační vlna urazí známou vzdálenost. Tento způsob měření se hodí tam, kde se detonační rychlost s uběhlou vzdáleností konstantní a lze tak vypočítat jako průměr jednotlivých změřených úseků [27]. Oproti tomu jsou technicky složitější metody, které umožňují kontinuální sledování rychlosti detonační vlny v čase. S nimi je možné vidět jestli je detonační rychlost skutečně stabilní, jestli klesá, nebo se zvyšuje [28][29].

Pro to aby se detonace plně stabilizovala, je třeba aby délka nálože byla alespoň trojnásobek jejího průměru, s kratšími náložemi je potřeba počítat s tím, že se detonace ještě nemusela plně vyvinout. Pro jednoduchost manipulace je preferovaná válcová geometrie.

### 2.1.1 Dautricheova metoda

V roce 1906 byla vyvinuta Dautricheova metoda pro měření detonační rychlosti. Tato metoda využívá znalosti detonační rychlosti bleskovice, pomocí které se dopočítá detonační rychlost zkoušeného vzorku trhaviny [30] [27]. Experimentální uspořádání je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Obrázek uspořádání Dautricheovy metody [31].

Postup experimentu je následující. Po iniciaci zkoumané trhaviny rozbuškou v bodě A postupuje detonační vlna náloží. V bodě B je iniciována bleskovice vedoucí na olověnou svědečnou desku. Mezitím pokračuje detonační vlna v náloži k bodu C, kde opět iniciuje bleskovicí, tentokrát z opačného konce. Detonační vlny postupující proti sobě v bleskovici se potkají v bodě E, který bude poznat výrazným poškozením desky. Vzdálenost mezi středem bleskovice, označeným bodem F, a místem setkání detonačních vln je označena jako  $l_2$ . Vzdálenost mezi body B a C, kde byla iniciována bleskovice



je označena jako  $l_1$ . Protože se detonační vlny potkaly v bodě E, znamená to, že trasy B-F-E a B-C-E byly detonační vlnou uraženy za stejný čas. Z toho byly odvozeny rovnice (2.1) a (2.2), kde  $t_{BFE}$  je čas potřebný pro uražení trasy B-F-E,  $t_{BCE}$  je čas potřebný pro uražení trasy B-C-E,  $L_b$  je celková délka bleskovice,  $D_b$  je detonační rychlost bleskovice a  $D_x$  je detonační rychlost zkoumané trhaviny. Finální výpočet rychlosti zkoumané trhaviny lze pak provést podle rovnice (2.3) [30] [27].

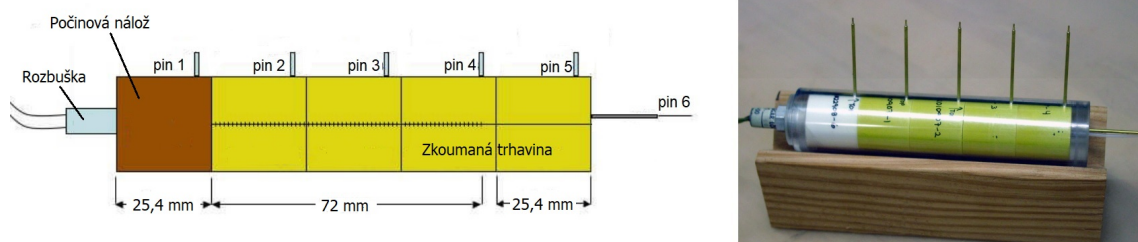
$$t_{BFE} = t_{BCE} \quad (2.1)$$

$$\frac{L_b/2 + l_2}{D_b} = \frac{l_1}{D_x} + \frac{L_b/2 - l_2}{D_b} \quad (2.2)$$

$$D_x = \frac{D_b l_1}{2l_2} \quad (2.3)$$

### 2.1.2 Měření pomocí piezoelektrických senzorů

Měření pomocí piezoelektrických senzorů (pinů) spočívá v tom, že piezoelektrické materiály (krystaly) vytváří elektrický náboj když jsou vystaveny mechanickému namáhání. Tento signál je pak zaznamenán osciloskopem. Princip měření detonační rychlosti je výpočet průměrné rychlosti detonační vlny z času příchodu prvního signálu a ze známých vzdáleností mezi jednotlivými piny [32][33]. Nákres a fotografie experimentu měření detonační rychlosti pomocí piezoelektrických senzorů jsou na obrázku 2.2.



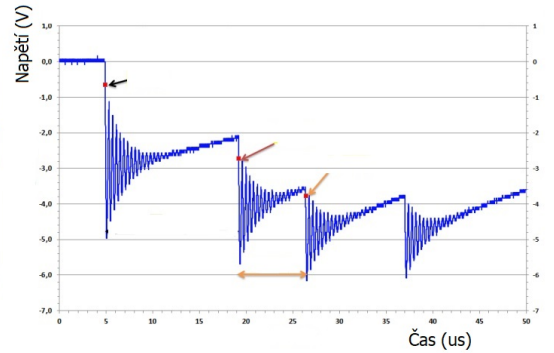
Obrázek 2.2: Nákres experimentu (vlevo) pro měření detonační rychlosti pomocí piezo pinů a jeho fotografie (vpravo) [33].

### 2.1.3 Měření pomocí ionizačních senzorů

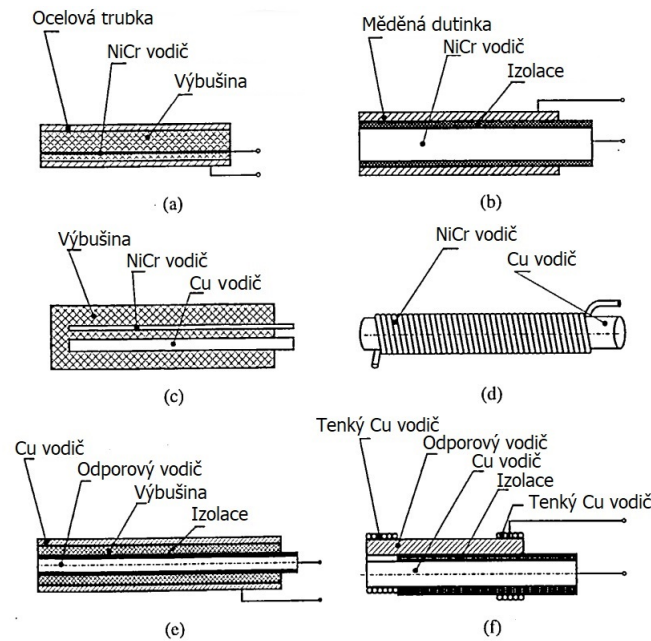
Ionizační senzory (piny) jsou dva vodiče s nespojeným koncem, na které je připojeno napětí, ale protože nejsou spojené, neprotéká jimi proud (přerušené vedení znamená nekonečný odpor). Tyto vodiče mohou být adjustovány různými způsoby, buď omotáním kolem nálože a nevodivým spojením tak, aby tvořily prstenec kolem nálože, nebo častěji (pokud to umožňuje konzistence výbušiny) vsunuté společně dovnitř do trhaviny. Po průchodu detonační vlny kolem, nebo přes odhalené konce nespojených vodičů ionizovaný materiál v detonační zóně vytvoří vodivé spojení a na okamžik bude protékat proud. Tento signál je zaznamenáván osciloskopem. Pokud jsou v náloži naadjustované dva a více ionizačních pinů se známými vzdálenostmi mezi sebou, je možné ze signálu na osciloskopu získat čas mezi jednotlivými piny. Ze známé vzdálenosti a času lze vypočítat průměrnou rychlost v daném úseku. Experiment pro měření detonační rychlosti a jeho výsledek na osciloskopu jsou na obrázku 2.3[34].

### 2.1.4 Měření odporovou sondou

Princip této metody je založen na kontinuálním měření změny elektrického odporu sondy. Odporová sonda se skládá ze dvou elektricky vodivých materiálů (elektrod) do kterých je konstantně pouštěn proud, umístěných podél osy nálože. Při průchodu detonační vlny se postupně zkracují konce elektrod



Obrázek 2.3: Foto experimentu (vlevo) pro měření detonační rychlosti pomocí ionizačních pinů a jeho výsledky (vpravo) [34].



Obrázek 2.4: Různé typy odporových sond. Amster-Gibsonova a), Jaffe-Pricova b) a c), Galyparin-Svedova d), Pittsův typ sendvič e), uzavřený typ f) [27].

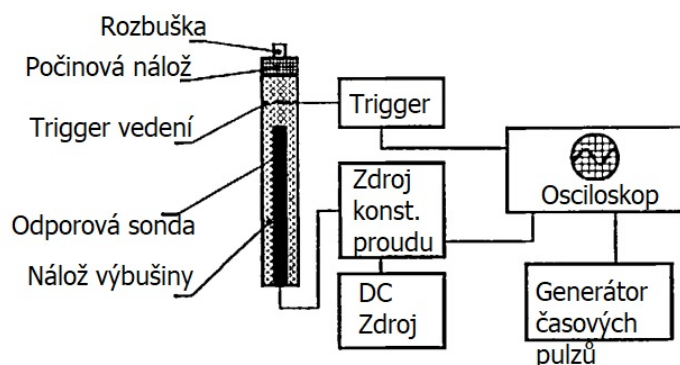
a tím se mění jejich odpor, zároveň detonační vlna svojí vodivostí uzavře elektrický obvod mezi nespojenými elektrodami. Změna odporu na sondě vyvolá změnu elektrického napětí v elektrickém obvodu a ta je kontinuálně zaznamenávána osciloskopem [29] [27]. Na obrázku 2.4 jsou příklady odporových sond.

Materiály vodičů a trubek nejsou sjednoceny pro standardní měření, například u typu d) z obrázku 2.4 uvádí zdroj [29] místo niklchromového vodiče měděný izolovaný vodič AWG No. 34, rozměry elektrod se dají také upravit podle potřeb experimentu. Pro provedení experimentu je potřeba do nálože výbušiny vložit ionizační senzor, který spustí měření osciloskopu. Návrh experimentálního uspořádání je na obrázku 2.5.

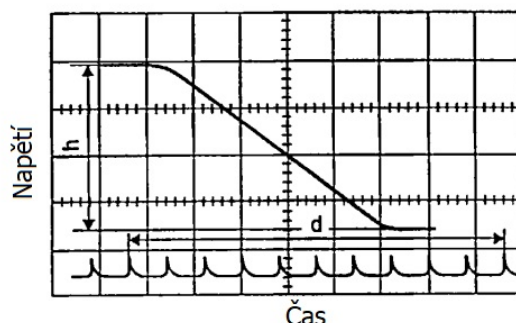
Po provedení experimentu je získán výsledek ve formě oscilogramu podobného tomu na obrázku 2.6. Pokud je tento zobrazen v x-y souřadnicích pak napětí v obvodu je pro jakýkoliv bod křivky možno spočítat podle rovnic (2.4) a (2.5), kde  $U(t)$  je napětí v daném čase,  $a$  je měřítko napětí na vertikální ose (V/cm) a  $b$  je časové měřítko na vodorovné ose ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) [35].

$$U(t) = ay(t) \quad (2.4)$$

$$t = bx(t) \quad (2.5)$$



Obrázek 2.5: Nákres experimentálního uspořádání pro kontinuální měření detonační rychlosti osciloskopem [27].



Obrázek 2.6: Příklad záznamu osciloskopu po provedení experimentu [27].

Protože odpor sondy vztažený na jednotku její délky je konstantní, lze vyjádřit vztah pro hodnotu napětí v konkrétním čase podle rovnice (2.6), kde  $L(t)$  je délka nezdetonované části nálož,  $r_p$  je odpor sondy vztažený na jednotku její délky a  $I_s$  je konstantní proud dodávaný do systému. Tato rovnice se dá dále upravit tak, aby neznámá byla délka nezdetonované nálož, která se dá vypočítat ze změřeného napětí (rovnice (2.7))[35].

$$U(t) = L(t)r_p I_s \quad (2.6)$$

$$L(t) = \frac{U(t)}{r_p I_s} \quad (2.7)$$

Detonační rychlost se pak dá spočítat jako derivace rovnice (2.7) podle času (rovnice (2.8)).

$$D(t) = \frac{dL(t)}{dt} = \frac{1}{r_p I_s} \frac{dU(t)}{dt} \quad (2.8)$$

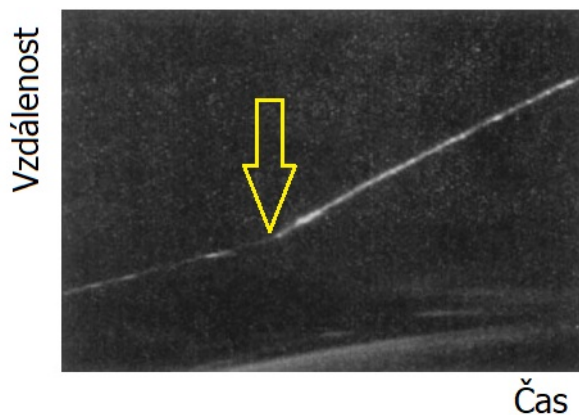
Spojením rovnic (2.4), (2.5) a (2.8) je pak vytvořen vztah (2.9) pro výpočet detonační rychlosti z hodnot odečtených z oscilogramu [35].

$$D(t) = \frac{(a/b)}{r_p I_s} \frac{dy}{dx} \quad (2.9)$$

### 2.1.5 Měření pomocí streak kamery

Detonační vlna stlačuje vzduch na povrchu trhaviny takovým způsobem, že emituje světlo. To nabízí možnost ji sledovat optickými metodami a pomocí nich získat detonační rychlost. Pro získání informací o rychlosti sledovaného procesu kamerový záznam by měl být nastaven kolmo ke směru pohybu

detonace. Zároveň během záznamu je posouváno kamerou, nebo zrcadlem, které odráží světlo z experimentu do kamery. Tímto se záznam projevívá jako světelná stopa na tmavém pozadí v souřadnicích  $x-t$ . Kde  $x$  je pozice detonační vlny v náloži a  $t$  je časová osa. Tím, že záznam světla v čase je kontinuální skrze celý detonační proces, je možné určit rychlost v jakémkoliv místě a čase jako změnu pozice za čas (směrnice světelné stopy) [36]. Ukázka záznamu ze streak kamery je na obrázku 2.7.

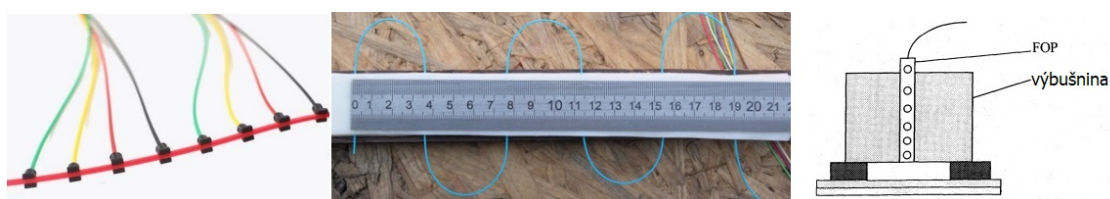


Obrázek 2.7: Záznam ze streak kamery pro určení detonační rychlosti, náložka ze dvou výbušnin, první pomalejší a druhá rychlejší. Šipkou je označeno místo, kde se detonace zrychlila. [36].

### 2.1.6 Měření pomocí optických vláken

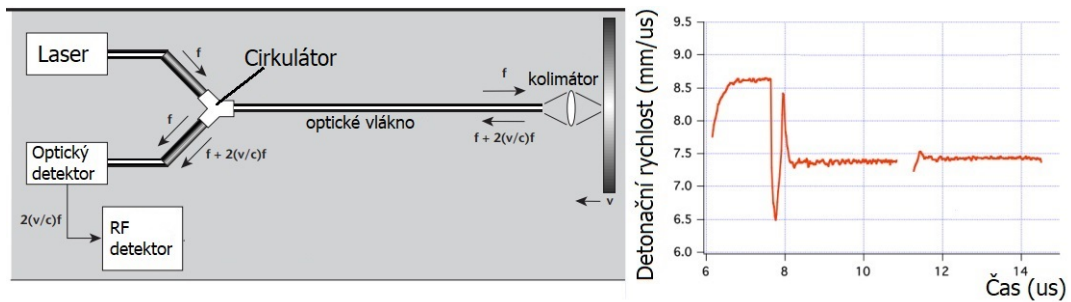
Měření detonační rychlosti s použitím optických vláken mohou být jak diskontinuální tak kontinuální a mohou mít několik způsobů vyhodnocení. Detonační vlna vyzařuje světlo, které je možno optickými vlákny zaznamenat a následně interpretovat. Některé trhaviny mohou být průsvitné vůči světlu z detonační zóny a optické vlákno tak zaznamená signál dříve, než je detonační vlna přímo u něj. S tímto jevem je potřeba počítat při vyhodnocování výsledků.

Diskontinuální metody spočívají v umístění optických vláken v náloži podél směru detonace, se známými vzdálenostmi mezi jednotlivými vlákny. Při průchodu detonační vlny projde světlo skrze optická vlákna. Po průchodu může být zaznamenáno vysokorychlostní kamerou a podle tohoto záznamu času mezi rozsvícením jednotlivých vláken lze spočítat rychlost. Zaznamenat prošlé světlo je také možné převedením na elektrický signál pomocí fotodiod a jeho sledováním osciloskopem kde zaznamenání času příchodu světla bude provedeno podle napětí na jednotlivých fotodiodách, nebo jiným záznamovým zařízením (OPTIMEX [37]) [35]. Foto adjustovaných optických vláken je na obrázku 2.8 vlevo. Pokud je žádoucí omezení počtu použitých optických vláken při měření, je možné použít jen jedno, které zaznamená světlo několikrát za sebou podle postupu detonační vlny. Buď je několikrát provléknuto skrz nálož (jako na obrázku 2.8 uprostřed), nebo je použito plastové optické vlákno a jeho izolace navrtána na známých vzdálenostech, následně je vloženo dovnitř, nebo podél trhaviny (obrázek 2.8 vpravo). Navrtané vlákno je v literatuře označováno jako FOP (Fiber optical probe), nebo PFP (Perforated Fiber optic Probe) [38].



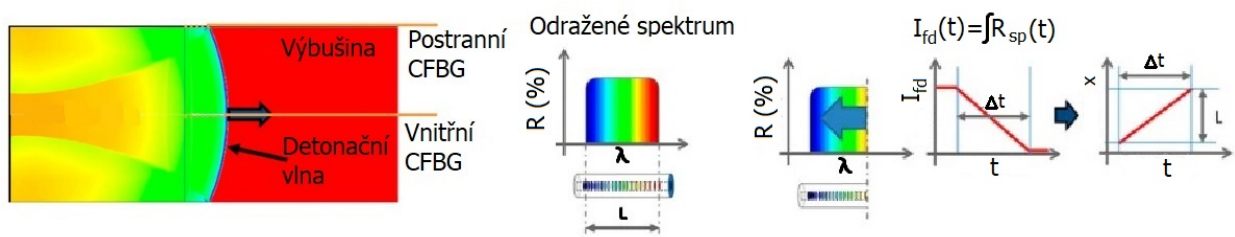
Obrázek 2.8: Optická vlákna připevňovaná na bleskovici (nalevo), optické vlákno několikrát provléknuté skrze nálož (uprostřed), schéma navrtaného optického vlákna (napravo) [39] [38].

Mezi kontinuální optické metody se řadí PDV (Photonic Doppler Velocimetry) a čerpovaná bragova mřížka (Chirped Fiber Bragg Grating). Způsob měření pomocí PDV probíhá na principu laserové interferometrie. Zdroj monofrekvenčního záření (infračervený laser) je rozdělen na cirkulátoru do dvou cest. Jedna vede optickým vláknem až k náložu. Na volný konec náložu je připevněna kovová odrazivá fólie, na kterou je namířený kolimátor (speciální zakončení optického vlákna). Laser vysílaný kolimátorem na odrazivou plochu je opět kolimátorem sbírán jako odražené záření, toto je sečteno s frekvencí původního (to je přivedeno hned po rozdělení na začátku). Součet odraženého a původního záření je analyzován Fourierovou transformací a je z něj získána rychlost pohybu odrazné plochy. Schéma PDV měření a příklad výstupního záznamu pro PDV optické vlákno vložené do trhaviny podél směru detonace jsou na obrázku 2.9 [40][33][41].



Obrázek 2.9: Schéma PDV měření [42] a příklad výstupního záznamu [43].

Metoda měření detonační rychlosti pomocí CFBG spočívá v tom, že konec optického vlákna je vyfrézován tak aby odrážel v různých částech různé vlnové délky. Toto vyfrézování se dělá laserem a je možné ho udělat na velmi malé části optického vlákna (2 mm). Vyfrézovaný konec vlákna je vložen do výbušiny podél její osy a je do něj pouštěno spektrum obsahující všechny vlnové délky, které je schopné odrážet. Jak detonační vlna začne přecházet přes optické vlákno ničí postupně vyfrézovanou část tak, že přestává být schopna odrážet konkrétní vlnové délky jednu po druhé. Ze znalosti délky vyfrézování a času za jaký přestane být zaznamenáván odraz vlnových délek lze vypočítat detonační rychlost. Další způsob získání detonační rychlosti spočívá ve vynesení závislosti celkové odražené intenzity světla (která postupně klesá do nuly) na čase [33][41]. Nákres vyfrézovaného vlákna ve výbušnině a záznamu z měření je na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10: Vyfrézovaný konec vlákna ve výbušnině s procházející detonační vlnou a záznam z měření metodou CFBG [41].

### 2.1.7 Rádiová interferometrie

Je známo, že detonační zóna obsahuje dostatečné množství ionizovaných částic na to, aby byla schopná vést elektrický proud. Toho je využíváno při měření detonační rychlosti pomocí ionizačních pinů (popsané v části 2.1.3). Tyto ionizované produkty v detonační zóně jí činí odrazu schopnou vůči elektromagnetickým vlnám o určité vlnové délce. Vzhledem k iontové hustotě v detonační zóně je odhadovaným horním limitem vlnová délka v řádech centimetrů. [28].

Detonační rychlost je měřena pozorovanou změnou frekvence odraženého záření, způsobenou posunutím odrazné plochy (detonační vlny) v čase. Toto je známo jako Dopplerův efekt. Rádiová interferometrie je kontinuální měřicí metoda používající konstantní emise záření, na rozdíl od radaru (radio detection and ranging), který využívá pulzních signálů [44]. Cook [28] popsal způsob výpočtu vycházející ze vztahu pro Dopplerův jev, který je v rovnici (2.10).

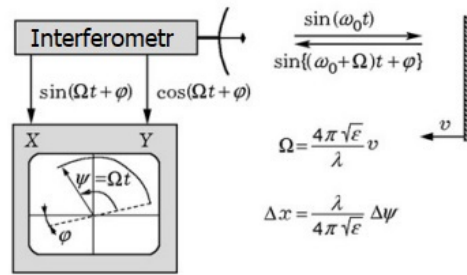
$$f = \frac{c + v}{c - v} f_0 \quad (2.10)$$

Kde  $f_0$  je původní frekvence mikrovlnného záření o rychlosti  $c$ ,  $v$  je rychlost cíle. Protože se v realitě elektromagnetické záření pohybuje skrze prostředí s indexem lomu  $n$ , není rychlost šíření záření rovná  $c$ , ale  $c/n$ . Takto upravený vztah a z něj odvozený výpočet detonační rychlosti je v rovnicích (2.11) a (2.12). Kde  $D$  je detonační rychlost. [28]

$$f = \frac{(c/n) + D}{(c/n) - D} f_0 \quad (2.11)$$

$$D = \frac{(f - f_0)c}{2nf_0} \quad (2.12)$$

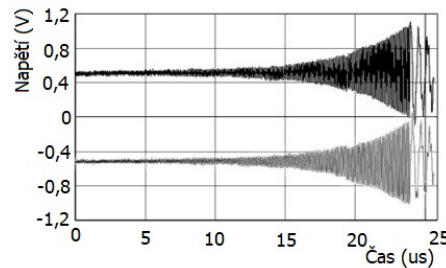
V novějších pracích Belského [44] a dalších se výpočet rychlosti stanovuje jinak. Experimentální uspořádání rádio interferenční metody je zobrazeno schématem na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11: Schéma radiointerferenční metody [44].

Studovaný objekt je kontinuálně ozařován harmonickým elektromagnetickým zářením definovaným jako  $\sin(\omega_0 t)$ . Které se při odrazu od pohybujícího se objektu změní o Dopplerův posun  $\Omega$  a fázový posun  $\phi$ , určený vlastnostmi odrazné plochy. Odražené záření je tedy  $\sin(\omega_0 t + \Omega t + \phi)$ . Na výstupu z interferometru jsou vytvářeny dva nezávislé signály  $\sin(\Omega t + \phi)$  a  $\cos(\Omega t + \phi)$ . Tyto signály jsou digitálně zaznamenávány. [44]

Výsledkem záznamu je graf signálů  $\sin(\Omega t + \phi)$  a  $\cos(\Omega t + \phi)$  ukázaný na obrázku 2.12. Z něj je možno pomocí vzorce (2.13) vypočítat změnu polohy odrazné plochy. Rychlost odrazné plochy lze pak spočítat z Dopplerova posunu, z rovnice (2.14) [44].



Obrázek 2.12: Rádiový interferogram pro HMX pojené polymerem [44].

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\epsilon}} \Delta\psi \quad (2.13)$$

$$\Omega(t) = \frac{4\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda}v(t) \quad (2.14)$$

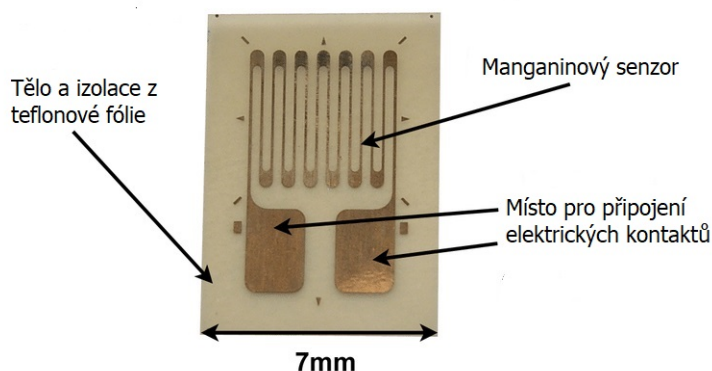
Kde  $\Delta x$  je změna polohy odrazné plochy,  $\lambda$  je vlnová délka elektromagnetického záření,  $\varepsilon$  je elektrická permitivita prostředí skrze které se odrazná plocha pohybuje.  $\Delta\psi$  je fázový posun mezi funkcemi  $\sin(\Omega t + \phi)$  a  $\cos(\Omega t + \phi)$ . Dá se spočítat jako  $\Delta\psi = \Omega(t)\Delta t$  kde  $\Omega(t)$  je Dopplerův frekvenční posun a  $\Delta t$  je perioda vzorkování,  $v(t)$  je rychlost odrazné plochy [44].

## 2.2 Měření detonačního tlaku

Detonační tlak je možno měřit přímo snímačem vloženým do nálože, nebo nepřímo přepočtem z jiných detonačních parametrů jako je například rychlost částic nebo rychlost rázové vlny [45].

### 2.2.1 Manganinový senzor

Manganin je slitina mědi, manganu a niklu [35]. Je charakteristický tím, že při dynamickém zatížení tlakem znatelně mění svůj odpor. Manganinové senzory mají nízkou citlivost vůči zatížení tlakem a dají se tak použít pro měření vysokých tlaků přítomných při detonaci. Závislost mezi měřeným tlakem a změnou odporu senzoru je takřka lineární a velmi málo se jim mění vodivost (odpor) s teplotou [35]. Senzor se skládá z teflonové, nebo epoxydové izolace, ve které je aktivní část a kontakty pro vstupní napětí. Fotografie senzoru je na obrázku 2.13.



Obrázek 2.13: Fotografie manganinového senzoru. [46]

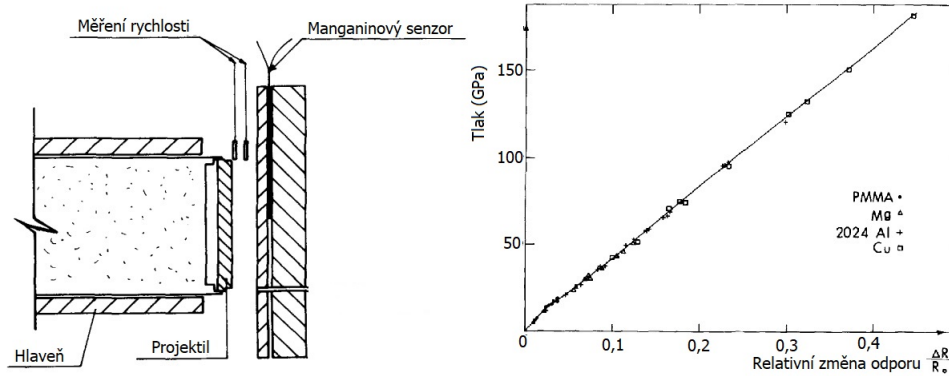
Při experimentu je manganinový senzor vložen do nálože tak, aby kolmo na jeho plochu dopadla detonační vlna. Senzor je pulzně napájen, velikost napětí bývá 30-300 V a doba trvání impulsu  $100\mu s$ . Dodávaný proud je 3-30 A. Vztah mezi změnou odporu konkrétního typu manganinového senzoru a odpovídajícím napětím je zjištěn kalibrací. Pokud je systém nakalibrovaný, je možné relativní změnu odporu senzoru vyjádřit takto podle rovnice (2.15). Kde konstanty  $A$  a  $B$  jsou získány fitem experimentálních dat relativní změny odporu proti změně napětí na kalibrační křivku. Protože závislost relativní změny napětí je takřka lineární se změnou tlaku, je možno rovnici upravit tak aby z ní šel vypočítat tlak na senzoru.

$$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{A\Delta U}{B - \Delta U} \quad (2.15)$$

$$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{A\Delta U}{B - \Delta U} = Kp \quad (2.16)$$

V rovnici (2.16) je  $K$  koeficientem piezoelektrického odporu manganinového senzoru.  $K$  je možno získat z kalibrace tak, že na manganinový senzor vložený mezi dva plechy jsou různými rychlostmi

nastřelovány projektily z různých materiálů (měď, hliník, PMMA) ze známých rychlostí a materiálových vlastností projektilů lze spočítat vygenerovaný tlak při srážce s plechy, které mezi sebou mají manganinový senzor a zjistit jaký odpor senzor generuje při známých tlacích [47][48]. Na obrázku 2.14 je experimentální uspořádání kalibrace a kalibrační závislost.



Obrázek 2.14: Experimentální uspořádání kalibrace piezorezistivního koeficientu manganinového senzoru (vlevo) a kalibrační závislost (vpravo) [47].

## 2.3 Měření rychlosti částic

Rychlost částic, značená  $u$  je rychlost s jakou se pohybují částice materiálu (například detonační produkty, nebo urychlený kov). Není to veličina specifická pro výbušiny.

### 2.3.1 Urychlení kovového disku

Jednou z prvních metod měření rychlosti částic a potažmo detonačního tlaku je metoda letícího disku (Flying Plate Test nebo Push Plate Test). Byla prvně navržena v roce 1945 a později upravena Duffem [19] a Dealem [49] v letech 1955 a 1957. Tlak je funkce rychlosti částic materiálu jak je popsáno v rovnici 2.17. Při známém chování inertního materiálu (kovového disku) při rázovém zatížení, je možno z jeho rychlosti spočítat tlak rázové vlny. Rychlost kovového disku je možno měřit pomocí elektrických čidel, nebo opticky [35][19][49][40].

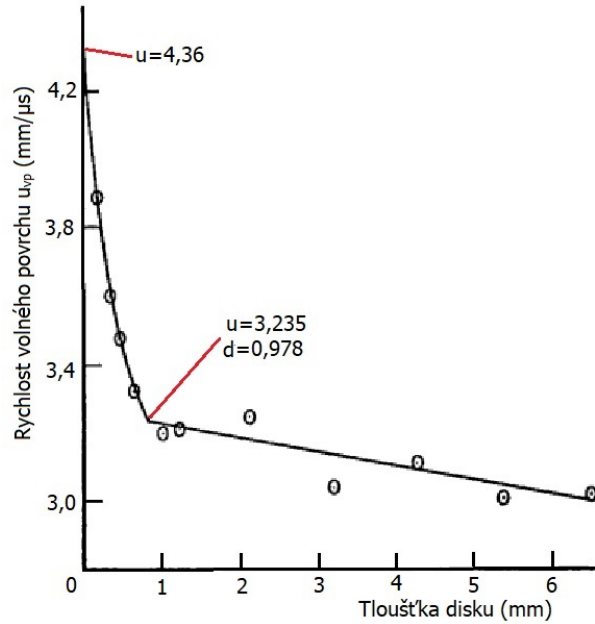
$$P_d = \rho_d u U \quad (2.17)$$

Kovový disk přiložený k trhavině je výbuchem urychlen, rychlost částic materiálu je polovina rychlosti volného povrchu urychleného disku. Rychlost volného povrchu závisí na tloušťce kovového disku [35][50]. Příklad závislosti rychlosti volného povrchu na tloušťce disku pro dural urychlovaný výbušinou Composition B je na obrázku 2.15.

Bod, který vznikne extrapolováním strmé části do nulové tloušťky disku odpovídá tlaku ve von Neumanově špičce, protože nulová šířka inertního materiálu nijak neovlivní rázovou vlnu. Vnenulové tloušťce inertního materiálu už neprobíhá žádná chemická reakce, která by dodávala rázové vlně energii, takže maximální tlak na čele rázové vlny začne klesat. Nejdříve poměrně rychle, protože začne mizet von Neumanova špička, do chvíle kdy je maximální přetlak vlny roven tlaku v CJ bodě. Následně klesá tlak pozvolna. Bod, ve kterém se láme průběh závislosti rychlosti volného povrchu na tloušťce disku, odpovídá parametrům detonační vlny v CJ bodě [19][49].

Po nalezení bodu, který odpovídá CJ parametrům jako na obrázku 2.15, je možno podle Duffa [19] vypočítat detonační tlak pomocí rovnic (2.18) pro tlak v disku  $P_m$  a (2.19) pro tlak v trhavině  $P_{tr}$ , kde  $\rho_2$  je hustota kovového disku,  $u_2$  je rychlost volného povrchu,  $D_2$  je rychlost rázové vlny v kovovém disku,  $\rho_1$  je hustota trhaviny a  $D_1$  je detonační rychlost. Rychlost rázové vlny v kovovém disku je možno spočítat podle rovnice hugonioty, pokud jsou známy materiálové konstanty  $C_0$  a  $s$ .





Obrázek 2.15: Závislost rychlosti volného povrchu na tloušťce disku [19].

Po získání rychlosti částic respektive rychlosti volného povrchu rozhraní výbušiny a disku je možné vypočítat tlak v trhavině podle Cooperova postupu popsaného v následující části.

$$P_m = \rho_2 \frac{u_{vp} U}{2} \quad (2.18)$$

$$P_{tr} = \frac{P_m(\rho_1 D + \rho_2 U)}{\rho_2 U} \quad (2.19)$$

### 2.3.2 DAX

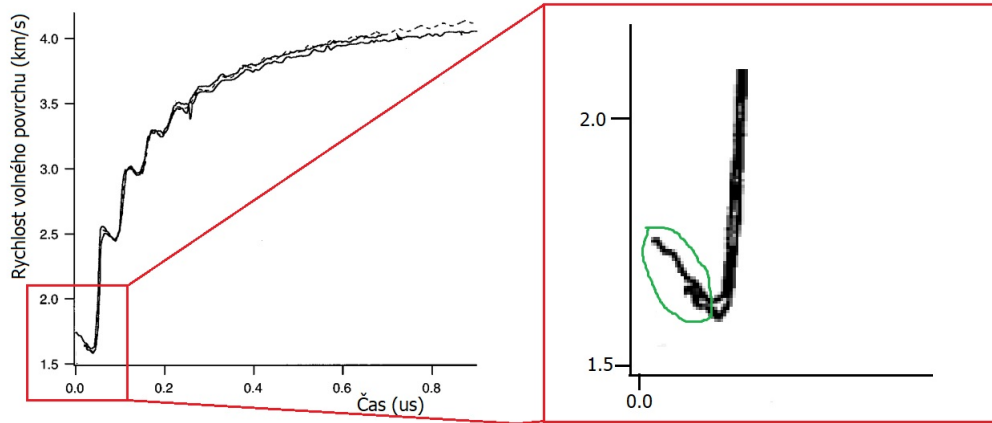
Modernější metoda, vycházející z metody měření urychlení disku, je tzv. metoda DAX (Disc Acceleration Experiment)[51][52]. Jedná se v principu o stejnou techniku, ale s trochu jiným způsobem vyhodnocení. Metoda DAX využívá k měření rychlosti disku PDV (Photonic Doppler Velocimetry). Ze záznamu rychlosti volného povrchu pouze několika málo (nebo i jen jednoho) experimentů je možno zpětně extrapolovat rychlost volného povrchu do nulové tloušťky materiálu a získat tím rychlost částic v CJ bodě. Pro extrapolaci se používá první část záznamu, před ustálením rychlosti v prvním skoku. Pro ukázkou je záznam na obrázku 2.16.

Při zpětné extrapolaci dat je potřeba znát v jakém čase má skončit. Ten je určený podle rovnice (2.21), kde  $t_e$  je čas do kterého extrapolace probíhá,  $b$  je tloušťka disku,  $U$  je rychlost rázové vlny v disku (předpokládaná konstantní),  $C_0$  a  $s$  jsou konstanty pro daný materiál disku z rovnice hugonioty (2.20),  $u$  je rychlost částic disku a  $u_{vp}$  je rychlost volného povrchu disku v prvním skoku, změřená pomocí PDV.

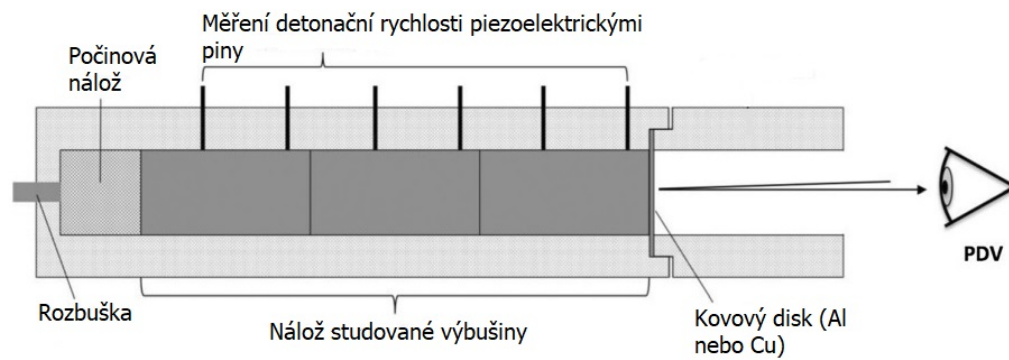
$$U = C_0 + su \quad (2.20)$$

$$t_e = \frac{b}{U} = \frac{b}{C_0 + su} = \frac{b}{C_0 + \frac{su_{vp}}{2}} \quad (2.21)$$

Po získání extrapolované rychlosti volného povrchu se rovnou dá spočítat tlak. Pro výpočet je potřeba znát detonační rychlost, jejíž měření lze spojit s měřením urychlení disku. Na obrázku 2.17 je schéma experimentu. Záznamy rychlosti volného povrchu v čase a jejich extrapolace jsou na obrázku 2.18[52][54].



Obrázek 2.16: Záznamu z urychlení disku a místo používané k extrapolaci [53].



Obrázek 2.17: Schéma experimentu měření rychlosti částic pomocí DAX testu (společně s měřením detonační rychlosti) [52].

Detonační tlak lze získat z extrapolované hodnoty rychlosti částic pomocí metody redukované rychlosti částic, kterou popsal P.W. Cooper [55] popsanou níže. Potřebnými veličinami jsou extrapolovaná rychlost částic volného povrchu  $u_{ex}$ , detonační rychlost  $D$ , hustota materiálu disku  $\rho_d$ , hustota trhaviny  $\rho_v$  a materiálové konstanty  $C_0$  a  $s$ . Po získání těchto parametrů je nejdříve určen tlak v kovovém disku pomocí rovnic (2.17)-(2.20), které po sloučení dají rovnici (2.23).

$$u = \frac{1}{2}u_{ex} \quad (2.22)$$

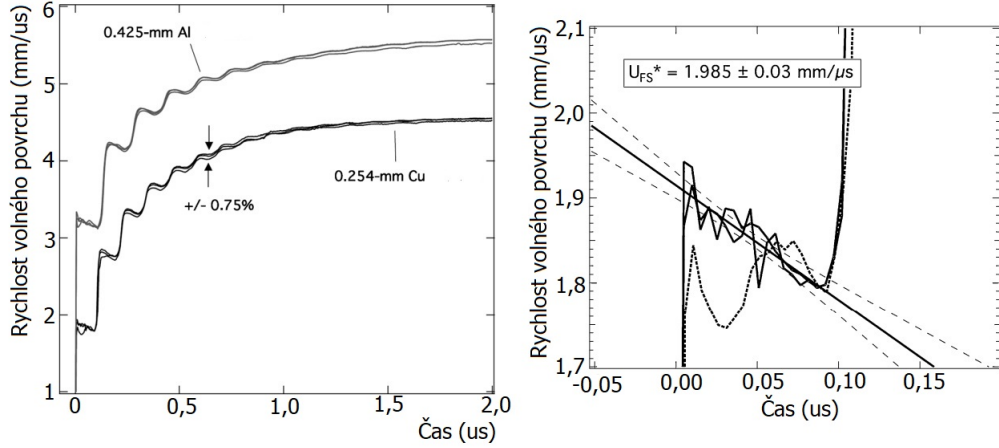
$$P_d = \rho_d \frac{u_{ex}}{2} (c_0 + s \frac{u_{ex}}{2}) \quad (2.23)$$

Po získání tlaku v disku je potřeba odhadnout detonační tlak pomocí vztahu (2.24), a následně spočítat hodnotu redukovaného tlaku  $P_r$  podle rovnice (2.25). Podle toho jestli bude hodnota redukovaného tlaku větší, nebo menší než 0,08 se zvolí následující výpočet.

$$P_{CJ*} = \frac{\rho_v D^2}{4} \quad (2.24)$$

$$P_r = \frac{P_d}{P_{CJ*}} \quad (2.25)$$

Jestli je hodnota redukovaného tlaku větší, dále se postupuje podle rovnice (2.26), v té jsou dvě neznámé  $P_{CJ}$  a  $u_{CJ}$ , je proto potřeba přidat k výpočtu další nezávislou rovnici obsahující tyto dvě neznámé aby mohla být vytvořena soustava rovnic. Touto přidanou rovnicí je rovnice Rayleigha přímky (2.27). Kombinací těchto dvou rovnic je získaná kvadratická rovnice (2.28). Jejíž kořeny lze vyjádřit vztahem (2.29). Po získání kořenů a jejich dosazení do rovnice (2.27) se zjišťí který z nich je reálný.



Obrázek 2.18: Záznamy rychlostí volného povrchu v čase a jejich extrapolace [52].

$$P_d = 2,412P_{CJ} - \left(\frac{1,7315P_{CJ}}{u_{CJ}}\right)\frac{u_{ex}}{2} + \left(\frac{0,3195P_{CJ}}{u_{CJ}^2}\right)\left(\frac{u_{ex}}{2}\right)^2 \quad (2.26)$$

$$P_{CJ} = \rho_v u_{CJ} D \quad (2.27)$$

$$2,412u_{CJ}^2 - 1,7315u_{CJ}\frac{u_{ex}}{2} - \frac{P_d}{\rho_v D}u_{CJ} + 0,3195\left(\frac{u_{ex}}{2}\right)^2 \quad (2.28)$$

$$u_{CJ1,2} = \frac{-(-1,7315\frac{u_{ex}}{2} - \frac{P_d}{\rho_v D}) \pm \sqrt{(-1,7315\frac{u_{ex}}{2} - \frac{P_d}{\rho_v D})^2 - 4 \cdot 2,412 \cdot 0,3195\left(\frac{u_{ex}}{2}\right)^2}}{2 \cdot 2,412} \quad (2.29)$$

Pokud je hodnota redukovaného tlaku menší než 0,08 měla by pro výpočet být použita rovnice (2.30). Opět kombinací s rovnicí Rayleigho přímky (2.27) je získán vztah (2.31) pro výpočet kořenů  $u_{CJ}$ . Po jejich získání lze zjistit reálný kořen dosazením do rovnice (2.27).

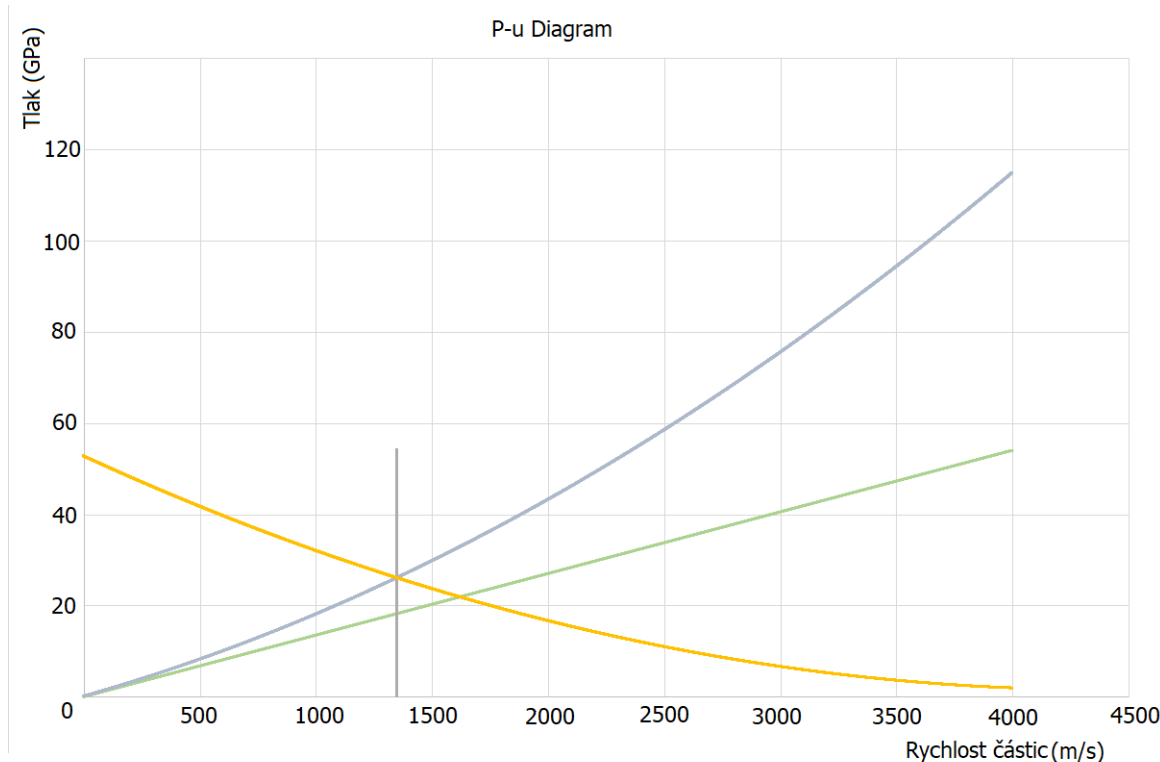
$$P_d = (235P_{CJ}u_{CJ}^{8,71})\left(\frac{u_{ex}}{2}\right)^{-8,71} \quad (2.30)$$

$$u_{CJ} = \sqrt[9,71]{\frac{P_d}{235D\rho_v\left(\frac{u_{ex}}{2}\right)^{-8,71}}} \quad (2.31)$$

Pro lepší představu průběhu Cooperovy metody je na obrázku 2.19 ukázána závislost tlaku na rychlosti částic. Šedá křivka je hugoniota hliníku, popsaná rovnicí (2.23), kolmá čára znázorňuje rychlost částic změřenou experimentem, zelená přímka je Rayleigho přímka popsaná obecnou verzí rovnice (2.27) a žlutá křivka je hugoniota produktů výbušiny. Průsečík kolmé čáry a šedé křivky určuje tlak v kovovém disku, popsany rovnicí (2.20). Tímto průsečíkem se pak proloží žlutá křivka popsaná buď rovnicí (2.26) nebo (2.30). Průsečík žluté křivky a zelené přímky určuje hodnoty  $P_{CJ}$  a  $u_{CJ}$ .

### 2.3.3 Rentgenová fotografie

Stanovení rychlosti částic detonačních produktů pomocí rentgenové fotografie je založeno na časově závislém určování polohy tenkých kovových plíšek, které se pohybují společně s detonačními produkty za čelem detonační vlny. Kovové plíšky by měly být z materiálu, který dobře absorbuje rentgenové záření, ideálně z olova. Plíšky jsou v náloži umístěny tak, aby na jejich plochu dopadla kolmo detonační vlna. Na nálož míří pulzní rentgen, který v pravidelných intervalech osvětluje nálož. Pulzy jsou dlouhé asi 0,1  $\mu$ s rentgenové pulzy jsou zaznamenávány na osciloskop a na fotografický film. V průběhu detonace je poloha kovových plíšek zaznamenána na filmu tmavými místy. Ze vzdálenosti o kterou se plíšky pohly za určitý čas (čas mezi jednotlivými rentgenovými pulzy) lze vypočítat rychlost částic [35][56].



Obrázek 2.19:  $P$ - $u$  diagram pro přiblížení Cooperova výpočtu.

### 2.3.4 Měření rychlosti částic pomocí senzoru v elektromagnetickém poli

Metoda měření rychlosti částic pomocí senzoru v elektromagnetickém poli je založená na tom, že když se elektrický vodič pohybuje v homogenním magnetickém poli, vytváří se elektrická síla. Velikost síly bude úměrná rychlosti pohybu, velikosti vodiče a intenzitě magnetického pole. Rychlost částic, je měřena senzorem z tenké vodivé fólie umístěné v trhavině, která se po přechodu detonační vlny bude pohybovat společně s detonačními produkty v homogenním magnetickém poli. Pro zaznamenání intenzity elektrické síly je použit osciloskop, zaznamenává ji jako funkci času za detonační vlnou. Ze získaného oscilogramu je možno spočítat rychlost částic jako funkci času [57] [35].

Měřicí zařízení se může lišit vzhledem k možnosti použití různých zdrojů magnetických polí, velikosti a tvaru vodivé fólie a způsobu nahrávání dat. Popsána je metoda uvedená v [35].

Sonda je vytvořena z měděné, nebo hliníkové fólie tlusté 50-150  $\mu\text{m}$ . Pokud je použita hliníková fólie, je třeba aby byla pokrytá vrstvou oxidu hlinitého aby nereagovala s výbušninou. Tloušťka a šířka sondy nemá vliv na vzniklou elektrickou sílu, ta geometricky závisí jen na její šířce. Elektromagnetická síla, vzniklá pohybem sondy v elektromagnetickém poli se dá spočítat, podle rovnice (2.32)

$$E_s = BWl \quad (2.32)$$

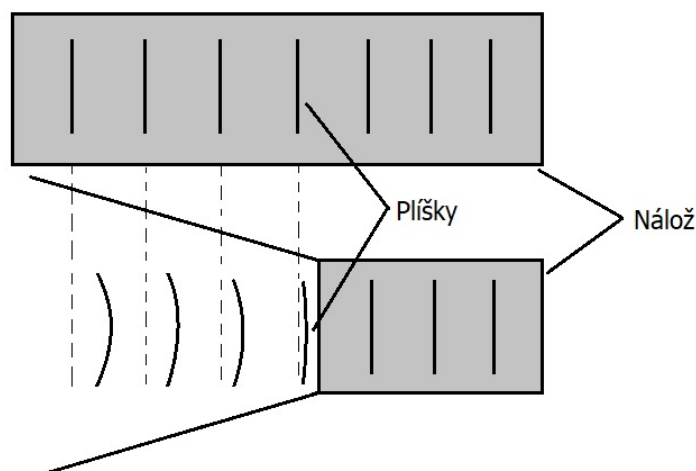
Kde  $E_s$  je elektromagnetická síla,  $B$  je intenzita magnetického pole,  $W$  je rychlost pohybu sondy a  $l$  je šířka sondy. Protože homogenní magnetické pole je konstantní, je elektrická síla přímo úměrná rychlosti sondy. Nákres experimentu je na obrázku 2.21.

Homogenní magnetické pole je vytvářeno pomocí Helmholtzových cívek, jejich velikost a vzdálenost mezi sebou ovlivňuje to, jak velké nálože je možno tímto způsobem testovat.

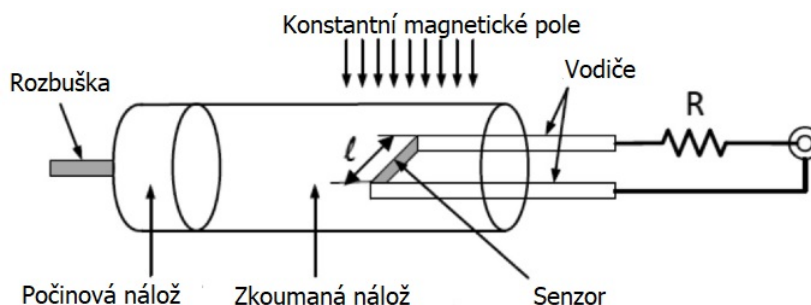
Po získání oscilogramu, je možno podle rovnice (2.32) převést záznam změny napětí v čase na záznam rychlosti částic na čase. Výsledný graf je na obrázku 2.22

## 2.4 Měření detonační teploty

Detonační teplota je jednou z nejdůležitějších hodnot při zkoumání trhavin. Na teplotě jsou závislé chemické rovnováhy a fyzikální přeměny [59]. Se znalostí přesného průběhu teploty při detonaci je možno



Obrázek 2.20: Náskres experimentu měření rychlosti částic pomocí rentgenové fotografie [56].



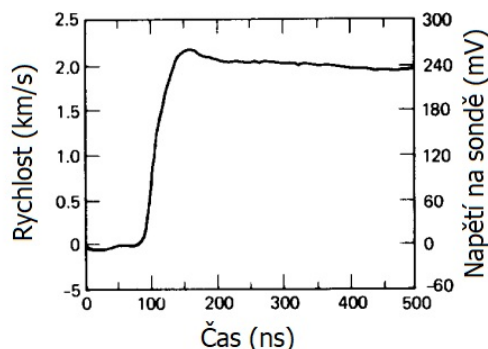
Obrázek 2.21: Náskres umístění elektromagnetické sondy v náloží [58].

ověřit přesnost stavových rovnic, používaných pro výpočty. Fotoelektrické metody (Pyrometry) jsou zatím stále jediné, se kterými je možno měřit teplotu v detonačních vlnách s dostatečným rozlišením [59][60]. Princip měření pomocí pyrometrů je měření intenzity světla detonační vlny, která se přes kalibraci přepočítává na teplotu. Výbušina se považuje za šedé těleso s vyzařováním odpovídajícím Stefan-Bolzmannovu zákonu [61] [60].

Pro průhledné homogenní kapalně trhaviny byl problém měření detonační teploty vyřešen a výsledky různých výzkumníků jsou v dobré shodě. Ukázalo se, že pro monomolekulární kapalně výbušiny záření detonační vlny odpovídá modelu černého tělesa se světelnou intenzitou 3500-4050 K [59].

Dvě hlavní metody jsou sledování intenzity záření přímo v trhavině a takzvaná metoda okna. První z nich spočívá ve vložení optických vláken, nebo jiných prostředků pro zaznamenání intenzity světla přímo do kapalně trhaviny. U druhé metody je trhavina v kontaktu s deskou materiálu (oknem), který si ponechává průhlednost v žádaném rozmezí tlaků a má malou hodnotu zahřátí při stlačení rázovou vlnou v porovnání s teplotou detonační vlny. Rozdíl v impedanci detonačních produktů a materiálem okna způsobí odraženou expanzní, nebo rázovou vlnu, která bude postupovat do oblasti produktů detonace. To je potřeba mít na paměti při vyhodnocování výsledků [59][62].

Záznam světelného spektra a intenzity vyzařované detonační zónou je následně veden do pyrometru. Ty můžou být v různých uspořádáních, například WBP (wide band pyrometer), SBP (single band pyrometer), MBP (multi band pyrometer). Před samotným měřením by měla být provedena kalibrace na záření, které vychází z tělesa o známé teplotě, ta se dělá pomocí wolfram halogenových zářivek, ovšem jen do určité teploty [63][64][60]. Z intenzity světla různých frekvencí zaznamenané pyrometrem je možno podle záření černého tělesa odhadnout detonační teplotu.



Obrázek 2.22: Výsledný záznam měření rychlosti částic elektromagnetickou sondou [57].

## 2.5 Měření objemu produktů při STP

Objem detonačních splodin za standardních podmínek (Standard Temperature and Pressure - STP) je důležitý parametr, který určuje poslední bod expanzní izentropy detonačních produktů (pro zjednodušení zaměňované s hugoniotou). Je to stav kdy se tlak a teplota po detonaci vyrovnají s okolím. Tento objem je teoreticky možné určit z provedení detonace v uzavřeném objemu, který je konstantně temperován na standardní teplotu (298, 15 K), například v detonačním kalorimetru (popsaném v části 2.10.2). Po detonaci a vyrovnání teplot se změní rozdíl tlaků před a po detonaci. Za předpokladu ideálního chování detonačních splodin lze spočítat molární množství plynu v uzavřeném objemu před a po detonaci (šlo by použít i jiné stavové rovnice, ale pro účel této práce, což je zjištění jestli měření tímto způsobem je možné, bude použita rovnice ideálního plynu). Protože objem je neměnný, teplota na počátku a na konci experimentu je stejná a univerzální plynová konstanta je konstantní, lze tlaky na počátku a na konci experimentu dosadit do soustavy rovnic (2.33) a (2.34). Zmíněný postup je navržený pro tuto práci, protože nebyla v literatuře nalezena experimentální technika získání tohoto parametru, pouze jeho výpočty.

$$P_1V = n_1RT \quad (2.33)$$

$$P_2V = n_2RT \quad (2.34)$$

Kde  $P_1$  je tlak v uzavřené nádobě před iniciací detonace,  $P_2$  je tlak po detonaci,  $n_1$  je molární množství plynů v uzavřené nádobě před detonací,  $n_2$  je molární množství plynů po detonaci,  $R$  je univerzální plynová konstanta a  $T$  je teplota. Úpravou této soustavy jsou získány vztahy pro výpočet molárních množství (2.35) a (2.36).

$$n_1 = \frac{P_1V}{RT} \quad (2.35)$$

$$n_2 = \frac{P_2V}{RT} \quad (2.36)$$

Rozdíl těchto molárních množství je molární množství plynných produktů detonace  $\Delta n$ . Ten se pak dosadí do rovnice pro výpočet objemu ideálního plynu (2.37). Kde  $V_{sp}$  je objem splodin za standardních podmínek a  $V_m$  je molární objem ideálního plynu (22, 41 dm<sup>3</sup>).

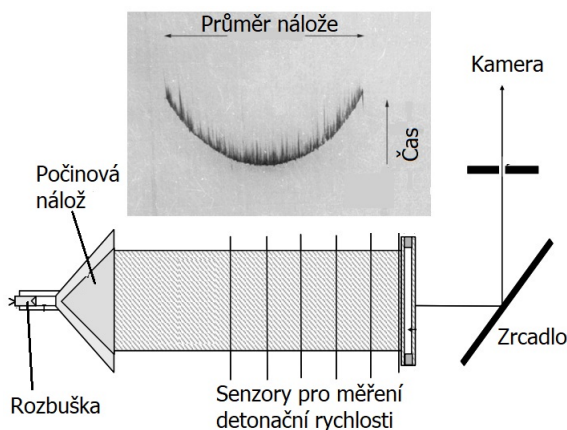
$$V_{sp} = \Delta nV_m \quad (2.37)$$

## 2.6 Měření zakřivení čela detonační vlny

Detonační vlna procházející reálnou náloží (s konečným průměrem), je odlehčována do stran, a proto dochází k jejímu zakřivení. Tento efekt je tím patrnější, čím menší průměr je průměr náložce.

## 2.6.1 Měření pomocí streak kamery

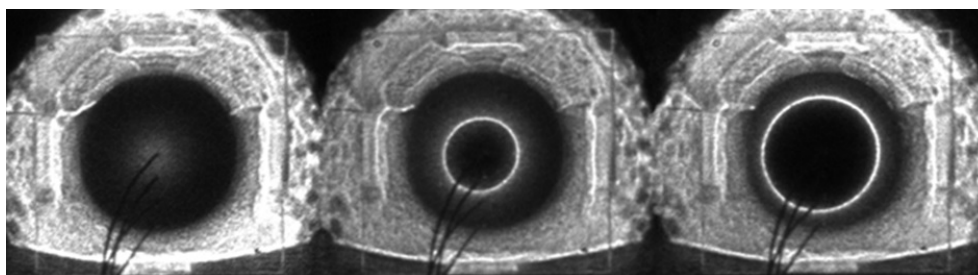
Zakřivení detonační vlny je možno pozorovat technikou streak kamery, která byla popsána v sekci 2.1.5. K zaznamenání detonační vlny je kamera namířena skrze štěrbinu na zrcadlo, které je za koncem nálože v ose detonace. Pro získání zakřivení detonační vlny je záznam ze streak kamery považován za součást kružnice (nebo elipsy) a je co nejlépe proložen tak aby střed prokládané kružnice byl na ose detonující nálože [65][66][67]. Nákres experimentu a záznam detonační vlny jsou na obrázku 2.23.



Obrázek 2.23: Experimentální uspořádání měření zakřivení detonační vlny pomocí streak kamery (dole)[65] a záznam z měření (nahore)[23].

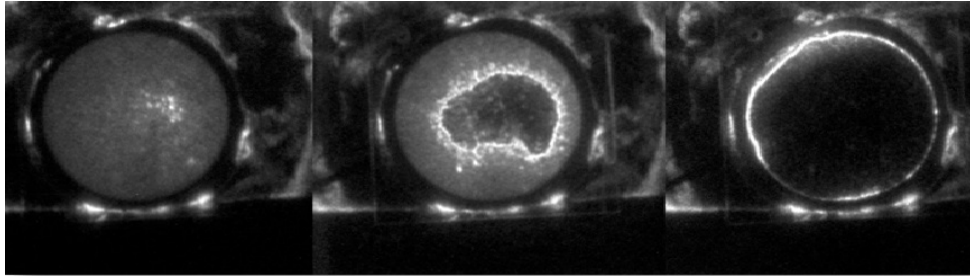
## 2.6.2 Měření pomocí vysokorychlostního snímkování

Při měření pomocí vysokorychlostního snímkování je v ose na konec nálože namířena kamera, nebo fotoaparát se schopností zaznamenat tak rychlé děje jako je detonace. Na konec nálože je připevněno plexisklo, které zlepšuje viditelnost detonační vlny, která po výstupu z nálože stlačí vzduch mezi koncem nálože a plexisklem tak, že začne emitovat světlo. Pokud je nálož skutečně homogenní, výsledkem měření jsou snímky, na kterých je vidět detonační vlna nejprve uprostřed nálože a potom jako kruh, který se zvětšuje až do průměru nálože samotné. Ukázka takového měření je na obrázku 2.24. Pokud je trhavina nehomogenní jako bývají plastické trhaviny, je detonační vlna nepravidelná a má úplně jiný tvar než kruhu. U takových nelze určovat zakřivení detonační vlny, protože bude pokaždé jiné kvůli nehomogenitám. Příklad záznamu z nehomogenní plastické trhaviny je na obrázku 2.25[68][69].



Obrázek 2.24: Snímky z vysokorychlostního záznamu výstupu detonační vlny ze dna homogenní nálože A-IX 1 [68].

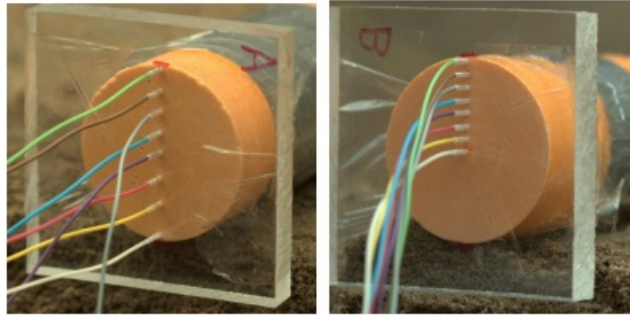
Pokud je známa detonační rychlost je možno ze záznamů homogenních trhavin vytvořit graf znázorňující zakřivení detonační vlny na základě průměru kruhu na snímku a čase, ve kterém byl pořízen. Příklad takového grafu společně s výsledky z metody měření pomocí optických vláken je na obrázku 2.27.



Obrázek 2.25: Snímky z vysokorychlostního záznamu výstupu detonační vlny ze dna nehomogenní nálože Semtexu 1A [69].

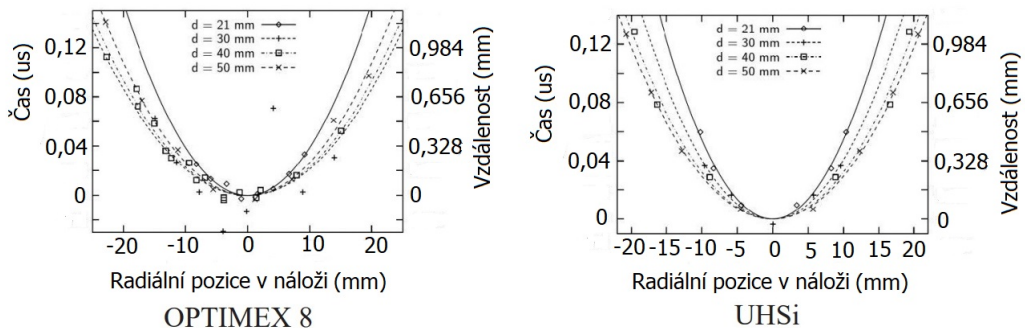
### 2.6.3 Měření pomocí optických vláken

Měření zakřivení detonační vlny pomocí optických vláken představuje alternativní variantu pro zjištění zakřivení detonační vlny. Při přípravě experimentu jsou do plexiskla připevněného na dno nálože navrtány díry. Do nich jsou umístěna optická vlákna. Pozice optických vláken jsou žádoucí udělat od přesného středu po okraj nálože v pravidelných intervalech. Foto experimentu s optickými vlákny je na obrázku 2.26.



Obrázek 2.26: Foto umístění optických vláken při měření zakřivení detonační vlny [68].

Světlo z těchto vláken je zaznamenáváno přes fotodiody osciloskopem, nebo jiným záznamovým zařízením (například OPTIMEX)[68]. Z takto připraveného experimentu je získán záznam časů příchodu světelné intenzity na jednotlivá vlákna, ze kterého podobně jako v předchozí metodě je možno vytvořit graf zakřivení detonační vlny, který je na obrázku 2.27.



Obrázek 2.27: Graf zakřivení detonační vlny získaný z dat naměřených snímkovací metodou a metodou s optickými vlákny [68].

Pokud bude pomocí této metody měřena nehomogenní trhavina bude to odhaleno tím, že opakovatelnost výsledků nebude možná, nebo tím, že třeba vlákno, které mělo zaznamenat světlo až jako

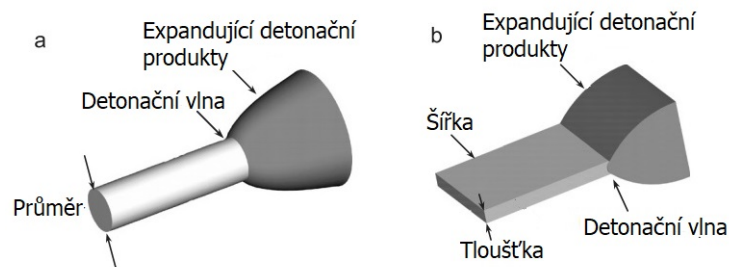


třetí ho zaznamená dříve, než druhé a první. To poukazuje na to, že detonační vlna z nálože nevyšla uprostřed.

Zakřivení detonační vlny se dá také změřit pomocí elektrických metod, experimentální uspořádání je stejné jako technika pro měření optickými vlákny, jen místo optických vláken jsou použity piezoelektrické piny, nebo zkratovací čidla a signály z nich [67].

## 2.7 Stanovení dolních mezných průměrů

Dolní mezný průměr je takový průměr válcové nálože, při kterém detonace není schopná stabilně probíhat a uhasne. Kritická tloušťka je tloušťka nálože o půdorysu kvádru, při které detonace uhasne. Tyto dva parametry se liší tím, že u válcové nálože je detonace odlehčována ze všech směrů v rovině detonace, naproti tomu detonační vlna v náloži o půdorysu kvádru je odlehčována pouze do dvou hlavních směrů v rovině detonace (pokud je tak široká, že odlehčení do stran lze zanedbat). Termodynamické výpočty neberou existenci dolního mezného průměru v potaz. Znázornění je na obrázku 2.28 [70].



Obrázek 2.28: Znázornění průběhu detonací ve válcové náloži a v náloži o půdorysu kvádru [70].

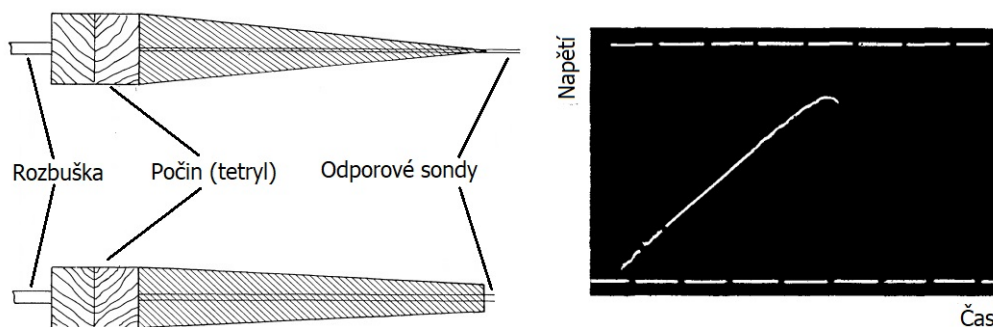
Stanovení těchto parametrů je důležité z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti. Například pokud by nálož trhavin v vrtu byla pod kritickým průměrem pak by detonace uhasla, nebylo by dosaženo požadovaného účinku a ve vrtu by zůstala nevybuchnutá trhavina. Na druhou stranu při manipulaci v laboratoři či při výrobě je spíše žádoucí pracovat s trhavinou pod kritickým průměrem, aby se omezilo riziko detonace celé výrobní linky [70].

### 2.7.1 Stanovení dolního mezného průměru v kónické geometrii

Podle této metody lze kritický průměr trhaviny změřit v kónické geometrii. Experimentální uspořádání se skládá z kužele naplněného trhavinou, počínové náložky, rozbušky a odporové sondy (byly popsány v 2.1.4). Po iniciaci počínu a ustálení detonace na začátku kuželu se postupně detonační vlna dostává do užšího a užšího průměru, až přestane být schopná postupovat a detonace uhasne. Vzdálenost po jaké detonace uhasla a tedy průměr v jakém už nemohla dál pokračovat je určena pomocí časového záznamu z FOP, nebo odporové sondy. Niklchromové odporové sondy mají přesně definovaný odpor na jednotku délky a z toho je možno dopočítat, jaká délka odporové sondy zůstala v náloži [71]. Pro další způsob určení vzdálenosti, ve které uhasla detonace je možno přiložit kužel s trhavinou ke svědečné desce [72]. Na obrázku 2.29 je znázorněn experiment a záznam z odporové sondy.

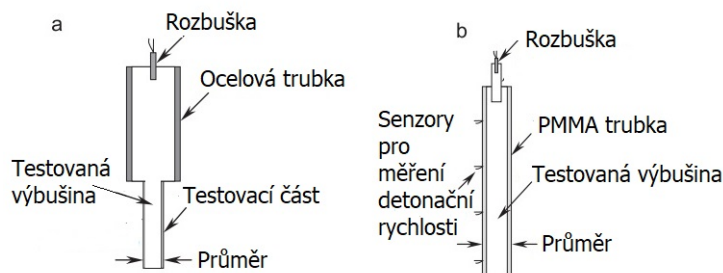
### 2.7.2 Stanovení dolního mezného průměru v jednotlivých průměrech a tloušťkách

Předchozí metoda má jeden problém, tím je „přestřelená“ nebo „setrvačná“ detonace. To znamená, že tím jak detonace prochází nejprve průměrem, který je pro ni dostatečný tak se „rozjede“ a díky této energii setrvačností pokračuje i kus za průměr, ve kterém by se už měla zastavit. Vyřešením tohoto problému je testování skutečně několika různých průměrů, které jsou po sledované délce nálože neměnné. Tímto měřením je sice potřeba udělat více experimentů a tím spotřebovat větší množství trhaviny, ale výsledky jsou přesnější [70][74].

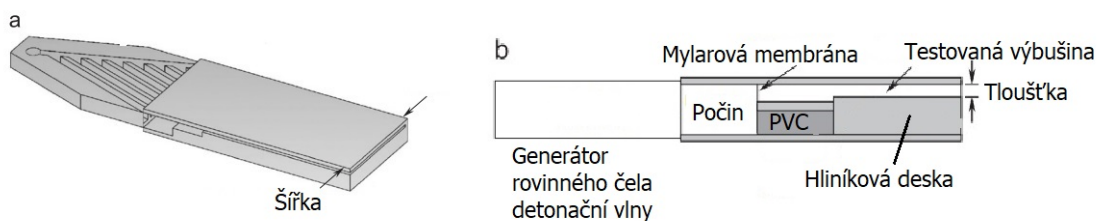


Obrázek 2.29: Experimentální uspořádání pro měření kritického průměru v kónické geometrii (vlevo)[71]. Záznam z osciloskopu (Vpravo) [73].

Experimentální uspořádání pro měření kritického průměru se skládá z tenké hliníkové, nebo ple-xisklové trubky o zkoušeném průměru, počínové nálože a svědečné desky. Při zkoumání heterogenních trhavin je doporučeno použít před sledovanou sekci ještě rozšířený průměr pro dostatečný rozběh stabilní detonace. Nákres je na obrázku 2.30. Pro měření kritické tloušťky je použita sestava, která je zobrazena na obrázku 2.31. Kromě vlastní zkoumané části a části se širší tloušťkou pro ustálení detonace je v ní ještě zabudován generátor rovinné vlny a počín [70][75].



Obrázek 2.30: Experimenty pro určení kritického průměru pro heterogenní a homogenní trhavinu [70].



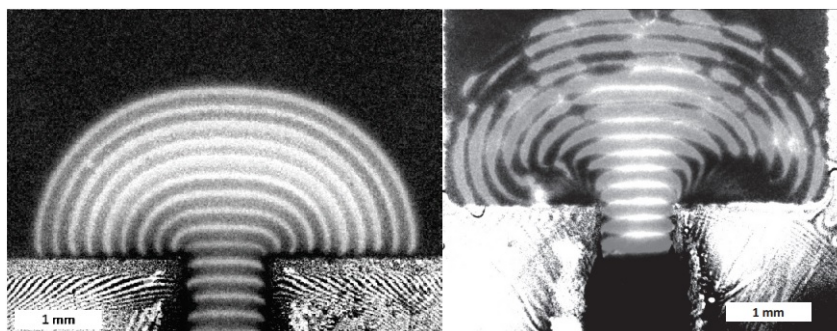
Obrázek 2.31: Sestava pro měření kritické tloušťky trhavin [70].

Při vyhodnocování výsledků jsou pouze dva závěry a to, že v daném průměru daná trhavina je, nebo není schopná stabilně detonovat. Vzhledem k charakteru testu není důležité v jaké vzdálenosti došlo ke skončení detonace, ale pouze to, že k němu došlo [70].

### 2.7.3 Micromushroom test

Při zkoumání přechodů detonace z širšího průměru do menšího může dojít k jejímu uhašení. Naopak se ale dá i studovat přechod detonace z malého průměru do velkého a sledovat jak detonace „zatáčí za roh“. Při takovémto přechodu mohou u více neideálních trhavin vznikat mrtvé zóny, které detonační

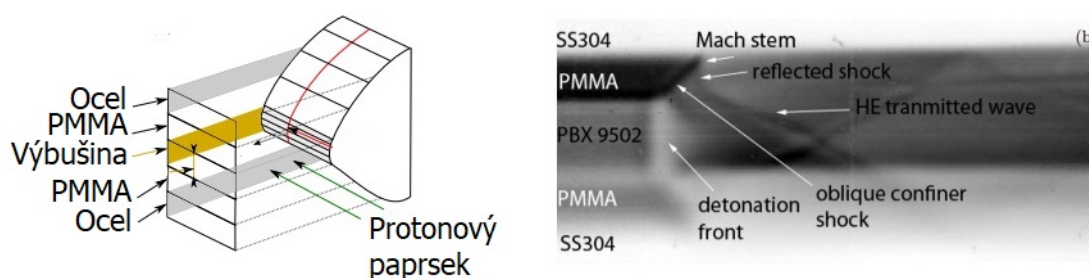
vlna „obejde“ a zůstane v nich nezreagovaná trhavina. Příklad záznamů z rychloběžné snímkové kamery zkoumající tento přechod v trhavinách PETN (pentaerytritoltetranitát) a HNAB (hexanitrozobenzén) jsou na obrázku 2.32 kde lze vidět, že HNAB zanechává při přechodu mrtvou zónu, ale PETN nikoliv [76].



Obrázek 2.32: Záznamy micromushroom testu pro trhaviny PETN (nalevo) a HNAB (napravo) [76].

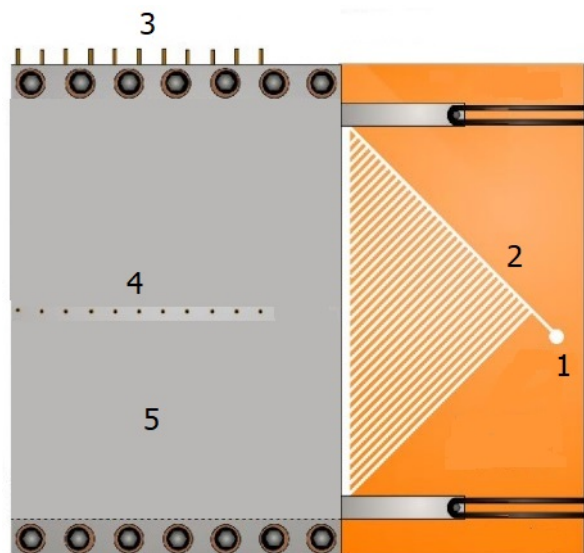
## 2.8 Určení vlivu obalu

Vysoké tlaky vytvořené detonací kondenzovaných trhavin mají za důsledek ničení jakéhokoliv obalového materiálu, a proto hlavní způsob použití trhavin spočívá v urychlení materiálu, ve kterém jsou uzavřeny. Například v civilním použití jde o rozrušení horniny v lomech, a ve vojenském urychlování fragmentů těla střely. Dynamika systému trhavina-obal závisí na tlakových parametrech trhaviny, zatímco struktura reakční zóny, její rychlost a boční upnutí detonačních produktů závisí na materiálových vlastnostech obalu, jako jsou hustota nebo rychlost zvuku. Schopnost predikovat průběh detonace a reakci obalového materiálu na tlak vyvolaný detonací závisí na schopnosti modelovat a rozumět interakcím na rozhraní obalu s trhavinou. Na obrázku 2.33 je zobrazeno odrážení a procházení rázových vln z trhaviny do obalu a detonačních zplodin [77][78].



Obrázek 2.33: Nákres a rentgenové foto odrážení a skládání rázových vln na rozhraní výbušiny a materiálu obalu [77].

Efekt jaký má daný obal na trhavinu lze charakterizovat tím, že pro různé tloušťky stejného materiálu budou opakovány experimenty s měřením zakřivení detonační vlny, detonačního tlaku a detonační rychlosti. Tím lze stanovit minimální tloušťku konkrétního materiálu, po kterém se již chová jako nekonečně tlustý (další zvyšování tloušťky obalu nepovede ke změně detonačních parametrů) a také maximální hodnoty detonačních parametrů, kterých může daná výbušina dosáhnout při uzavření v daném materiálu. Protože detonační vlna má jiný průběh ve válcové a planární (deskové) geometrii (popsáno v části 2.7) je žádoucí tyto experimenty provádět zvlášť [77][79]. Experiment pro charakterizaci efektu obalu v planární geometrii je na obrázku 2.34.



Obrázek 2.34: Obrázek experimentálního uspořádání studia vlivu obalu v ploché (deskové) geometrii [79]. Označené jsou následující části místo iniciace (1), generátor rovinného čela detonační vlny (2), měření detonační rychlosti pomocí piezoelektrických pinů na kraji nálož (3), měření detonační rychlosti pomocí piezoelektrických pinů uprostřed nálož (4), Nálož uzavřená mezi kovovými deskami (5).

## 2.9 Testy pracovní schopnosti

Schopnost výbušin konat práci je možno mimo jiné popsat stavovou rovnicí isentropické expanze detonačních produktů zmíněnou jako JWL rovnice (1.5) v kapitole 1. Je tu uvedena znovu v trochu jiném zápisu jako rovnice (2.38).

$$P = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2B} + CV^{-(1+\omega)} \quad (2.38)$$

Kde  $p$  je tlak detonačních produktů,  $V = \frac{p_0}{p}$  je relativní objem detonačních produktů a parametry  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  a  $\omega$  jsou specifické pro danou výbušinu [80]. Parametry této rovnice se dají získat dvěma způsoby, výpočtem z hydrodynamických kódů (zmíněno v kapitole 1), nebo z výsledků experimentů.

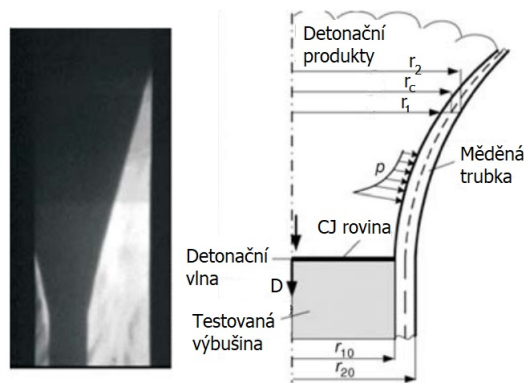
### 2.9.1 Cylinder test

Experimentem pro získání těchto parametrů je tzv. „Cylinder test“. Tento experiment, vyvinutý G. I. Taylorem v době druhé světové války spočívá v pozorování expanze stěn trubky vlivem detonace výbušiny umístěné v měděné trubce [81][82].

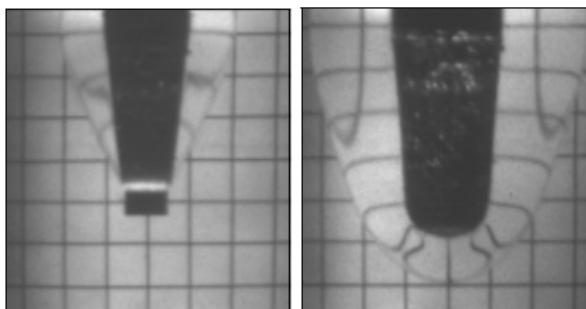
Na obrázku 2.35 detonační vlna po iniciaci postupuje měděnou trubkou a detonační produkty za ní rozpínají měděnou trubku. Sledovanými veličinami v experimentu jsou úhel otevření trubky a rychlost rozevíraných stěn. Tyto se dají získat různými způsoby měření, například streak kamerou, piezoelektrickými piny, rentgenovou fotografií, nebo laserovou interferometrií. Data z cylinder testů je také možno vyhodnotit pro získání konečné rychlosti obalu, takzvané Guernyho rychlosti [80][81].

### 2.9.2 Aquarium test

Aquarium test je experiment obdobný cylinder testu. Rozdíl je v tom, že výbušina není uzavřena v kovové trubce a není odpalovaná na vzduchu. Test spočívá v pořizování vysokorychlostních fotografií detonující výbušiny válcového tvaru, umístěné pod vodou. Podobně jako se u cylinder testu sleduje rychlost rozpínání obalu, sleduje se u aquarium testu rychlost rázové vlny vygenerované do okolní vody a rozhraní mezi vodou a detonačními zplodinami (bublinou vzniklou výbuchem). Výbušiny jsou uzavřeny do PMMA trubky, protože například DAPy (směsi dusičnanu amonného s palivem) jsou ve vodě rozpustné. Fotografie z aquarium testu je na obrázku 2.36 [67][83].



Obrázek 2.35: Obrázek cylinder testu.



Obrázek 2.36: Fotografie z aquarium testu.

### 2.9.3 Trauzlův blok

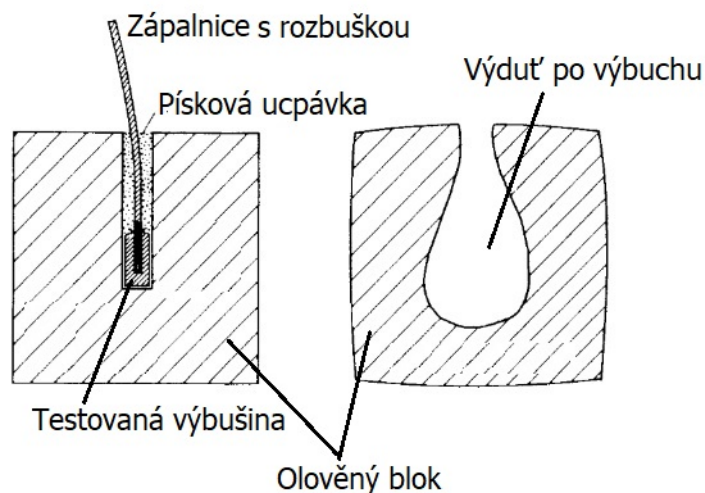
Jednou z prvních metod porovnávání „síly“ výbušin je testování pomocí Trauzlova bloku. Jedná se o olověný válcový blok o standardních rozměrech, s přesně vyvrtanou dírou uprostřed, do které je umístěn vzorek výbušiny. Standardní rozměry jsou 200 mm průměr bloku, 200 mm výška bloku, 25 mm průměr díry, 125 mm hloubka díry. Standardní množství zkoušené výbušiny je 10 g, slisováno na objem 10 ml, pokud jde o kapalnou výbušinu, je jí použito 10 ml [35] [84]. Schéma olověného bloku je na obrázku 2.37.

Postup přípravy experimentu je následující. Odvážené množství výbušiny je zabaleno do tenké hliníkové fólie podle postupu popsaného v [35], který je doporučen Evropskou Komisí pro Standardizaci Testování Výbušin [86]. Následně je připravená výbušina s rozbuškou vložena do díry v olověném bloku a zasypána pískem pro utěsnění [87].

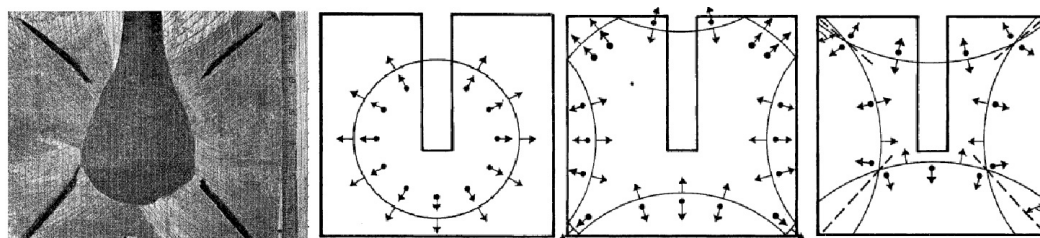
Vyhodnocení výsledků probíhá tak, že se změří objem dutiny vytvořené výbuchem. To je možno udělat měřením objemu vody, kterou je potřeba nalít do vytvořené dutiny, aby ji zcela zaplnila. Od tohoto množství je následně odečten objem díry, která byla původně v bloku vyvrtána a objem vytvořený samotnou rozbuškou. Bylo zkoumáno několik možných vlivů vnějšího prostředí, jako například, jemnost písku pro utěsnění, hustota výbušiny, teplota, při které byl blok olova odléván, nebo teplota bloku při testu samotném. Z těchto možných vlivů se jako jediný důležitý ukázala teplota bloku při testu [35][88].

Válcový Trauzlův blok není vhodný pro brizantní vojenské trhavy jako je RDX, protože se v něm mohou vytvořit výtrže, které zkreslí objem vytvořené dutiny. Protože tyto výtrže vznikají interakcí rázových vlny v průřezu válcového bloku, bylo navrženo pro tyto typy výbušin použít kulový olověný blok, ve kterém k tvorbě výtrží nedochází [88]. Na obrázku 2.38 jsou znázorněny tvorby výtrží.

Výsledky z měření Trauzlovým blokem nejsou absolutní. Hodí se na výrobní kontrolu kvality, kde je potřeba s danou výbušinou dosahovat stále stejných výsledků. Vzhledem k množství olova, potřebného na takové testování, jeho ceně a toxicitě se od těchto zkoušek upustilo.



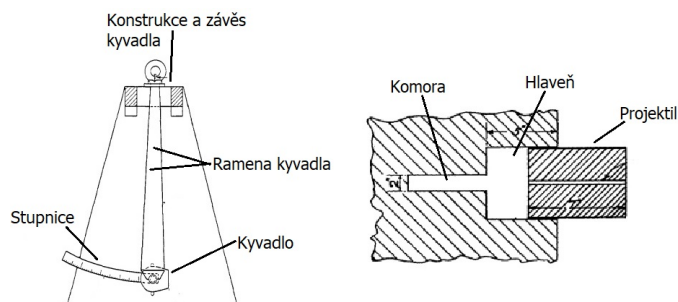
Obrázek 2.37: Schéma Trauzlova bloku před (nalevo) a po výbuchu (napravo) [85].



Obrázek 2.38: Obrázky výtrží v trauzlově bloku [88].

## 2.9.4 Balistický moždíř

Porovnávání pracovní schopnosti výbušin, na základě výsledků z balistického moždíře je rozšířená metoda testování výbušin. Balistický moždíř prošel historicky několika změnami v designu [89], tak jak je používán v současnosti je na obrázku 2.39. Balistický moždíř se skládá z několika základních částí, těmi jsou úchytná konstrukce, kyvadlo s otvorem (hlaveň), projektil s vyvrtnou dírou a měřicí stupnice[90]. Nákres kyvadla a projektilu je na obrázku 2.39 vpravo.



Obrázek 2.39: Obrázek balistického moždíře a detail kyvadla s projektilem [90].

Měření na balistickém moždíři probíhá tak, že přívodní vodiče rozbušky jsou protaženy skrze díru v projektilu (pokud je použit zápalnicový roznět, je protažena skrze díru zápalnice), vzorek výbušiny (10 g) se adjustuje na rozbušku (například DAP v igelitovém pytlíku, připevněný izolepou k rozbušce). Projektil, je potom vložen do „hlaveň“ tak, aby se nálož nedotýkala stěn „komory“. Po iniciaci je projektil vystřelen na jednu stranu a kyvadlo se pohne na druhou, tím jak se pohne posune jezdec na měřicí stupnici, ze kterého je následně odečtena hodnota vychýlení (v cm) [90][91].

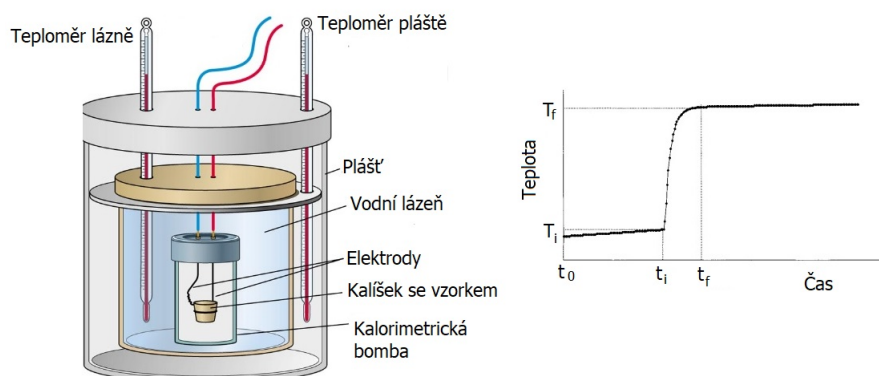
Výsledky z balistického moždíře je vždy nutno vztáhnout k nějakému standardnímu vzorku, běžně se jako standard používá trhací želatina. Výsledky měřených trhavin jsou pak vyjádřeny jako procentuální výkon standardu.

## 2.10 Kalorimetrie

Kalorimetrie je součástí termické analýzy materiálů, obsahuje několik různých technik pomocí kterých se dá měřit množství tepla uvolněného při reakcích, nebo rozkladech látek. Jejimi zástupci jsou například DSC (Differential Scanning Calorimetry), ARC (Accelerating Rate Calorimetry), spalná kalorimetrie a specifická pro výbušiny detonační kalorimetrie. Z pohledu výnušín mají smysl spalná a detonační kalorimetrie.

### 2.10.1 Měření spalného tepla

Spalný kalorimetr je přístroj, který měří změnu teploty vodní lázně po spálení vzorku v nádobě umístěné ve vodní lázni a z této změny je možno spočítat spalné teplo zkoumané látky. Postup provádění experimentu probíhá následovně. Vzorek zkoumané látky je umístěn do kovového, nebo skleněného kalíšku. Do vzorku je vložen odporový drátek připevněný na elektrody tak, aby při průchodu proudem se zahřál a tím zapálil vzorek. Toto je složeno do tlakové nádoby (bomby), která je několikrát „propláchnuta“ (naplněna a opět vypuštěna) kyslíkem, aby v ní byla potom při napuštění kyslíku skutečně co nejčistší atmosféra. Natlakovaná bomba je vložena do vodní lázně a ta je temperována tak, aby se vyrovnaly teploty bomby a vody. Potom je zapálen vzorek a je sledována změna teploty. Měření nekončí hned po shoření vzorku ale po delším časovém úseku kvůli ustálení teplotních gradientů [92]. Schéma spalného kalorimetru a příklad z měření jsou na obrázku 2.40.



Obrázek 2.40: Schéma spalného kalorimetru (vlevo) a záznam z měření (vpravo).

Spalné teplo látky  $Q_{sp}$  je množství tepla uvolněného při spálení látky v přebytku kyslíku (vztaheno na hmotnost, nebo molární množství). Může být použito ke stanovení slučovacího tepla, standardní slučovací entalpie či výhřevnosti dané látky. V kalorimetrickém experimentu je chemická reakce provedena za konstantního objemu, takže se uvolněné teplo rovná změně vnitřní energie. Kalorimetrické procesy jsou založeny na prvním termodynamickém zákoně, napsaném v rovnici (2.39)[93].

$$U_p - U_r = \Delta U = Q - W \quad (2.39)$$

$$Q_V = \Delta U \quad (2.40)$$

Kde  $U_p - U_r$  je rozdíl vnitřních energií produktů a reaktantů  $\Delta U$ , což se rovná vytvořenému teplu  $Q$  od kterého je odečtena vykonaná práce  $W$ . Experiment ve spalném kalorimetru probíhá za konstantního objemu, takže vykonaná práce  $W$  je nulová, proto se dá rovnice pro teplo vytvořené

reakcí při konstantním objemu  $Q_V$  zapsat podle vztahu (2.40). Pokud by bylo žádoucí získat hodnotu uvolněné energie při konstantním tlaku  $Q_P$  (neboli hodnotu změny enthalpie reakce  $\Delta H$ ), šla by spočítat podle rovnice (2.41) nebo její úpravou (2.42)[93].

$$Q_P = \Delta H = Q_V + P(V_p - V_r) = Q_V - \Delta nRT \quad (2.41)$$

$$\Delta H = \Delta U + \Delta nRT \quad (2.42)$$

Před stanovováním spalných tepel zkoumaných látek je potřeba provést kalibraci kalorimetru. Ta se provádí spálením tablet kyseliny benzoové, nebo jiných standardních látek se známou hodnotou spalného tepla v kyslíkové atmosféře [35] [94][95]. Teplo uvolněné spálením je určeno tabulkovými hodnotami, podle kterých se na základě změny teploty vodní lázně a hmotnosti spálené kyseliny benzoové vypočítá tepelná kapacita kalorimetru [95]. Toto se dá vypočítat úpravou rovnice (2.43) pro výpočet spalného tepla z [35] tak, aby neznámou byla tepelná kapacita kalorimetru. Upravená rovnice je (2.44)[93].

$$Q_s = \frac{C\Delta T - L_p Q_p}{m} \quad (2.43)$$

$$C = \frac{Q_s m + L_p Q_p}{\Delta T} \quad (2.44)$$

Kde  $Q_s$  je spalné teplo kalibračního vzorku,  $C$  je tepelná kapacita kalorimetru,  $\Delta T$  je změna teploty vodní lázně,  $L_p$  je délka zapalovacího drátku,  $Q_p$  je spalné teplo zapalovacího drátku (vztaženo na jednotku délky) a  $m$  je hmotnost vzorku. Při kalibraci je dobré volit takové množství standardní látky, které zhruba odpovídá očekávanému tepelnému skoku po spálení zkoumaného vzorku. Když bude při kalibraci tepelná změna vodní lázně v řádu stupňů a při vlastním měření v řádu desetin stupňů, nemusí naměřené hodnoty odpovídat realitě. Po získání tepelné kapacity kalorimetru z kalibrace je možné přejít k měření zkoumaných vzorků.

## 2.10.2 Měření detonačního tepla

Detonační teplo se měří pomocí detonačního kalorimetru. Detonační kalorimetrie je důležitou metodou ve výzkumu výbušnin. Měří celkové teplo uvolněné detonací výbušiny. Základní princip a konstrukce detonačního kalorimetru je podobná běžnému spalovacímu kalorimetru. Nálož výbušiny je odpálena uvnitř tlustostěnné nádoby, ponořené ve vodě. Uvolněné teplo se stanoví ze změny teploty vody po výbuchu testované výbušiny, stejně jako u spalné kalorimetrie [94] [95].

Detonace má oproti klasickému spalování v kalorimetru několik rozdílů. Například potřebuje určitý minimální průměr nálože, a určitý impulz od iniciátoru, aby proběhla stabilně. Kvůli tomu musí být tlaková nádoba dostatečně velká a tlustostěnná, aby vydržela detonaci výbušnin nad jejich kritickým průměrem, pro minimalizaci množství trhaviny nutné k provedení experimentu se používá utěsnění v podobě měděných, nebo zlatých trubek [94].

Stejně jako u spalného kalorimetru je potřeba i u detonačního kalorimetru provést kalibraci. Podle [96] se výpočet detonačního tepla provádí podle rovnice (2.45).

$$\Delta H_{det} = \frac{C\Delta T - Q_r}{m} - \frac{PV}{m} \quad (2.45)$$

Kde  $\Delta H_{det}$  je detonační enthalpie (kJ/g),  $Q_r$  je detonační teplo rozbušky (kJ),  $P$  je tlak v kalorimetrické bombě po detonaci (MPa) a  $V$  je objem kalorimetrické bomby (l).

Kalorimetrická měření mohou být spojená s analýzou produktů. To nabízí velmi přesnou metodu pro získávání důležitých informací o procesu detonace. Tyto informace mohou být použity pro normalizaci a stanovení hranic pro termodynamické-hydrodynamické výpočty, používané pro předpověď chování výbušnin [95].



**Část II**

**Experimentální část**

## Kapitola 3

# Měřicí technika

V této kapitole jsou popsány některé přístroje a sestavy použité pro měření v experimentální části. Použitými přístroji byly osciloskopy, PDV, Optimex a kalorimetr. Kromě těchto, zde popsaných, byly použity ještě uzavřená bomba pro studium hoření propelentů (CV - Closed Vessel) popsaná v části 4.4 a vysokorychlostní snímkovácí kamera, popsaná v části 4.5.

### 3.1 Osciloskopy

Osciloskop použitý pro měření detonační rychlosti a detonačního tlaku v experimentální části byl Tektronix DPO 3034, čtyřkanálový osciloskop s vzorkovací frekvencí 2,5 GSa/s, šířkou pásma 300 MHz a hloubkou paměti na kanál 5 Mpts. Osciloskop použitý pro záznam sečtené frekvence PDV měření expanze trubky při cylinder testu a urychlení kovového disku byl Tektronix DPO 70404C, což je čtyřkanálový osciloskop s vzorkovací frekvencí 25 GSa/s a šířkou pásma 4 GHz. Fotografie použitých osciloskopů jsou na obrázku 3.1



Obrázek 3.1: Fotografie použitých osciloskopů, DPO 3034 (vlevo) a DPO 70404C (vpravo).

### 3.2 Pin mixer a pulzní generátor

Pro napájení ionizačních čidel při měření detonační rychlosti a při spouštění měření osciloskopu při jiných experimentech byl použit přístroj pin mixer od firmy Dynasen Inc. model CS2-50-300. Ten do vodičů s nespojeným koncem pouští napětí a v okamžiku zkratu pošle signál do osciloskopu.

Pro měření detonačního tlaku pomocí manganinových senzorů byl použitý pulzní zdroj napětí piezoresistive pulse power supply od firmy Dynasen. Při přijetí signálu vytvoří na výstupu definovatelné napětí po nastavitelnou dobu. Fotografie obou přístrojů jsou na obrázku 3.2.

### 3.3 PDV

Pro měření rychlosti částic a cylinder test byla použita PDV sestava, kterou lze charakterizovat jako čtyřkanálovou první generaci s kontinuální vlnou o vlnové délce 1550 nm a s šířkou pásma 2 kHz. Použitým laserem je E 15 KOHERAS BOOSTIK HPA. PDV sestava je vyfocena na obrázku 3.3.



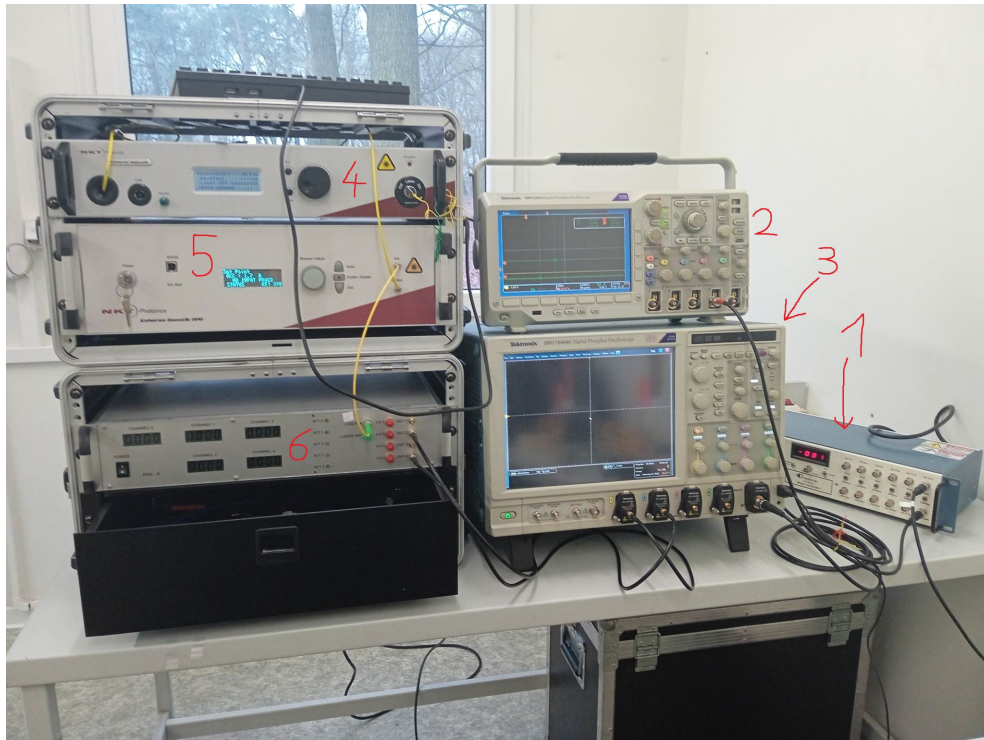
Obrázek 3.2: Fotografie použitých přístrojů pin mixer (vlevo) a pulzního zdroje napětí (vpravo).

### 3.4 Optimex

Měření detonační rychlosti a zakřivení detonační vlny bylo provedeno s pomocí přístroje „OPTIMEX light analyzer“ vyrobeného firmou OZM research s.r.o. [37][39][97]. Jedná se o pasivní optický systém s 8 až 64 kanály (počet závisí na počtu zaintegrovovaných záznamových karet, kterých může být 1 až 8 po osmi kanálech). Použitý přístroj měl 16 kanálů. Systém používá multi módová skleněná optická vlákna s možností připojení plastových optických vláken. Rychlost záznamu je až 250 MHz na všech kanálech. Přístroj má vestavěnou ovládací dotykovou obrazovku, ale je také možné ho ovládat připojením počítače. Software umožňuje vyhodnocení výsledků při měření detonační rychlosti pomocí více optických vláken i při měření pomocí navrtaného vlákna. Spuštění měření je na přístroji OPTIMEX nastavitelné od určité intenzity prvního signálu. Změřené signály mohou být staženy jako textové soubory. Foto přístroje OPTIMEX 16 se zapojenými osmi optickými vlákny v jedné záznamové kartě je na obrázku 3.4

### 3.5 Kalorimetr

Pro měření spalného tepla byl použit kalorimetr BCA 500 vyrobený firmou OZM Research s.r.o. Jedná se o Spalný kalorimetr, který lze použít pro spalování vzorků ve vzduchu, inertní atmosféře i kyslíku. Ovládání kalorimetru se dělá pomocí dotykové obrazovky, kam se nastaví vstupní hodnoty jako hmotnost vzorku a podobně. Měření jednoho vzorku trvá asi 20 minut. Po měření kalorimetr vypočítá ze změny teploty vodní lázně spalné teplo vzorku. Fotografie použitého kalorimetru je na obrázku 3.5.



Obrázek 3.3: Fotografie sestavy pro měření pomocí PDV používané na ÚEnM, pin mixer (1), „malý osciloskop“ Tektronix DPO 3034 (2), „velký osciloskop“ Tektronix DPO 70404C (3), LASER (4), zesilovač LASERU (5) a vlastní PDV (6).



Obrázek 3.4: Fotografie přístroje OPTIMEX 16 se zapojenými osmi optickými vlákny v jedné záznamové kartě.



Obrázek 3.5: Fotografie použitého kalorimetru BCA 500.

## Kapitola 4

# Experimentální uspořádání

V této části jsou popsány experimentální uspořádání a postupy provedené pro naměření vybraných detonačních parametrů. Také je popsán způsob vyhodnocení naměřených signálů a surových dat. Vybrané parametry pro měření jsou detonační rychlost, detonační tlak, rychlost částic, objem produktů při STP, zakřivení detonační vlny, pracovní schopnost a spalné teplo.

## 4.1 Detonační rychlost

Detonační rychlost byla měřena pomocí technik ionizačních čidel, pomocí více individuálních optických vláken a pomocí navrtaných optických vláken (FOP). Princip měření detonační rychlosti těmito technikami je blíže popsán v části 2.1. Měřenou trhavinou byl tetryl s různými průměry nálože a hustotami mezi 0,9 a 1,1 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.1.1 Měření ionizačními čidly

Pro měření detonační rychlosti pomocí ionizačních čidel byly připraveny nálože sypaného tetrylu v papírovém obalu o průměru 28 mm. Byla použita počínová nálož 15 g Semtexu 1A. Použitou rozbuškou byla mžiková elektrická hliníková rozbuška.

Použitým drátem pro vytvoření ionizačních čidel byl měděný smaltovaný zvonkový drát. Ten byl přes koaxiální kabel připojen na pin mixer a z něj do osciloskopu. Použitým osciloskopem byl Tektronix 3034. Nastavené rozhraní na osciloskopu bylo 10 μs na dílek, 1 V na dílek a 2,5 GS/s. Fotografie připraveného čidla v náloži je na obrázku 4.1. Zapojená byla dvě čidla, ve vzdálenosti 10 cm od sebe.

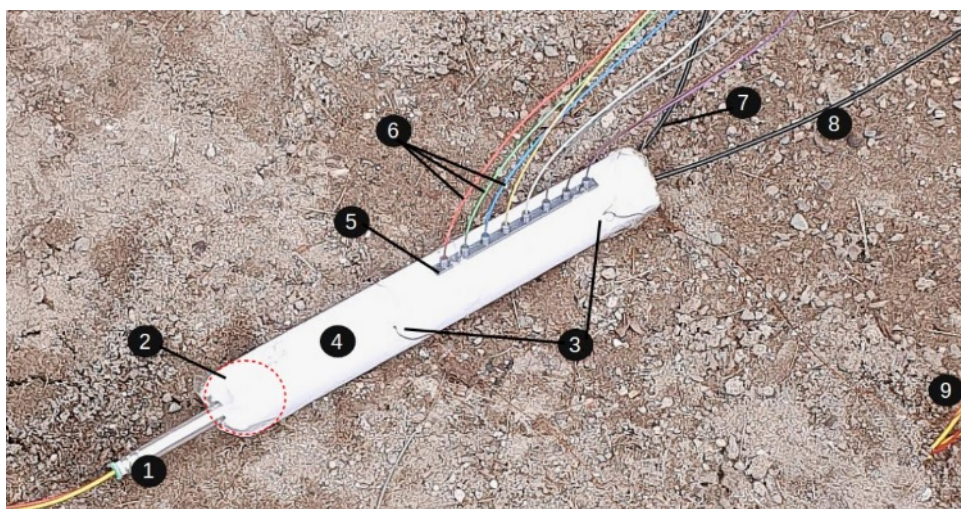
Snímek obrazovky osciloskopu po změření je na obrázku 4.2 ukazuje dva pulzy způsobené příchodem detonační vlny na první a druhé čidlo. Dá se z něj odečíst časový interval mezi nimi a jednoduchým výpočtem v rovnici (4.1) spočítat detonační rychlost. Kde  $s$  je vzdálenost mezi čidly a  $t$  je časový rozdíl mezi signály na osciloskopu.

$$D = \frac{s}{t} = \frac{100}{17,37} = 5,76 \text{ km/s} \quad (4.1)$$

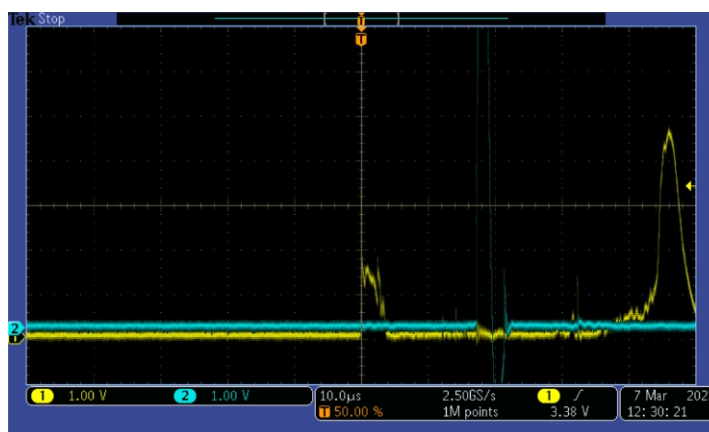
### 4.1.2 Měření optickými vlákny

Pro měření detonační rychlosti pomocí optických vláken byly připraveny nálože sypaného tetrylu v papírovém obalu o průměrech od 8 do 35 mm. Byla použita počínová nálož 15 g Semtexu 1A. Použitou rozbuškou byla mžiková elektrická hliníková rozbuška.

Optická vlákna byla připevněna na nálož pomocí držáku (většinou vytištěného na 3D tiskárně pro přesnost vzdálenosti mezi jednotlivými vlákny). Držák je na nálož buď přilepen lepící páskou, nebo je vytvořen tak, že je možné ho na ni přímo přicvaknout. Svazek optických vláken by měl, směřovat pryč, ve směru pohybu detonační vlny, pokud by byl položen obráceně, mohlo by se stát, že by byl zničen detonačními produkty dříve, než by poslední vlákna zaznamenala signál. Měření proběhlo současně s měřením detonační rychlosti pomocí ionizačních čidel a pomocí navrtaného vlákna.



Obrázek 4.1: Foto Nálože připravené pro měření detonační rychlosti třemi různými způsoby. Nálož před odpalem: elektrická rozbuška (1), počín (2), ionizační čidlo ze zvonkového drátu (3), vlastní nálož (4), držák skleněných optických vláken (5), skleněná optická vlákna (6), FOP připevněná vně (7), FOP uvnitř nálože (8), zvonkový drát v kontaktu s dvoulinkou (9).



Obrázek 4.2: Záznam z osciloskopu po měření detonační rychlosti pomocí ionizačních čidel.

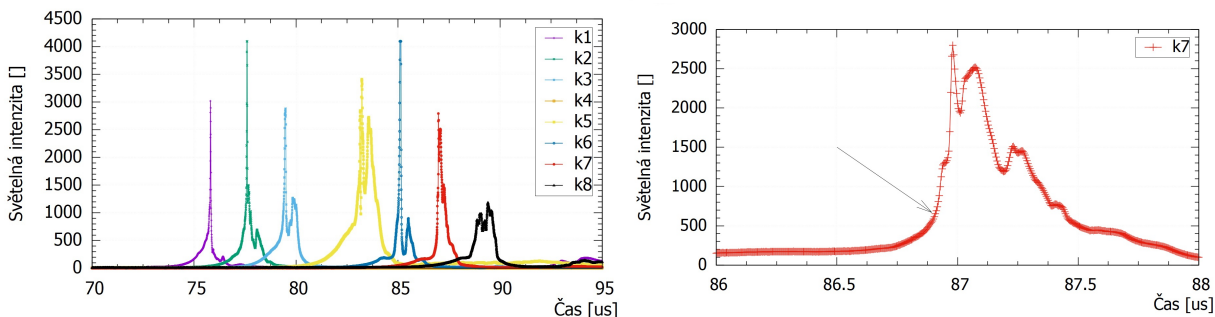
Fotografie připraveného experimentu je na obrázku 4.1 v předchozí části. Papírový obal byl v místech upevnění optických vláken proděravěn.

Vyhodnocení detonační rychlosti probíhalo manuálním odečtem časů příchodu detonační vlny na vlákno ze záznamu světelné intenzity v čase pořízeného přístrojem OPTIMEX. Protože tyto záznamy nemusí být vždy „hezké“, kde by vždy každé vlákno mělo pouze jeden jasný pík příchodu světelné intenzity, je potřeba zvolit jasné místo odečtu času příchodu. Toto bylo zvoleno jako místo, kde se jednotlivé naměřené body od sebe začnou znatelně vzdalovat. Při stále konstantní vzorkovací rychlosti, znamenají body daleko od sebe velmi rapidní nárůst světelné intenzity, který je přiřazovaný detonační vlně. Příklad záznamu z měření a detail místa odečtu hodnoty času je na obrázku 4.3.

### 4.1.3 Měření navrtaným optickým vláknem

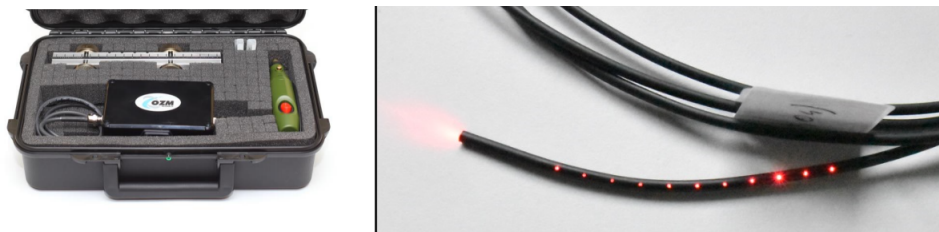
Pro měření detonační rychlosti pomocí optických vláken byly připraveny náložky sypaného tetrylu v papírovém obalu o průměrech od 8 do 35 mm. Malé průměry byly měřeny FOP přiloženou pouze ze strany náložky, větší průměry byly měřeny i uvnitř. Byla použita počínová nálož 15 g Semtexu 1A. Použitou rozbuškou byla mžiková elektrická hliníková rozbuška.

Soupravu pro navrtávání optických vláken poskytuje firma OZM jako volitelné příslušenství k OPTIMEXu. Tato souprava umožňuje velmi přesné a reprodukovatelné navrtávání vláken. Po vložení



Obrázek 4.3: Příklad záznamu z OPTIMEXu z měření individuálními vlákny (nalevo) a detail místa odečtu času příchodu na prvním kanálu (napravo).

vlákna do držáku a upevnění je upravena hloubka vrtání pomocí výřezů pro délku vrtáku (na straně držáku) a následně stačí vrtat skrze vyfrézované díry v držáku. Souprava je ukázána na obrázku 4.4 společně s fotografií připraveného vlákna prosvíceného červeným laserem.



Obrázek 4.4: Souprava pro přípravu navrtaných optických vláken (FOP).

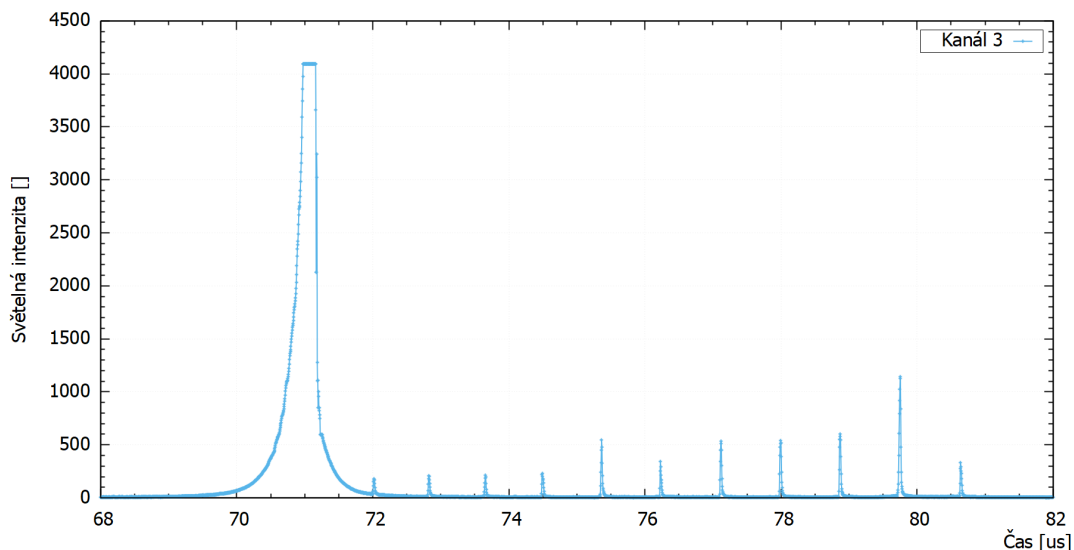
Po navrtání bylo vlákno připojeno na konec hlavního optického vedení a připraveno pro adjustování do nálože. Podle fyzikální konzistence nálože je možno buď vlákno vložit přímo do trhavy podél směru pohybu detonační vlny, nebo připevnit na její povrch (opět podél směru pohybu detonační vlny). Je třeba dbát na to, že vlákno musí být rovně, aby byly navrtané otvory skutečně ve stejné vzdálenosti od sebe. Toho se dá docílit připevněním vlákna na pomocný rovný držák (špejle, nebo 3D vytištěný prvek) případně pro adjustaci ze strany nálože ho pevně přilepit lepicí páskou. Při adjustaci ze strany nálože je potřeba dbát na to, aby navrtané díry byly směrem do výbušiny. Měření proběhlo současně s měřením detonační rychlosti pomocí ionizačních pinů a pomocí více individuálních optických vláken. Foto připraveného experimentu je na obrázku 4.1 v části 4.1.1.

Záznam z měření světelné intenzity v čase, získaný pomocí navrtaného plastového optického vlákna, je na obrázku 4.5. Je vidět, že oproti záznamu z individuálních vláken je mnohem ostřeji vidět kde přes vlákno přešla detonační vlna. Odečet jednotlivých časů je proto jednodušší.

## 4.2 Detonační tlak

Detonační tlak byl měřen manganinovým senzorem a v další části dopočítáván ze změřené rychlosti částic. K měření detonačního tlaku pomocí manganinových senzorů je potřeba osciloskop a pulzní zdroj napětí. Použitým osciloskopem bude Tektronix DPO 3034.

Manganinovému senzoru byl změřen odpor a následně na něj byly připevněny vodiče ve formě měděné lepicí pásky s vodivým lepidlem. Kolečko vystřižené z teflonové fólie široké  $200\mu\text{m}$  a s průměrem 40 mm bylo přilepeno na náložku trhavy A-IX-1 (RDX 95% a vosk 5%) o průměru 40 mm a výšce 40 mm. Hmotnost náložky byla 82,5 g a hustota  $1,64\text{g}/\text{cm}^3$ . Na teflonovou fólii byl doprostřed připevněn senzor tak, aby vodiče přesahovaly přesokraj náložky alespoň. Druhá náložka opět s přilepenou teflonovou fólií byla umístěna na senzor, přitlačena a upevněna na místě lepicí páskou. Pro vytvoření dostatečného zpoždění mezi počátkem napájení senzoru a příchodem signálu bylo při experimentu použito 30 cm Bleskovic 12 (výrobce Explosia a.s.) mezi rozbuškou a náloží (jak je ukázáno na obrázku 4.6).



Obrázek 4.5: Příklad záznamu z OPTIMEXu z měření FOP sondou.



Obrázek 4.6: Model spodní náložky (1) se senzorem (3) přilepeným na teflonovou fólii (2) a vyvedenými vodiči (4) (vlevo). Fotografie experimentu s připravenou bleskovicí pro vytvoření zpoždění (vpravo).

Potom co byl senzor připraven v náložce a připojen koaxiálním kabelem na pulzní generátor bylo možné ho zkalibrovat. Na pulzní generátor byl připojen osciloskop, který zaznamenával různá napětí při změně odporu měřícího vedení. Výsledkem této kalibrace je graf závislosti napětí na změně odporu pro jeden konkrétní senzor. Podle této závislosti je možné po experimentálním změření napětí spočítat odpor vytvořený manganinovým senzorem. Takto získaný odpor se poté vloží do kalibrační závislosti odporu na senzoru proti tlaku, kterým tento odpor byl způsoben. Tato kalibrace byla převzata z literatury [47]. Po získání kalibrační závislosti je potřeba přenastavit rozlišení měřícího kanálu na osciloskopu na rozsah odpovídající očekávanému napětí podle kalibrace.

Po měření manganinovým senzorem je získán záznam napětí v čase. Rozdíl napětí signálu od základní úrovně je vložen do kalibrace a z ní je pak získán detonační tlak.

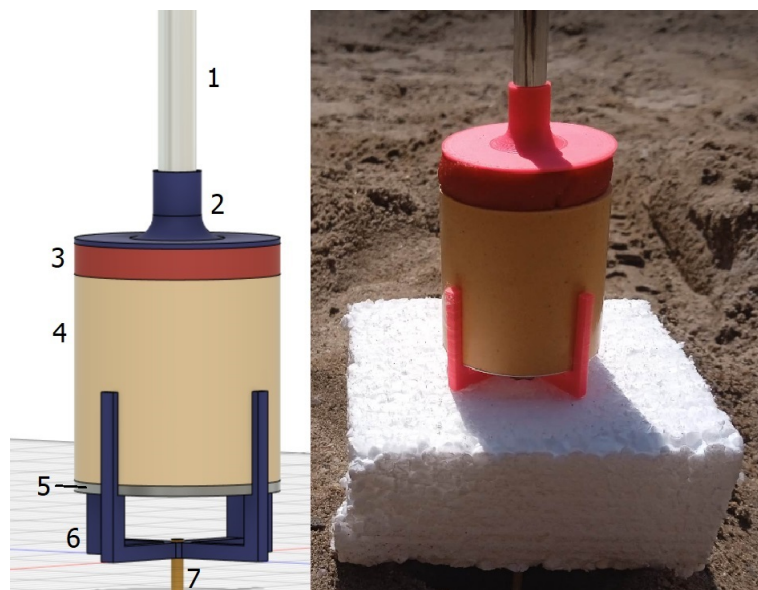
### 4.3 Rychlost částic

Měření rychlosti částic bude prováděno dvěma způsoby a to metodou urychlování disku a metodou DAX. Jak již bylo zmíněno v teorii v části 2.3, tyto metody jsou si velmi podobné, respektive metoda DAX vychází z metody urychlování disku. Přístroje potřebné k měření urychlování disku jsou PDV a osciloskop.

Experiment probíhal stejně pro metodu urychlení disku i pro metodu DAX, rozdíl byl až ve vyhodnocení výsledků. Model adjustované sestavy je na obrázku 4.7. Použitou trhavinou byla náložka

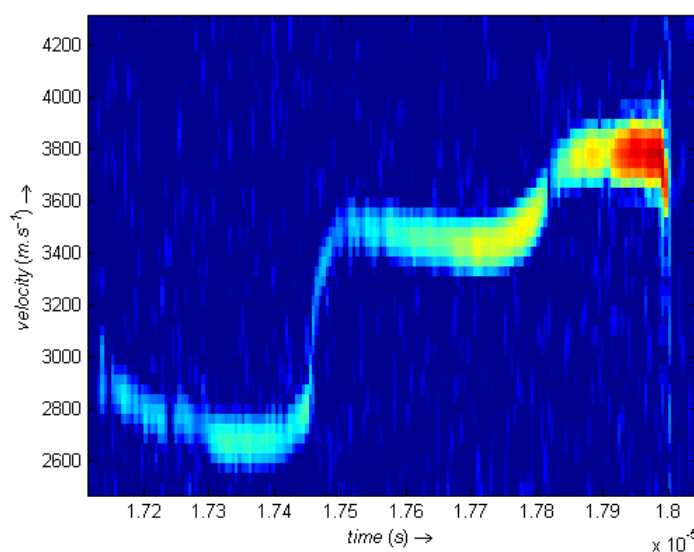


A-IX-1 (RDX 95% a vosk 5% ) o průměru 40 mm a výšce 40 mm. Hmotnost náložky byla 84 g a hustota  $1,66\text{g}/\text{cm}^3$ . Počínovou náloží bylo 12 g Semtexu 1A. Nastavení rozhraní na osciloskopu bylo 400 mV a  $4\ \mu\text{s}$ .



Obrázek 4.7: Model a foto experimentu pro měření urychlení kovového disku. Na modelu jsou označeny jednotlivé části: rozbuška(1), centrovací kruh pro rozbušku (2), počínová nálož Semtexu 1A (3), náložka trhavin A-IX-1 (4), kovový disk (5), držák náložky s diskem a UPC sondou (6), UPC PDV sonda (7).

Ze záznamů rychlostí změřených pomocí PDV byly odečítány dvojce hodnoty, jednou byla rychlost na počátku záznamu a druhou byla směrnice prvotního poklesu rychlosti pro zpětnou extrapolaci. Záznam rychlosti volného povrchu pro tloušťku disku 0.985 mm je na obrázku 4.8. Pro vyhodnocení způsobem push plate testu byly jednotlivé rychlosti vyneseny v závislosti na tloušťce disku. Pro vyhodnocení způsobem DAX byl spočítán čas zpětné extrapolace a ten byl dosazen do rovnice směrnice první strmé části záznamu. Ze získané extrapolované rychlosti volného povrchu byly vypočteny tlaky.



Obrázek 4.8: Záznam rychlosti volného povrchu pro tloušťku disku 0.985 mm.

## 4.4 Objem produktů při STP

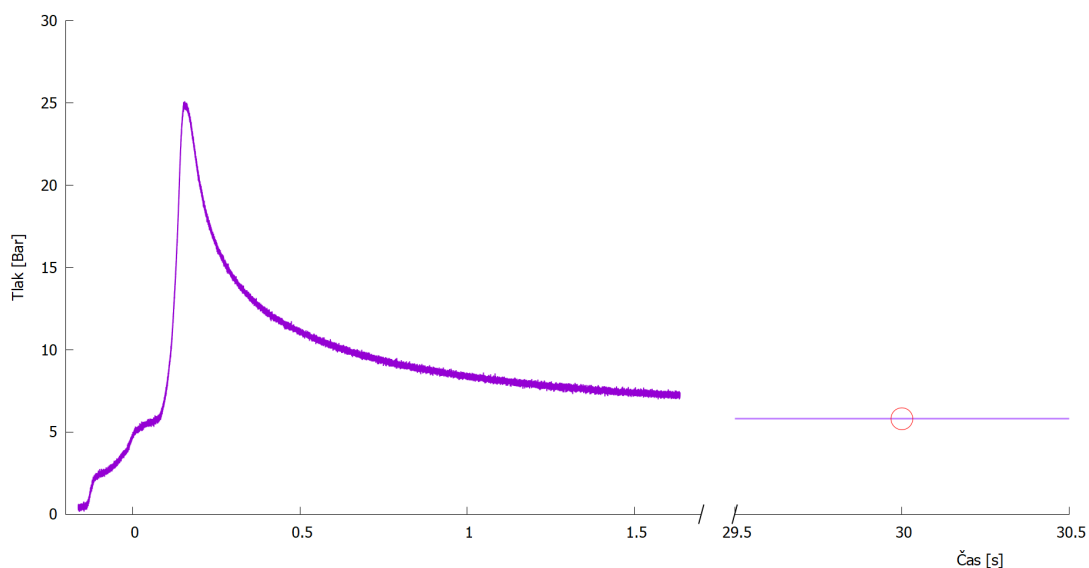
Experiment probíhal tak, že vzorek trhaviny byl připraven nasypáním odváženého množství na papírovou lepicí pásku, na kterou byl vložen odporový drát (niklchromový o průměru 0,4 mm). Takto připravený vzorek byl uchycen na zážehové kontakty v uzavřené bombě „TSV Testing Closed Vessel 40“ od firmy OZM Research s.r.o. o vnitřním objemu 40 cm<sup>3</sup> opatřenou tlakovým čidlem HBM 600 Bar [98].

Po vložení vzorku do bomby a pevném zavření závitu byl vzorek zapálen pomocí odporového drátu (který se jen zahřál, neshořel) a z tlakového čidla byl odečten vyrovnaný tlak v bombě. Na obrázku 4.9 je vyfocený připravený vzorek, jeho upevnění na zážehové kontakty a bomba TSV 40.



Obrázek 4.9: Foto připraveného vzorku, jeho upevnění na zážehové dráty a celé bomby TSV 40.

Kvůli improvizovanému řešení tohoto experimentu, nelze hodnotu finálního ustáleného tlaku odečíst z vyexportovaného záznamu měření, který je na obrázku 4.10. Tento záznam je totiž příliš krátký a končí dříve než se hodnota tlaku v bombě ustálí. Hodnoty tlaku byly odečítány po cca 30 vteřinách sledování „live view“ tlaku v bombě a když se už neměnil, byl brán jako ustálená hodnota.



Obrázek 4.10: Průběh tlaku v bombě po zapálení vzorku. Místo odečtu ustáleného tlaku po cca 30 vteřinách.

Výpočet objemu produktů při STP byl zahájen převedením tlaku v bombě na pascaly, následoval výpočet počtu molů plynných molekul ze stavové rovnice ideálního plynu pomocí objemu bomby (V) a změřené teploty (T). Od tohoto množství bylo odečteno molární množství plynu v bombě před zapálením vzorku a z výsledného čísla byl dopočítán objem zplodin hoření přes molární objem. Výpočet je popsán rovnicemi (4.2) a (4.3).

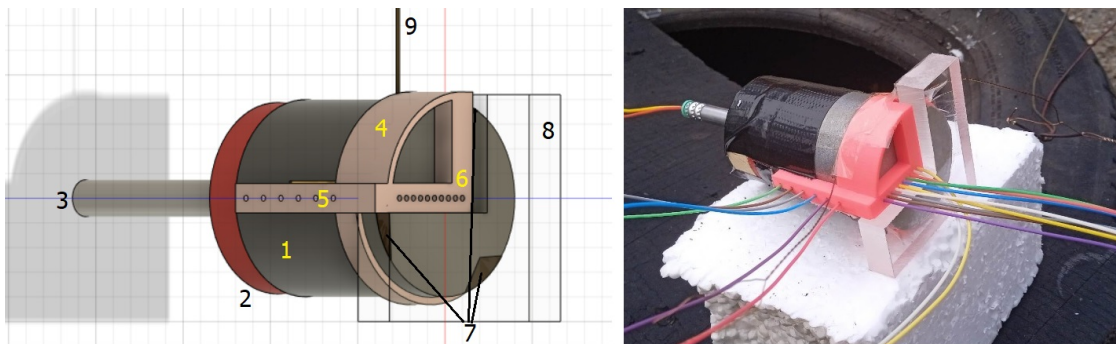
$$\Delta n = \frac{pV}{RT} - \frac{p_0V}{RT} = \frac{580000 \cdot 0,00004}{8,314 \cdot 288} - \frac{101325 \cdot 0,00004}{8,314 \cdot 288} = 7,996 \text{ mmol} \quad (4.2)$$

$$V_{sp} = nV_m = 0,007996 \cdot 22,41 = 0,217 \text{ dm}^3 \quad (4.3)$$

Měření objemu produktů při STP bylo provedeno pouze pro hoření vzorků kvůli otestování funkčnosti metody a kvůli nedostupnosti detonačního kalorimetru, pro vyzkoušení na detonaci.

## 4.5 Zakřivení detonační vlny

Zakřivení detonační vlny bylo měřeno na náložkách trhaviny A-IX-2 což je A-IX-1 (RDX 95%, vosk 5%) s příměsí práškového hliníku. Náložky použité pro experiment měly 30 hmotnostních % hliníku a 70 % A-IX-1. Náložky byly ve tvaru válce o výšce 40 mm a průměrem 40 mm, hustota trhaviny byla  $1,89 \text{ g/cm}^3$ . Pro náložku byl na 3D tiskárně vytvořen prvek pro uchycení optických vláken pro měření detonační rychlosti a zakřivení čela detonační vlny na čele nálože. Na zbylou plochu čela nálože byla připevněna destička z PMMA tak, aby mezi ní a čelem nálože byla tenká vzduchová mezera (na kraj náložky byly přilepeny pásy izolepy a plexisklo bylo připevněno přes ně). Byla použita počínová nálož 20 g Semtexu 1A. Model a foto experimentu je na obrázku 4.11.



Obrázek 4.11: Model experimentu s popsanými částmi (vlevo) a foto připraveného (vpravo). Náložka trhaviny (1), počínová nálož (2), rozbuška (3), 3D vtištěný prvek (4), místo pro měření detonační rychlosti (5), místo pro měření zakřivení vlny optickými vlákny (6), izolepa zajišťující vzduchový polštář (7), PMMA okno (8), trigger pro kameru (9).

Měření detonační rychlosti probíhalo stejným způsobem jako v části 4.1.2. Zakřivení detonační vlny bylo měřeno pomocí přístroje Optimex a pomocí rychlé snímkovací kamery IVV UHSi 1224. Kamera IVV nepořizuje videozáznam ale sled 12 snímků. Nastavení kamery IVV se dělá tak, že lze každému z 12 snímků individuálně nastavit zpoždění po trigerru a dobu expozice. Pro sledování výstupu detonační vlny z nálože byla využita možnost vícenásobné expozice na jednom snímku. Pro snímky, které zaznamenávaly pozici detonační vlny pouze jednou byla nastavena doba expozice 20 ns a čas mezi jednotlivými snímky 65 ns ( $15\,400\,000 \text{ fps}$ ) a pro snímky s vícenásobnou expozicí byla nastavena stejná expoziční doba, ale čas mezi jednotlivými expozicemi, kterých bylo osm, byl 50 ns ( $20\,000\,000 \text{ fps}$ ). Vyhodnocení snímků probíhá odečtením pozice čela detonační vlny vystupující z nálože a času mezi jednotlivými pozicemi. Společně se znalostí detonační rychlosti je možno určit zakřivení.

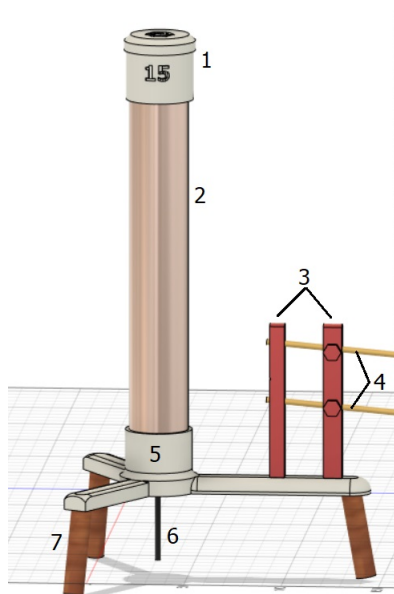
## 4.6 Pracovní schopnost

Pracovní schopnost byla měřena pomocí cylinder testu, přístroje potřeba k měření jsou stejné PDV a osciloskop jako byly použity k měření rychlosti částic, popsané v části 4.3. Použitými měděnými trubkami byly DHP trubky s vnitřním průměrem  $25 \pm 0,1 \text{ mm}$ , vnějším průměrem  $30 \pm 0,1 \text{ mm}$  a délkou cca 25 cm. Testovanou trhavinou byl sypaný tetryl (hustota  $0,9 \text{ g/cm}^3$ ).

Výše uvedená trubka byla vsazena do držáku vytisklého na 3D tiskárně, součástí tohoto držáku jsou místa pro upevnění dvou PDV kolimátorů (které jsou na trubku namířeny pod úhlem  $5-7^\circ$  pro lepší odraz když se trubka začne rozevírat) a místo pro měření detonační rychlosti metodou navrtaného

optického vlákna uvnitř trubky. Na vršek trubky byl nasazen 3D vytištěný prvek pro držení počínové nálože a rozbušky. Počínem bylo 15 g Semtexu 1A. Na obrázku 4.12 je popsán model a foto nálože.

Kromě PDV byl experiment sledován i IVV UHSi kamerou. Pro to aby do ní šel dostatek světla a mohla experiment nahrát, byla cca 1 m za sestavu umístěna láhev naplněná argonem a mezi ní a nálož byl pověšen filtrační papír pro rozptýlení vytvořeného světla. Na plastovou láhev bylo připevněno cca 100 g Semtexu 1A, který po iniciaci stlačil rázovou vlnou argon v lahvi a vytvořil tak dostatečně intenzivní světlo pro podsvícení experimentu. Nastavení kamery pro tento experiment bylo 200 ns expoziční doba a čas mezi snímky 3,33  $\mu$ s (300 300 fps). Model celého uspořádání je ukázán na obrázku 4.13.



Obrázek 4.12: Model cylinder testu (vlevo) a jeho fotka (vpravo). Označenými částmi jsou držák na počínovou nálož (1), měděná trubka s trhavinou (2), držáky pro uchycení kolimátorových sond (3), kolimátorové sondy (4), držák celé sestavy (5), Navrtané optické vlákno pro měření detonační rychlosti (6) a dřevěné podpěry (7).

Vyhodnocení detonační rychlosti z dat získaných z navrtaného vlákna probíhalo stejně jako v části 4.1.3.

#### 4.6.1 Zpracování výsledků PDV

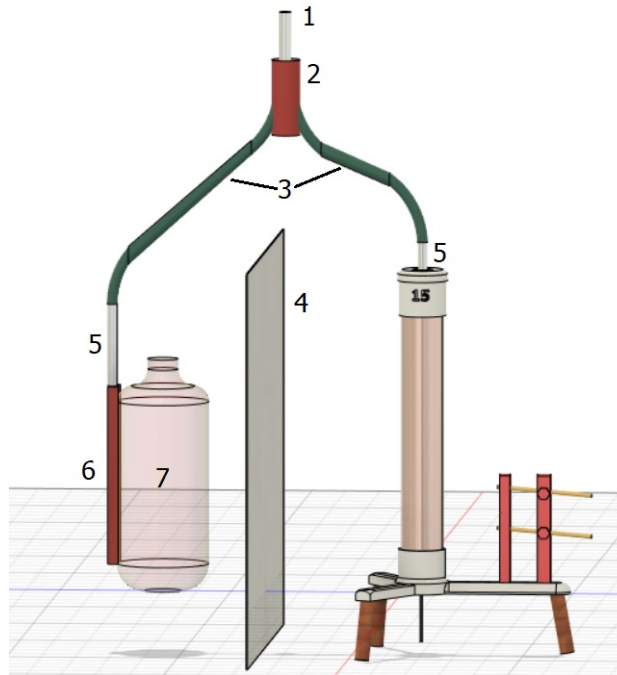
Po naměření signálu na osciloskopu, který je na obrázku 4.14 se tento uloží a vloží do programu „Intmeter 3.0“. Po vytvoření spektrogramu (obrázek 4.15) je signál vybrán a exportován jako .csv soubor. Na obrázku 4.16 je exportovaný záznam vykreslený programem GnuPlot.

#### 4.6.2 Zpracování UHSi dat

Z dat získaných pomocí UHSi kamery je možné získat dvojí informace. Jednou je detonační rychlost, z odečítání posuvu místa kde se trubka rozevívá a časů mezi jednotlivými snímky Druhou je rychlost rozevívání trubky po průchodu detonační zóny. Obě tyto informace je možné odečíst v programu IVV Imprint verze 6.2.0.8. používaným na ovládání UHSi kamer, poskytovaný výrobcem.

Pro získání detonační rychlosti je potřeba nakalibrovat vzdálenosti na obrázku. Pro přepočítání pixelů na vzdálenost je zvolena možnost „Calibrate“ a kalibrace je provedena zvolením dvou bodů na snímku, například tak aby byly na šířku měděné trubky, jejíž vnější průměr je známý.

Ve chvíli kdy se uloží kalibrace lze určit detonační rychlost kliknutím na možnost „Velocity“ v horní liště. Tentokrát se zvolí dva body na různých snímcích, v místě počátku rozevívání trubky. Čas mezi jednotlivými snímky si program spočítá sám z nastavení kamery. Obrázek 4.17 ukazuje čtvrtý



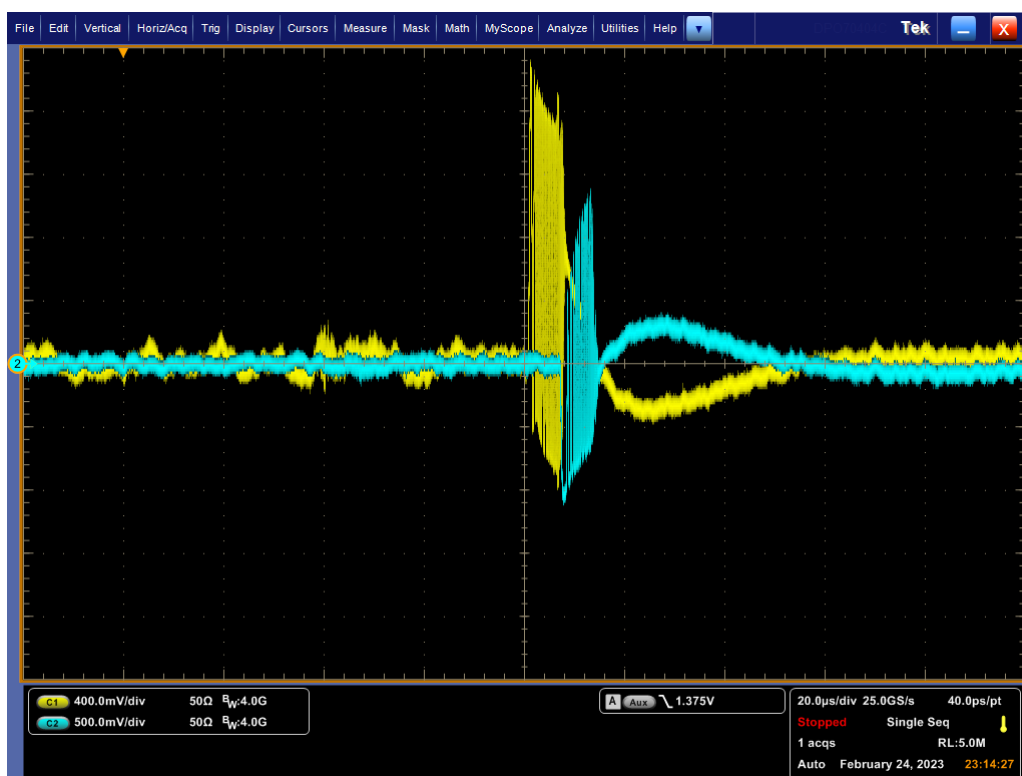
Obrázek 4.13: Model celého experimentu cylinder testu. Označenými částmi jsou mžiková elektrická rozbuška (1), počínová nálož Semtexu 1A (2), metr dlouhé kusy bleskovice 12 (Explosia a.s.) (3), Papír pro rozmytí světla z argonové lahve (4), zážehové rozbušky (5), nálož Semtexu 1A pro stlačení argonu (6) a PET lahev naplněná argonem (7).

a desátý snímek s pozicemi kurzorů pro odečtení detonační rychlosti. Protože místo kde se přesně začíná trubka rozevírat není kvůli kvalitě obrazu příliš jasně vidět, byly odečítány pozice kolem bodů ukázaných na obrázku 4.17. Při posouvání kurzoru o  $\pm 20$  pixelů, se hodnota odečtené detonační rychlosti měnila pouze o pár desítek m/s. Bylo rozhodnuto, že to je přijatelná chyba pro účely tohoto měření. Odečtení detonační rychlosti bylo provedeno dvakrát, jednou na levé a jednou na pravé stěně trubky.

Odečtení rychlosti expanze stěn trubky bylo provedeno pomocí možnosti „Trace“. Tato funkce vykreslí graf intenzity světla, které přišlo na čip kamery buď ve vodorovném, nebo vertikálním směru v místě určeném uživatelem. Rychlost rozevírání trubky je možno získat tak, že se postupně na jednom vybraném snímku zvolí několik vertikálních úrovní a z každé se odečte pozice stěn. Graf intenzity světla ve vodorovné ose, který se vykreslí při každém zvolení vertikální úrovně má uprostřed místo, kde intenzita skoro klesne na nulu, protože je zastíněná trubkou. Odečtením souřadnic začátku a konce zastíněné oblasti jsou získány souřadnice pozice trubky.

Pixely na vertikální ose je možné přepočítat na čas pomocí detonační rychlosti (z kalibrace zjistit jakou vzdálenost představuje jeden pixel a podělit ji detonační rychlostí). Výsledkem je závislost pozice stěny trubky v čase z jejíž směrnice je možno získat rychlost stěny trubky. Protože snímek není rovně je potřeba od směrnice expandující části trubky odečíst směrnici rovné části. Kvůli způsobu odečtu pozice stěn trubky lze rychlost expanze získat pouze lineárním proložením několika málo bodů což neodpovídá nelineárnímu nárůstu rychlosti změřeném pomocí PDV. Kvůli této vnesené chybě bylo rozhodnuto, že výsledek nebude dále upravován pro reálný směr pohybu materiálu (který není kolmo k původní rovině trubky, ale pod mírným úhlem [80]).

Další možností výpočtu rychlosti expanze trubky, po získání detonační rychlosti, je upravit snímky z kamery a pomocí skriptu v Matlabu nebo Octave získat polohu trubky v čase. Octave skript vytvořený a použitý pro toto vyhodnocení je v příloze A na straně 83. Upravení snímku pro vstup do Octave je na obrázku 4.18.



Obrázek 4.14: Surový záznam na osciloskopu. PDV měření cylinder testu (dva kanály za sebou).

## 4.7 Spalná kalorimetrie

Spalné teplo bylo měřeno na kalorimetru BCA 500 od firmy OZM Research s.r.o. Bylo dbáno na postup v souladu se standardy [99] a [100]. Kalorimetrická bomba měla objem 300 ml, byla plněná na cca 30 bar kyslíkem. Zápal byl proveden pomocí kanthalového drátu o průměru 0,22 mm, na kterém byla uvázána bavlnka, svedená ke vzorku. Pod kalíšek se vzorkem byl vždy vnesen 1 ml vody. Kalibrace byla provedena na kyselinu benzoovou, konkrétně půlgramovými nalisovanými tabletami, pro určení teplotního skoku podobnému předpokládaným výsledkům vzorků. Měřenými vzorky byly pentrit, nitroguanidin, methyl-nitroguanidin a poly-oxymethylen. Foto připravené tablety kyseliny benzoové ve skleněném kalíšku se zavedenou bavlnkou je na obrázku 4.19.

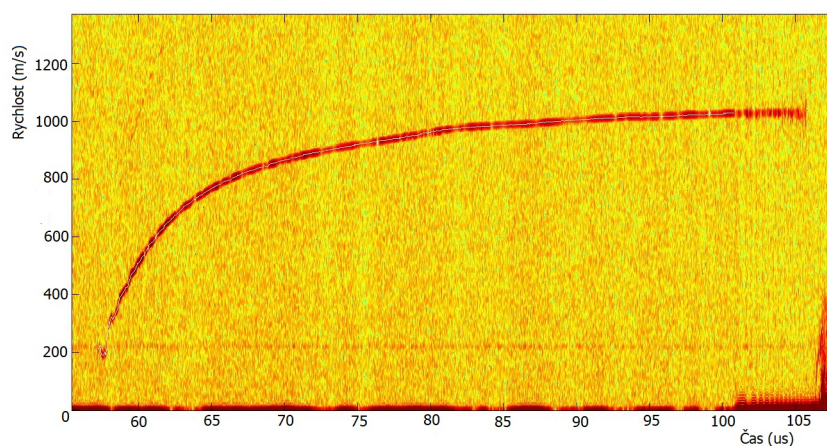
Důvod výběru zážehu bavlnkou a nikoliv samotným odporovým drátem je ten, že při spalování vzorku kyslíku se může stát, že se část drátku teplem roztaví a zreaguje s přítomným kyslíkem na oxid, protože není možné přesně zjistit kolik roztaveného drátku zoxidovalo není možné přesně odečíst tento tepelný rozdíl od výsledku což může mít za výsledek nejen hodnoty spalného tepla znatelně vyšší než teoretické, ale i nepřesnou reprodukovatelnost výsledků kvůli jinému množství zoxidovaného kovu při každém experimentu. Při použití zážehové bavlnky se drátek natažený nad vzorkem mezi elektrodami neroztaví a spalné teplo bavlnky (spočítané z její hmotnosti a spalného tepla což podle kalibrací kalorimetru bylo 16 756 J/g) se odečte od vzorku.

Po změření spalného tepla na kalorimetru je třeba ho přepočítat na slučovací teplo, to lze podle rovnice (4.9), která je výsledkem sloučení rovnic (4.4)-(4.8)[93]. Výpočet počítal s vodou v kapalném stavu. Spalná a slučovací enthalpie se standartně počítá pro teplotu 25° C, takže by měla být provedena korekce na tuto teplotu, ale bylo rozhodnuto, že když experiment probíhal při 23° C tak, že korekce nebude třeba.

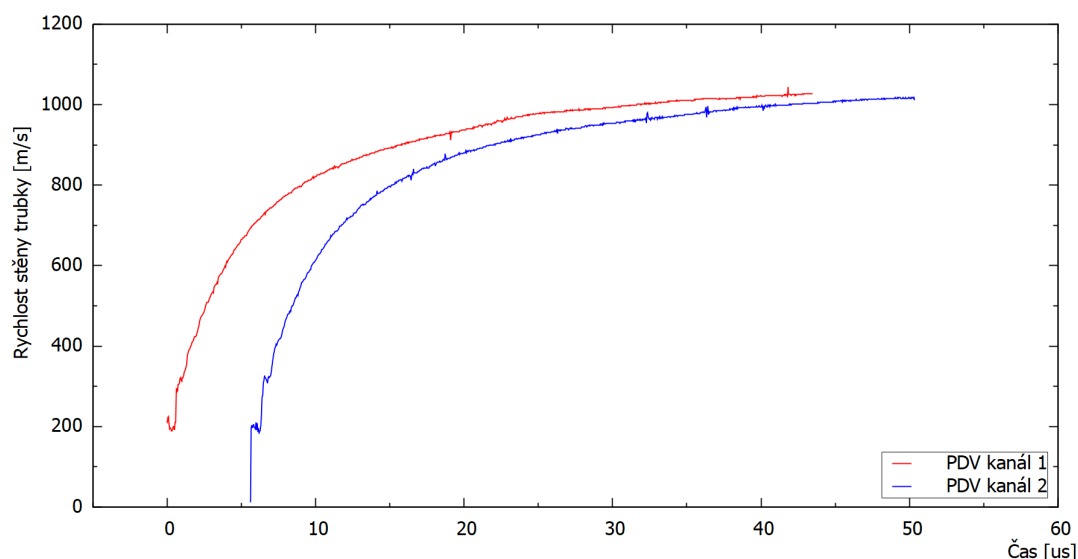
$$\Delta U_s = -Q_s M \quad (4.4)$$

$$\Delta H_s = \Delta U_s + \Delta nRT \quad (4.5)$$

$$\Delta H_{sl} = n_{CO_2} \Delta H_{sl}(CO_2) + n_{N_2} \Delta H_{sl}(N_2) + n_{H_2O} \Delta H_{sl}(H_2O) - \Delta H_s \quad (4.6)$$



Obrázek 4.15: Spektrogram vytvořený ze surového záznamu prvního signálu z PDV měření cylinder testu.



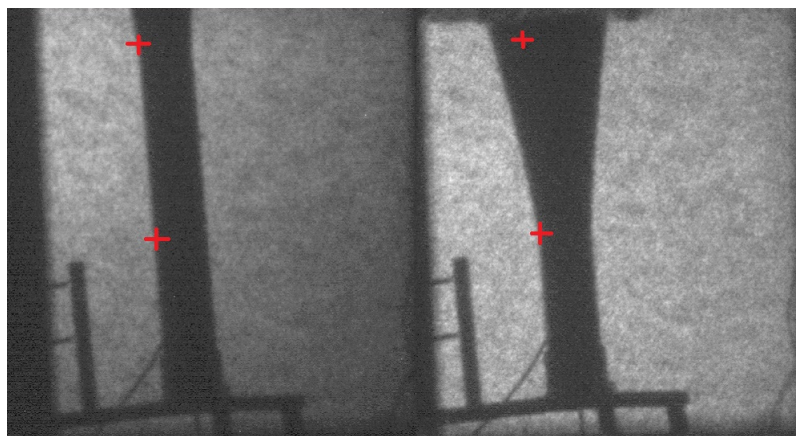
Obrázek 4.16: Interpolace spektrogramů obou kanálů.

$$\Delta U_{sl} = \Delta H_{sl} - \Delta nRT \quad (4.7)$$

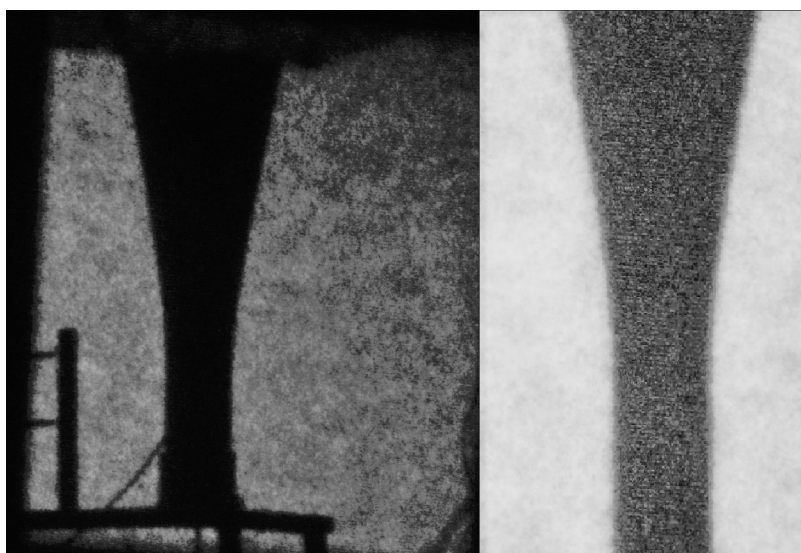
$$Q_{sl} = \frac{\Delta U_{sl}}{M} \quad (4.8)$$

$$Q_{sl} = \frac{n_{CO_2} \Delta H_{sl}(CO_2) + n_{N_2} \Delta H_{sl}(N_2) + n_{H_2O} \Delta H_{sl}(H_2O) + Q_s M - 2 \Delta nRT}{M} \quad (4.9)$$

Spalné teplo kyseliny benzoové se v literatuře pohybuje mezi 26 453 J/g [100] a 26 428 J/g [101], slučovací teplo kyseliny benzoové se pohybuje mezi -3 071 J/g a -3 143 J/g [102]. Námi změřené bylo 26 397 J/g a z něj spočítané slučovací teplo bylo -3 122 J/g, což odpovídá rozhraní literatury, tím byla ověřena přesnost měření.



Obrázek 4.17: Umístění kurzorů pro odečtení detonační rychlosti programem IVV Imprint na čtvrtém a desátém snímku.



Obrázek 4.18: Snímek 10 před a po úpravě pro použití ve skriptu v programu Octave.



Obrázek 4.19: Foto spodní části kalorimetrické bomby s připravenou tabletou kyseliny benzoové ve skleněném kalíšku se zavedenou zážehovou bavlnkou.



## **Část III**

# **Výsledky a diskuze**

## Kapitola 5

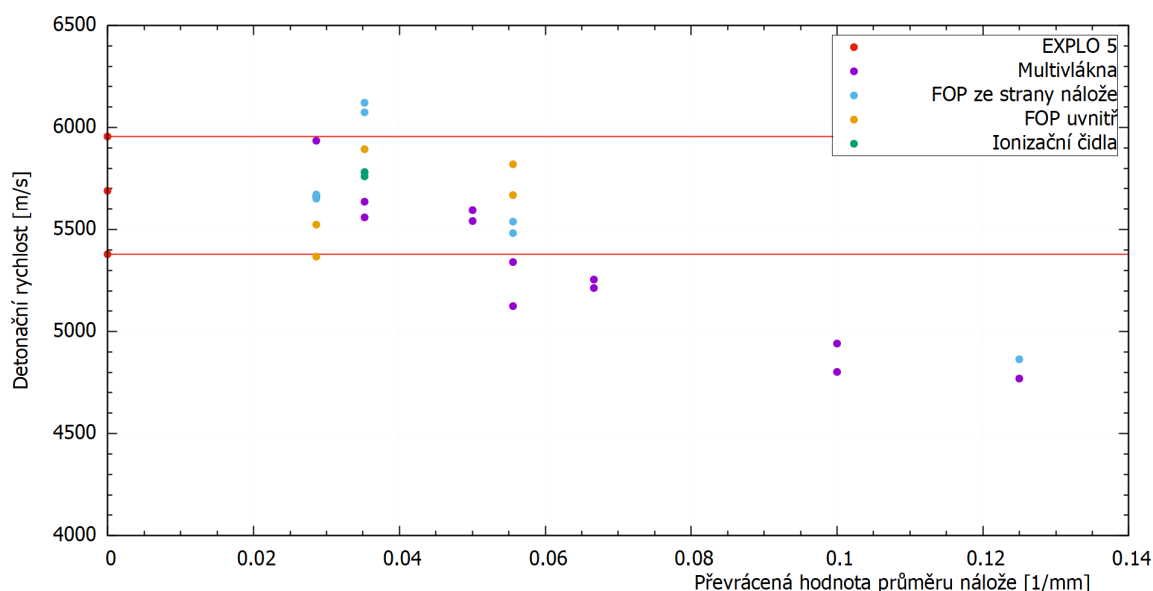
# Výsledky a porovnání

V této části jsou shrnuty výsledky získané z experimentů a postupů popsanych v předchozí kapitole. Experimentální výsledky jsou porovnány s výsledky vypočtenými pomocí programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Jednotlivé techniky jsou porovnány mezi sebou reprodukovatelností a jednoduchostí na přípravu.

### 5.1 Detonační rychlost

Změřené detonační rychlosti jsou shrnuty v tabulce 5.1 na straně 71. V průběhu měření se měnil průměr nálože, což program EXPLO 5 nepočítá, bylo proto rozhodnuto, že porovnání výsledků bude provedeno převedením průměru nálože na převrácenou hodnotu průměru. S vyšším průměrem bude tato hodnota bližší nule a naměřené rychlosti by měly být bližší vypočítaným detonačním rychlostem. Výsledky výpočtů z programu EXPLO 5 jsou v příloze B na obrázcích B.1-B.3.

Detonace v náloži o průměru 8 mm jednou selhala, což by mohlo naznačovat blízkost dolního mezního průměru. U náloží s průměrem vyšším než 20 mm už detonační rychlost dále nerostla a ustálila se v mezích určených vypočtenými hodnotami, což by mohlo znamenat, že kolem 20 mm je horní mezní průměr. Změřené hodnoty jsou vyneseny do grafu na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Graf změřených detonačních rychlostí v závislosti na převrácené hodnotě průměru nálože, červené čáry reprezentují oblast detonačních rychlostí mezi výpočtem pro hustotu 0,9 a 1,1 g/cm<sup>3</sup>.

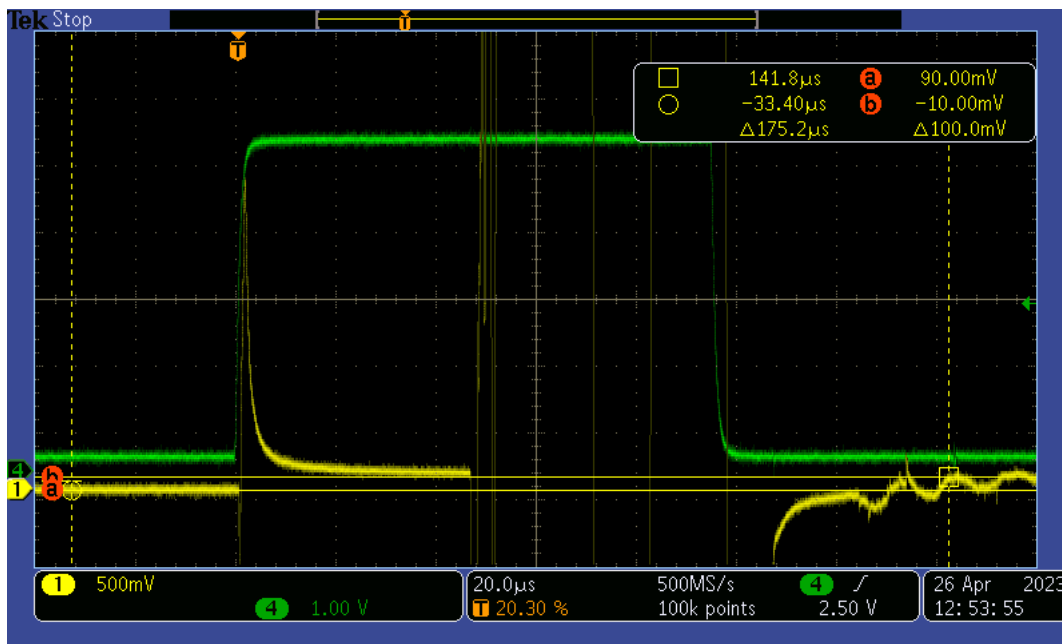
V detonačních rychlostech naměřených různými způsoby jsou značné rozdíly, některé mohou být kvůli jiné hustotě ať už celkové, nebo lokální, protože trhavina nemusela být při přípravě nálože

dokonale sklepana a mohly se vytvořit místa s různou hustotou. Jiné by mohly být proto, že papírový obal ovlivnil výsledek změřený pomocí FOP na povrchu nálože.

Metoda měření pomocí ionizačních čidel byla nejvíce náročná na přípravu, oproti tomu práce s optickými vlákny je relativně jednoduchá a rychlá.

## 5.2 Detonační tlak

Záznam z osciloskopu z měření detonačního tlaku manganinovým senzorem je na obrázku 5.2. Lze vidět, že sensor byl napájen asi  $45 \mu\text{s}$  což byla doba způsobená bleskovicí pro ustálení napětí a potom byl zničen dříve než stihl změřit jakoukoliv hodnotu (žlutý signál).



Obrázek 5.2: Záznam z měření detonačního tlaku manganinovým snímačem.

Tento záznam byl získán opakovaně a bylo proto usouzeno, že přestože je v literatuře [103][104] zmíněno, že použitelné šířky teflonové fólie jsou od 50 do 500  $\mu\text{m}$ , námi použitých 200  $\mu\text{m}$  bylo příliš málo a sensor byl zničen příliš brzo. Detonační produkty na okraji nálože pravděpodobně přerušily elektrické vodiče vedoucí od senzoru. Nepodařilo se získat žádný hodnotný záznam, spolu s dlouhou dobou na přípravu a nutnosti kalibrace každého senzoru až po tom co je vložen do nálože není tato technika příliš uživatelsky příjemná.

## 5.3 Rychlost částic

Experimenty měření rychlosti volného povrchu disku byly provedeny pro hliníkové disky o šesti různých tloušťkách. Hodnoty rychlostí volného povrchu pro jednotlivé disky jsou v tabulce 5.2 na straně 71. Tloušťky disků byly měřeny mikrometrem na čtyřech až pěti místech a zprůměrovány.

Výsledky z měření byly vyneseny přes experimentální data uvedené v literatuře, protože použité náložky měly  $l/d$  rovno jedné, v podstatě přesně sedí s hodnotami změřenými při  $l/d$  rovno 1,2. Vynesené změřené hodnoty na obrázku 5.3 na straně 65 jsou označeny modře. Pro výpočet detonačního tlaku byla určena rychlost volného povrchu  $u$  v průřezu strmého a pozvolnějšího klesání jak je ukázáno na obrázku 5.3 tmavě modrými linkami. Takto odečtená rychlost byla zhruba 3050 m/s. Výpočet detonačního tlaku podle Duffa [19], je uveden v rovnicích (5.1) a (5.3). Hodnoty  $C_0$  a  $s$  byly použity 5350 m/s a 1,32 [105].

$$P_d = \rho_d \frac{u_{vp}}{2} U = \rho_d \frac{u_{vp}}{2} (C_0 + s \frac{u_{vp}}{2}) = 2700 \cdot \frac{3050}{2} \cdot (5350 + 1,32 * \frac{3052}{2}) = 30,32 \text{ GPa} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} P_{CJ} &= \frac{P_d(\rho_v D + \rho_d U)}{\rho_d U} = \frac{P_d(\rho_v D + \rho_d(C_0 + s \frac{u_{vp}}{2}))}{\rho_d(C_0 + s \frac{u_{vp}}{2})} \\ &= \frac{30,32[1660 \cdot 8328 + 2700(5350 + 1,32 \frac{3050}{2})]}{2700(5350 + 1,32 \frac{3050}{2})} = 51,4 \text{ GPa} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Detonační tlak byl také vypočítaný pomocí Cooperovy metody popsané v části 2.3.2. Tímto způsobem vyšla hodnota  $P_{CJ} = 25,3 \text{ GPa}$ . Rychlost částic trhaviny  $u_{CJ}$  byla získána 1847 m/s. Příklad výpočtu je popsán rovnicemi (5.3)-(5.6). Stejným způsobem byly počítány tlaky v následující části.

$$P_{CJ*} = \frac{\rho_v D^2}{4} = \frac{1,660 \cdot 8,238^2}{4} = 28,16 \text{ GPa} \quad (5.3)$$

$$P_r = \frac{P_m}{P_{CJ*}} = \frac{30,32}{28,16} = 1,08 \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} u_{CJ1,2} &= \frac{-(-1,7315 \frac{u_{vp}}{2} - \frac{P_d}{\rho_v D} \pm) \sqrt{(-1,7315 \frac{u_{vp}}{2} - \frac{P_d}{\rho_v D})^2 - 4 \cdot 2,412 \cdot 0,3195 (\frac{u_{vp}}{2})^2}}{2 \cdot 2,412} \\ &= \frac{-(-1,7315 \frac{3,050}{2} - \frac{30,32}{1,66 \cdot 8,238} \pm) \sqrt{(-1,7315 \frac{3,050}{2} - \frac{30,32}{1,66 \cdot 8,238})^2 - 4 \cdot 2,412 \cdot 0,3195 (\frac{3,050}{2})^2}}{2 \cdot 2,412} \end{aligned}$$

$$u_{CJ1} = 1,847 \text{ m/s}$$

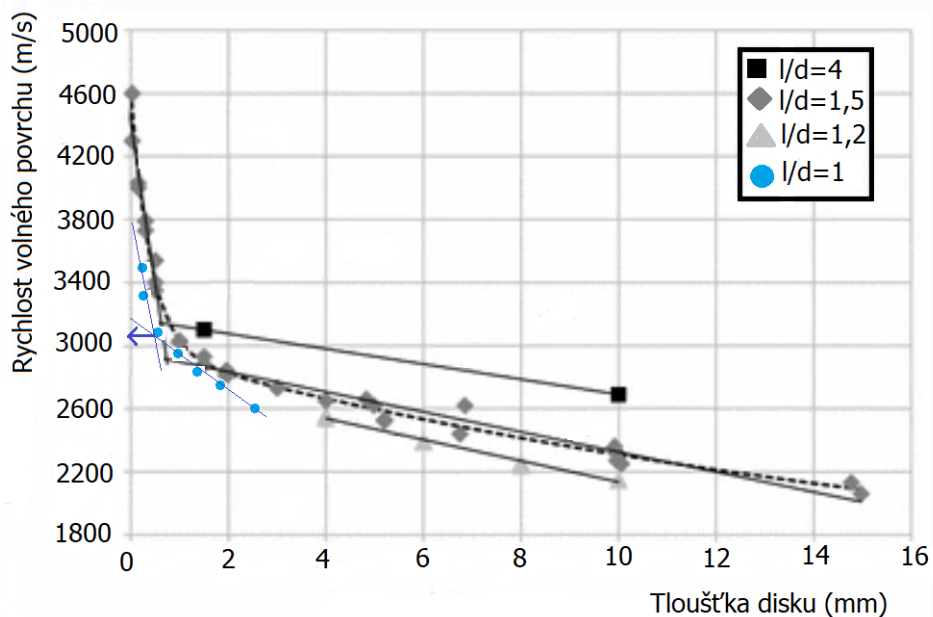
$$u_{CJ2} = 0,166 \text{ m/s} \quad (5.5)$$

$$P_{CJ} = \rho_v u_{CJ} D = 1,66 \cdot 1,847 \cdot 8,238 = 25,25 \text{ GPa} \quad (5.6)$$

### 5.3.1 DAX

Podle rovnic uvedených v části 2.3.2 byly vypočítány hodnoty časů do kterých má proběhnout zpětná extrapolace. Extrapolované rychlosti volného povrchu, detonační tlaky a rychlosti částic trhaviny jsou v tabulce 5.3 na straně 72 a na obrázku 5.4 na straně 66 jsou znázorněny extrapolované záznamy rychlostí volného povrchu. Hodnoty  $C_0$  a  $s$  byly použity 5350 m/s a 1,32 [105]. Příklad výpočtu času pro zpětnou extrapolaci je v rovnici (5.7).

$$t_e = \frac{b}{U} = \frac{b}{C_0 + su} = \frac{0,002554}{5350 + \frac{1,32 \cdot 2606}{2}} = -0,361 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (5.7)$$



Obrázek 5.3: Změřená data přeložená přes hodnoty z literatury [106] a odečtení rychlosti volného povrchu pro výpočet detonačního tlaku. Experimentální výsledky jsou označeny modře.

### 5.3.2 Porovnání výsledků

Celkový trend rychlostí volných povrchů sedí dobře do závislosti získané z literatury. Rychlost částic trhaviny změřená metodou urychlení různých tlouštěk disku byla 3050 m/s což odpovídá rychlosti částic trhaviny  $u_{CJ} = 1847$  m/s. oproti tomu rychlosti získané extrapolací první části záznamu byly vyšší a rozházené. Hlavně rychlosti extrapolované z nejtenčích disků, ty byly o třetinu vyšší, než rychlosti extrapolované z tlustších, pravděpodobně kvůli vlivu von Neumanovy špičky. Když by se tyto vysoké rychlosti odstranily výsledky ostatních disků jsou  $3055 \pm 250$  m/s to odpovídá rozsahu rychlosti částic trhaviny  $u_{CJ} = 1851 \pm 180$  m/s, tedy chyba asi 10 %. Rychlost částic spočtená pomocí programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.) byla 1984 m/s. Výsledky výpočtů detonačních parametrů jsou v příloze B na obrázku B.4.

Detonační tlak vypočítaný podle Duffa je nesmyslně mimo. Oproti tomu tlaky vypočítané metodou Coopera si navzájem odpovídají. Tlak změřený metodou urychlení různých tlouštěk disku byl 25.3 GPa, metodou DAX vycházely tlaky  $25.3 \pm 2.5$  GPa bez hodnot z nejtenčích disků. Detonační tlak spočtený pomocí programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.) byl 26,6 GPa. Výsledky výpočtů detonačních parametrů jsou v příloze B na obrázku B.4.

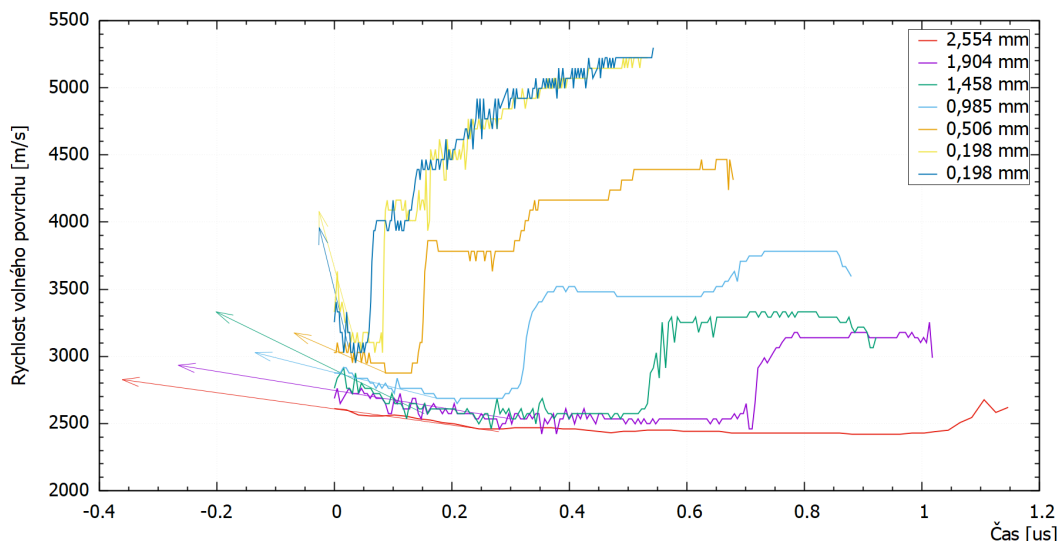
Výsledky měření si navzájem odpovídají, vypočítané hodnoty jsou vyšší, v případě rychlosti částic cca o 7,5 % a v případě detonačního tlaku cca o 5 %.

## 5.4 Objem produktů při STP

Výsledky vypočtených objemů zplodin jsou uvedeny v tabulce 5.4 na straně 72. Protože program EXPLO 5 uvádí výsledek objemu zplodin v  $\text{dm}^3/\text{kg}$  byly hodnoty z tabulky 5.4 přepočteny stejně. Pro HMX je naměřená hodnota  $1092 \text{ dm}^3/\text{kg}$  a podle expla  $1045 \text{ dm}^3/\text{kg}$ . Vyšší hodnota v experimentu by mohla být připočtena hoření samotné papírové lepicí pásky, nebo by mohla být způsobena použitím stavové rovnice ideálního plynu pro výpočet. Výsledky výpočtů parametrů hoření jsou v příloze B na obrázku B.5.

## 5.5 Zakřivení detonační vlny

Jak bylo popsáno v části 4.5 kamera byla nastavena dvěma způsoby, jeden byl takový, že každý snímek měl pouze jednu pozici detonační vlny a z času mezi jednotlivými snímky bylo možno vytvořit



Obrázek 5.4: Změřená data rychlostí volného povrchu pro jednotlivé disky a extrapolované hodnoty naznačené šipkami.

graf pozice čela detonační vlny v čase. Druhým způsobem bylo použití vícenásobné expozice na jeden snímek, kde čas mezi jednotlivými expozicemi byl nastaven v rámci jednoho snímku. Použitím vícenásobné expozice bylo možné získat větší množství bodů pro přesnější určení pozice detonační vlny. Na obrázku 5.5 je série dvanácti snímků z jednoho měření, poslední tři jsou vícenásobně exponované.

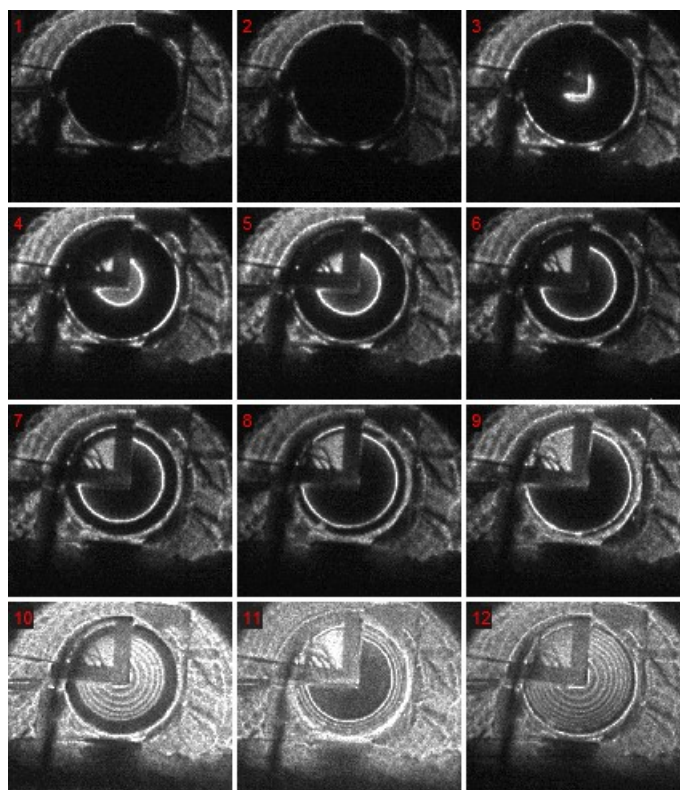
Pro vyhodnocení zakřivení detonační vlny je potřeba znát detonační rychlost, která byla měřena při experimentech. Způsob měření byl stejný jako popsáný v části 4.1.2. Záznam s vyhodnocením detonační rychlosti náložky A-IX-1 s poměrem  $l/d$  rovným jedné je na obrázku 5.6 na straně 68. Změřené detonační rychlosti jsou nesmyslně vysoké na použitém trhavinu.

Vysoké rychlosti jsou důsledkem použití krátké náložky (menší  $l/d$  než 3). Jak bylo zmiňováno v kapitole 2.1, při použití kratší náložky nemusí a většinou nebude detonace ustálená a tento experiment je toho potvrzením. Vysvětlení proč k tomu dochází bude vysvětleno v následujícím odstavci.

Pokud by byla brána v úvahu iniciace detonace v jednom bodě uprostřed čela náložky tak je detonační rychlost stejná do všech směrů od tohoto bodu. Ve chvíli kdy máme náložku o průměru a délce 40 mm tak ve chvíli kdy detonační vlna dosáhne okraje náložky na čele vlny tak v ose náložky je už detonační vlny ve vzdálenosti 20 mm, tedy v polovině náložky. Pro to, aby se detonační vlna srovnala do rovinného čela (v ideálním případě) tak by musela na okraji náložky urazit vzdálenost 40 mm za stejnou dobu jako uprostřed náložky vzdálenost 20 mm. Najednou by tedy byla například rychlost na okraji náložky 16 000 oproti 8 000 uprostřed. Jenže detonační vlna v reálné trhavině se nenarovná úplně do roviny (popsáno v části 1.1.3) takže detonační vlna na okraji náložky nemusí urazit 40 mm, ale jen asi 35. Kromě toho iniciace není (alespoň v tomto případě) přesně bodová. Jak je ukázáno na obrázku 2.25 detonační vlna ze Semtexu 1A nevychází homogenně v kruzích, ale v nepravidelných tvarech a může vycházet z trhaviny na větší ploše najednou. Pro ilustraci tohoto jevu byl vytvořen obrázek 5.7 na straně 68.

Podle principu popsaném v předchozím odstavci by se správně mělo vyhodnocovat zakřivení detonační vlny s detonačními rychlostmi určenými zvlášť pro každý změřený bod, protože na každé jiné vzdálenosti od středu náložky je jiná rychlost. Pro účely vyhodnocení tohoto experimentu bude počítáno s jednou rychlostí, spočtenou jako průměr ustálené detonační rychlosti a vysoké detonační rychlosti změřené na kraji náložky. V tabulce 5.5 na straně 72 jsou uvedeny naměřené detonační rychlosti na krátkých náložkách ( $l/d = 1$ ) na kterých bylo měřeno zakřivení a na dlouhé náložce ( $l/d = 5$ ) která byla použita pro určení ustálené detonační rychlosti.

Pro vyhodnocení detonační rychlosti pomocí Optimexu byly odečítány časy příchozího světla na vlákna adjustovaná na čele náložky. Ze známého času příchozího a vzdálenosti mezi nimi šel určit čas, jaký uběhl mezi tím co detonační vlna vystoupila z náložky uprostřed a co vystoupila z konkrétního bodu



Obrázek 5.5: Série snímků pořízených UHSi kamerou z pozorování zakřivení detonační vlny.

(poloměru). Tento čas byl vynásoben průměrem ustálené detonační rychlosti a rychlosti naměřené na konkrétní náložce. Tím byla získána vzdálenost detonační vlny od čela náložce ve chvíli kdy začala uprostřed vystupovat. Výsledný graf jedné takové závislosti je na obrázku 5.8 na obrázku 69.

Vyhodnocení zakřivení detonační vlny ze záznamu z kamery bylo provedeno pomocí programu IVV Imprint verze 6.2.0.8. poskytovaným výrobcem UHSi kamer.

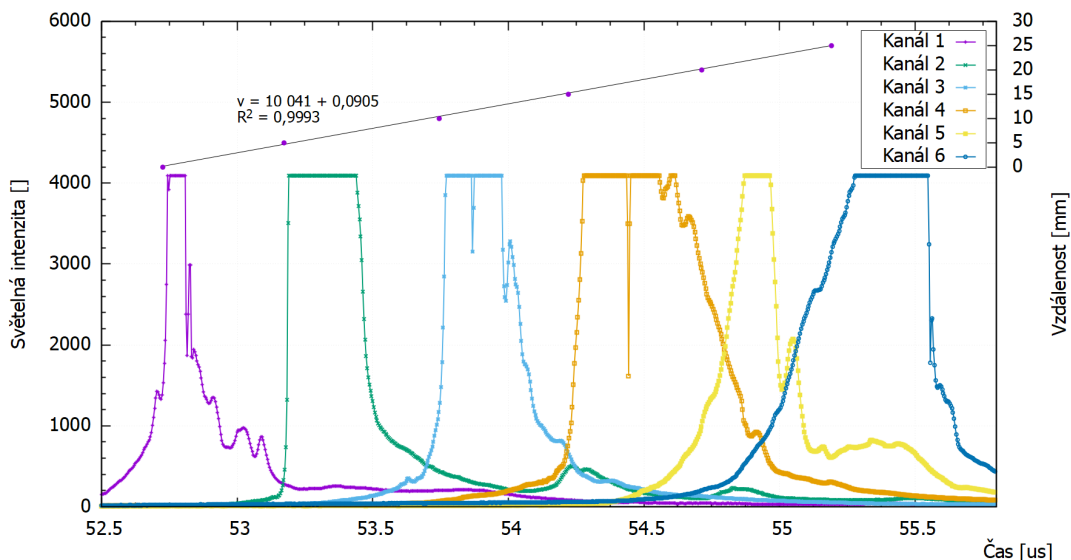
Z grafu je možné si povšimnout, že data získaná z Optimexu mají tendenci být více prohnuté oproti datům získaným z kamery, které jsou téměř lineární. Proč jsou výsledky tak odlišné není známo, ale odhadnutí zakřivení detonační vlny na kraji náložce si celkem odpovídá (4 a 4,5 mm). Tyto výsledky mohou být použity jako vstupní parametry pro kalibraci programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.) při výpočtech detonací se zahrnutím zakřivení detonační vlny.

## 5.6 Pracovní schopnost

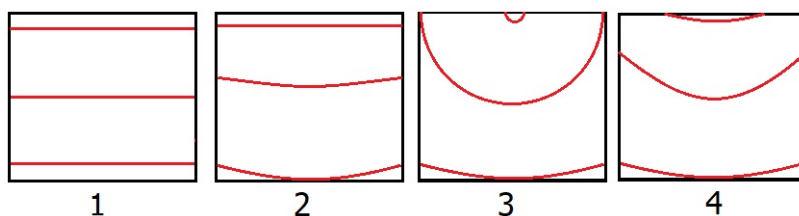
Ze záznamů měření pomocí dvou a více PDV kanálů je možné spočítat detonační rychlost trhaviny v trubce, podmínkou je aby kolimátory mířily na trubku ve stejné ose. Pokud je splněna a je známá vzdálenost mezi místy kam mířily, pak je možné z časového rozdílu zaznamenaných signálů spočítat rychlost. Konkrétně při tomto měření (signály na obrázku 4.16) byla vzdálenost mezi místy kam mířily kolimátory 31 mm a časový rozdíl signálů 5,72  $\mu\text{s}$ . Tedy detonační rychlost práškového tetrylu o hustotě 0,9  $\text{gcm}^{-3}$  a průměru náložce 25 mm vypočtená z PDV dat je 5 420 m/s.

### 5.6.1 Vyhodnocení FOP dat

Vyhodnocení detonační rychlosti z dat získaných z navrtaného vlákna probíhalo stejně jako v části 4.1.3. Naměřenou hodnotou bylo 5,4 km/s. Měření detonační rychlosti skrze obal náložce (měděnou trubku) vůbec nezaznamenalo žádný světelný signál, což vyústilo v závěr, že se metoda FOP nehodí pro měření detonační rychlosti skrze obal.



Obrázek 5.6: Záznam a vyhodnocení změřené detonační rychlosti při měření zakřivení detonační vlny.



Obrázek 5.7: Ilustrace zvýšení detonační rychlosti na okraji krátké náložky. Ideální detonace iniciovaná po celé ploše náložky (1), reálná detonace iniciovaná po celé ploše náložky (2), reálná detonace iniciovaná z jednoho bodu uprostřed (3), reálná detonace iniciovaná na části čelní plochy počinovou náloží (4).

### 5.6.2 Program IVV Imprint

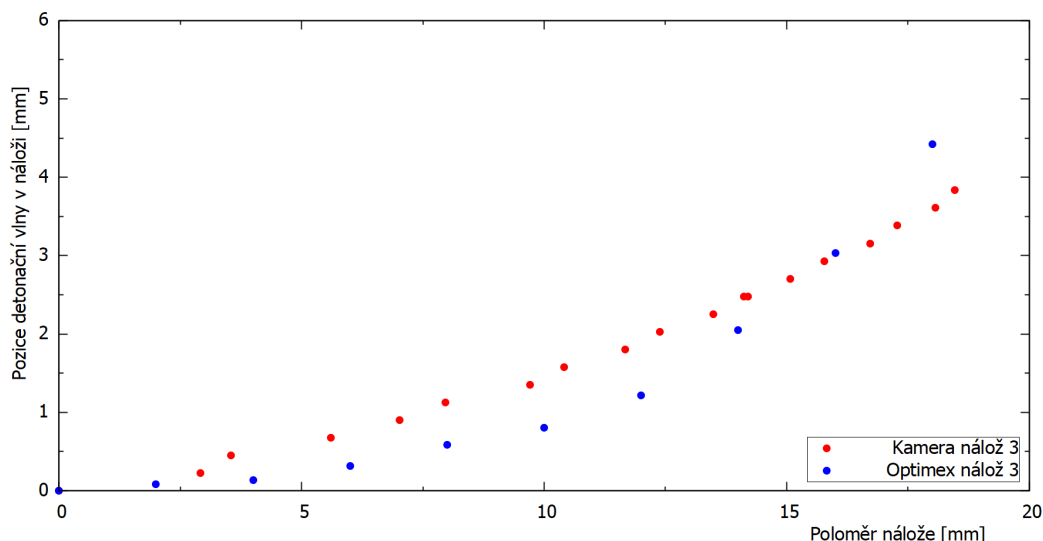
Detonační rychlost byla odečítána jak je popsáno v části 4.6.2. Rychlost určená pomocí programu IVV Imprint je 5 531 pro jednu stranu trubky a 5 487 m/s pro druhou, průměr je 5 509 m/s.

Graf odečtených pozic stěn trubky a jejich směrnice jsou na obrázku 5.9 na straně 70. Výsledné rychlosti expanze stěn trubky pro jedenáctý snímek byly 1 000 m/s pro jednu stranu a 958 m/s pro druhou, průměr je 979 m/s. Rychlosti expanze stěny byly odečteny i pro desátý snímek, kde byly 900 m/s pro jednu stranu, 983 m/s pro druhou a průměr 941 m/s. Na jedenáctém snímku je spočtena o trochu vyšší rychlost a to z toho důvodu, že jak již bylo zmíněno, rychlost expanze trubky nelineárně roste v čase. Na snímku jedenáct byl časový ekvivalent odečtené vertikální osy cca o 1,5  $\mu$ s delší, než na snímku deset. Tento časový rozdíl způsobí i rozdíl v rychlostech.

### 5.6.3 Octave skript

Skript uvedený v příloze A na straně 83 vypočte rychlost expanze stěny trubky získanou ze snímku a k tomu přiřadí rychlost z PDV v daném čase (PDV záznam je delší, než data ze snímku, nelze proto porovnávat finální rychlost z PDV a finální rychlost ze snímku). Skript je možno projet pro každý připravený snímek dvakrát, jednou pro porovnání s jedním PDV signálem a podruhé pro porovnání se druhým. Výsledné rychlosti expanze trubky jsou 880 m/s pro devátý snímek a 940 m/s pro desátý snímek.





Obrázek 5.8: Příklady grafů závislosti pozice detonační vlny v nálož na jejím poloměru. Data vyhodnocená z Optimexu a data vyhodnocená z UHSi kamery.

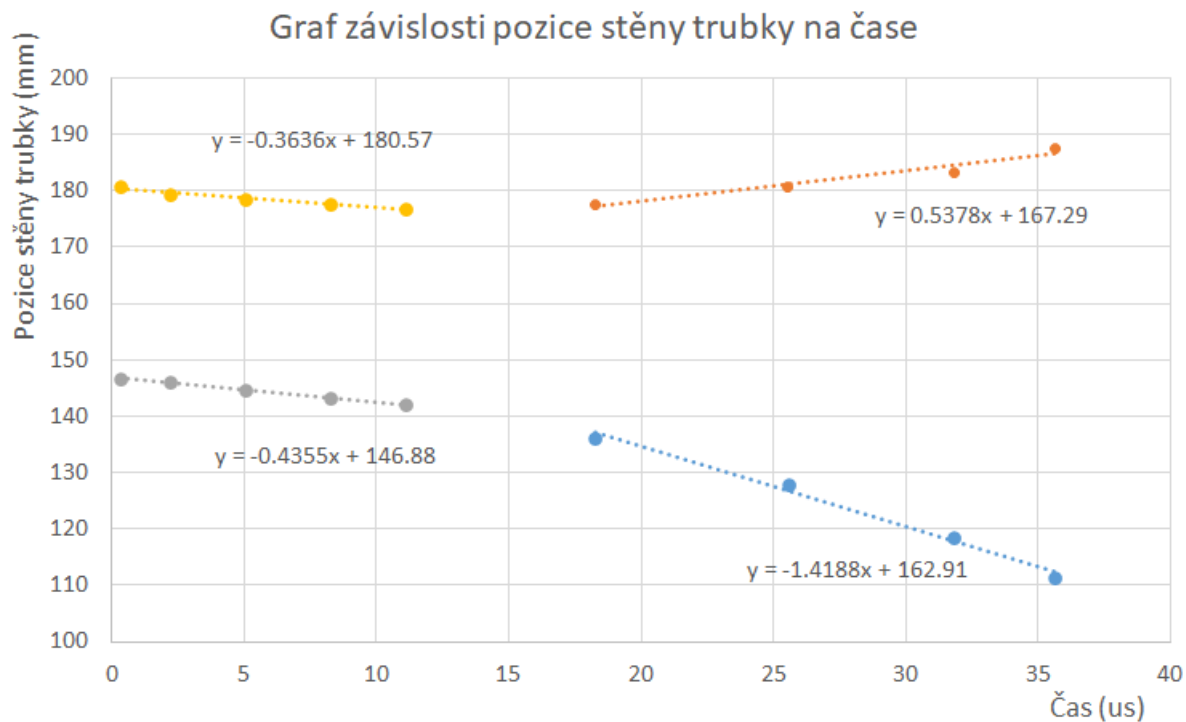
#### 5.6.4 Porovnání výsledků

V grafu na obrázku 5.10 jsou zobrazeny rychlosti stěny trubky naměřené pomocí PDV a kamery porovnané s vypočtenou předpovědí z programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Parametry JWL rovnice, podle které byla nakreslena křivka předpovězená explem jsou v příloze B na obrázku B.1.

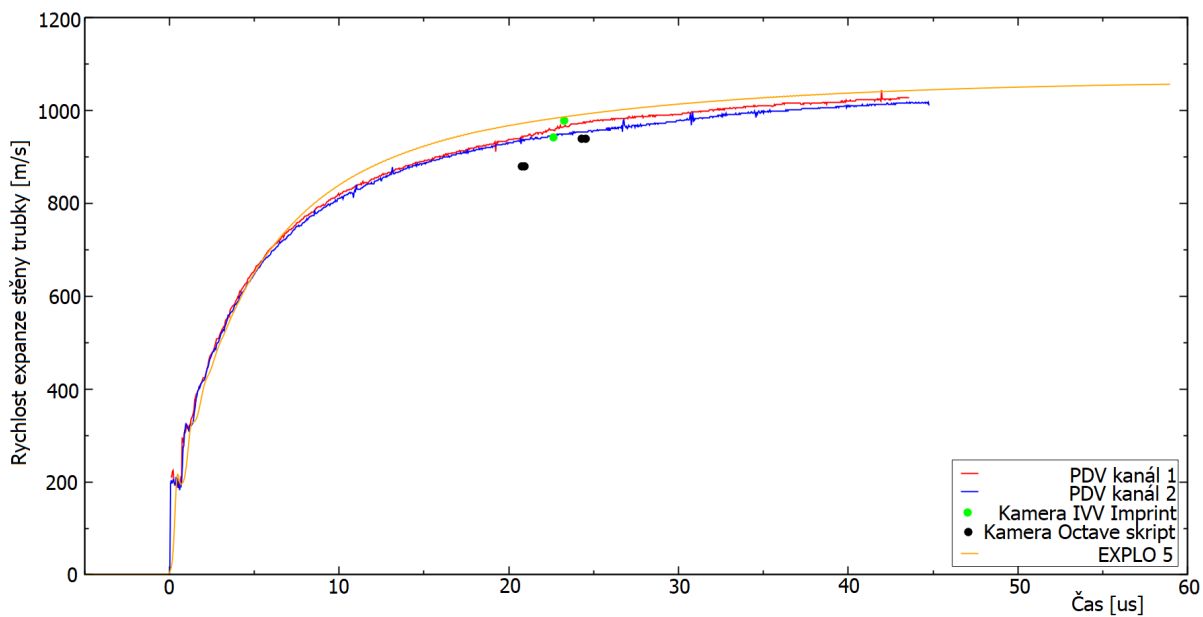
Výhoda měření pomocí PDV je kontinuální záznam, který je také delší než záznam možný chytit na kameru. Maximální odchylka od předpovězeného průběhu je cca 5 % u odečítání rychlosti na snímku 9 pomocí oktave skriptu. Časově nejnáročnější bylo odečítání pozice stěny trubky v programu IVV Imprint. Nastavení PDV měření je rovněž jednodušší technika než nastavování kamery společně s potřebným vytvořením podsvícení jevu (plastovou lahví s argonem).

### 5.7 Kalorimetrie

Výsledek z měření na kalorimetru BCA 500 je na obrázku 5.11 na straně 72. Tento konkrétní průběh měření je pro vzorek PETN o hmotnosti 0,527 g. Výsledné změřené hodnoty spalných tepel a vypočtených slučovacích tepel jsou v tabulce 5.6 na straně 73. Vzhledem k tomu, že slučovací teplo není výsledek z výpočtu detonačních parametrů, ale jeden ze vstupů ze kterých se detonační parametry počítají, není možno porovnat výsledky experimentu a výpočtu. Jsou proto porovnány s hodnotami slučovacích tepel uvedených v literatuře shrnuté v ICT databázi [102]. Výstupy z této databáze jsou v příloze C na straně 92.



Obrázek 5.9: Graf závislosti pozice stěny trubky na snímku na čase.



Obrázek 5.10: Graf porovnávající naměřené rychlosti stěny trubky a vypočtený průběh z programu EXPLO 5.

Tabulka 5.1: Tabulka naměřených hodnot detonačních rychlostí tetrylu.

Způsob měření	Průměr náložky [mm]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Detonační rychlost [m/s]	Převrácená hodnota průměru [mm <sup>-1</sup> ]
EXPLO 5	x	0,9	5 380	0
	x	1,0	5 688	0
	x	1,1	5 956	0
Ionizační čidla	28	0,98	5 760	0,0357
	28	0,96	5 780	0,0357
Optická vlákna	8	0,95	x	0,1250
	8	1,01	4 770	0,1250
	10	0,92	4 802	0,1000
	10	0,93	4 941	0,1000
	15	0,99	5 212	0,0667
	15	1,00	5 255	0,0667
	18	1,06	5 340	0,0556
	18	1,07	5 125	0,0556
	20	0,94	5 542	0,0500
	20	0,99	5 595	0,0500
	28	0,98	5 560	0,0357
	28	0,96	5 635	0,0357
	35	1,12	5 936	0,0286
	35	1,09	5 662	0,0286
	FOP ze strany	8	0,95	x
8		1,01	4 864	0,1250
18		1,06	5 483	0,0556
18		1,07	5 540	0,0556
28		0,98	6 122	0,0357
28		0,96	6 073	0,0357
35		1,12	5 672	0,0256
35		1,09	5 651	0,0256
FOP uvnitř	18	1,06	5 670	0,0556
	18	1,07	5 821	0,0556
	28	0,98	5 894	0,0357
	28	0,96	5 780	0,0357
	35	1,12	5 366	0,0256
	35	1,09	5 524	0,0256

Tabulka 5.2: Tabulka naměřených hodnot rychlostí volného povrchu disku.

Tloušťka [mm]	Rychlost [m/s]
2,554	2 606
1,904	2 746
1,458	2 852
0,985	2 924
0,506	3 060
0,198	3 350
0,198	3 478

Tabulka 5.3: Tabulka extrapolovaných hodnot rychlostí volného povrchu disku a vypočítaných hodnot detonačního tlaku.

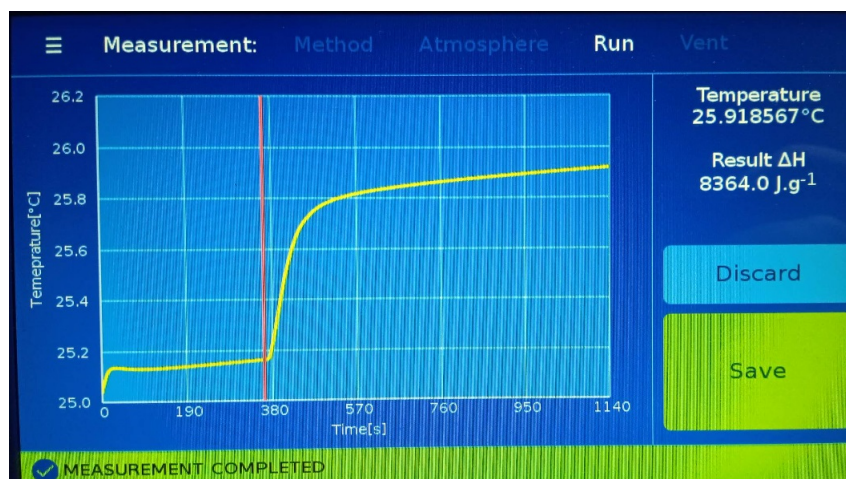
Tloušťka disku [mm]	Čas extrapolace [ $\mu$ s]	Extrapolovaná rychlost volného povrchu [m/s]	Detonační tlak [GPa]	Rychlost částic $u_{CJ}$ [m/s]
2,554	-0,361	2 824	23,1	1 691
1,904	-0,266	2 930	24,1	1 764
1,458	-0,202	3 321	27,9	2 038
0,985	-0,135	3 026	25,0	1 830
0,506	-0,069	3 173	26,4	1 933
0,198	-0,026	4 080	35,5	2 595
0,198	-0,026	3 960	34,3	2 506

Tabulka 5.4: Tabulka naměřených a spočítaných hodnot k určování objemu zplodin při STP.

Látka	Navážka [g]	Finální tlak [bar]	Molární množství zplodin [mmol]	Objem zplodin [ $\text{dm}^3$ ]	Objem zplodin [ $\text{dm}^3/\text{kg}$ ]
HMX	0,2	5,8	8	0,217	1 085
HMX	0,4	11,4	17,35	0,427	1 068
HMX	0,6	18	28,38	0,674	1 123

Tabulka 5.5: Tabulka naměřených hodnot detonačních rychlostí při vyhodnocení zakřivení detonační vlny.

l/d	Detonační rychlost [m/s]
1	9 204
1	9 801
1	10 041
1	9 881
5	8 020



Obrázek 5.11: Záznam průběhu kalorimetrického měření pro 0,527 g PETN v atmosféře 30 bar kyslíku.

Tabulka 5.6: Tabulka naměřených hodnot spalných tepel, z nich vypočtených hodnot slučovací tepel a rozptylů hodnot slučovací tepel z literatury [102]. Protože se jedná o záporné hodnoty tak jako symbol „až“ je použit symbol ÷

Látka	Spalné teplo [J/g]	Vypočtené slučovací teplo [J/g]	Slučovací teplo z literatury [J/g]
PETN	8 417,6		
PETN	8 417,1	-1 520,7	-1 508 ÷ -1 668
PETN	8 364,0		
NQ	8 753,5		
NQ	8 779,5	-602,4	-713 ÷ -789
NQ	NA		
M-NQ	13 010		
M-NQ	12 671	-942,5	-489 ÷ -1 079
M-NQ	13 578		
POM	16 444		
POM	16 534	-6 154,3	-5 584 ÷ -5 724
POM	16 489		

**Část IV**

**Závěr**

## Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá popisem vybraných experimentálních metod pro měření parametrů výbušin a určením jejich použitelnosti pro porovnání výsledků s vypočtenými hodnotami, získanými z programu programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Hlavní cíle této práce byly provedení literární rešerše na téma experimentálních metod používaných pro ověření výsledků termodynamických výpočtů detonačních parametrů výbušin, vybrání vhodných metod a experimentálního ověření jejich použitelnosti pro stanovení detonačních parametrů výbušin a porovnání experimentálně stanovených výsledků s výsledky získanými z programu EXPLO 5, nebo jiných dostupných alternativ.

V teoretické části byl popsán vývoj základních modelů detonace, jako jsou CJ, nebo ZND model a jejich používání pro předpovědi parametrů výbušin pomocí stavových rovnic detonačních produktů a použití těchto stavových rovnic vve výpočetních programech. Dále byly popsány různé měřicí metody pro experimentální určení vybraných parametrů výbušin použitelné buď pro porovnání předpovězených a reálných hodnot, nebo pro získání vstupních dat pro tyto výpočty. Parametry popsané v teoretické části byly detonační rychlost, detonační tlak, rychlost částic, detonační teplota, objem produktů při STP, zakřivení čela detonační vlny, stanovení dolních mezních průměrů, určení vlivu obalu, pracovní schopnost, spalné a detonační teplo. Metoda pro měření objemu produktů při STP nebyla v literatuře nalezena, byl proto navržen způsob experimentálního určení tohoto parametru.

V experimentální části jsou nejprve popsány přístroje použité pro měření parametrů výbušin různými metodami. Následuje obsahující výčet použitých experimentálních metod vybraných z teoretické části, postup přípravy jednotlivých experimentů a způsoby vyhodnocení výsledků. Pro provedení experimentální části byly vybrané metody pro měření detonační rychlosti, detonačního tlaku, rychlosti částic, objemu produktů při STP, zakřivení detonační vlny, pracovní schopnosti a spalného tepla.

Ve výsledkové části byly shrnuty všechny získané experimentální hodnoty jednotlivých parametrů výbušin a tyto byly porovnány s hodnotami vypočtenými programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro detonační rychlost, rychlost částic, detonační tlak a pracovní schopnost byly vypočtené výsledky vyšší, než naměřené hodnoty, ale odchylky nebyly příliš výrazné. Pro metodu měření objemu produktů při STP vycházela vypočtená hodnota asi o 4 % nižší, což vzhledem k prvnímu vyzkoušení této metodiky byl velmi dobrý výsledek. Také byly ve výsledkové části stručně okomentovány jednotlivé experimentální metody ohledně opakovatelnosti a náročnosti na přípravu. Například metoda měření detonačního tlaku vloženým manganinovým snímačem byla velmi uživatelsky náročná na přípravu a přes postup podobný literatuře s ní nebyly změřeny žádné hodnoty.

Při pokračování v této práci by stálo za to vyzkoušet techniky, které dosud na Ústavu Energetických Materiálů nebyly k dispozici a optimalizovat pracovní postupy metod popsanych v této práci pro uživatelské zpříjemnění a zlepšení výsledků. V neposlední řadě vzhledem k motivaci práce, kterou bylo zjednodušení vývoje nových výbušin není optimální, že se detonační parametry měří individuálně při oddělených experimentech. Ačkoli některé metody kombinují například měření rychlosti částic s detonační rychlostí, je potřeba těchto experimentů udělat několik. Z tohoto pohledu se nabízí cylinder test jako základní „platforma“ pro kombinaci měření co největšího počtu detonačních parametrů, použitím jednoho experimentu pro naměření všech důležitých parametrů se značně sníží množství potřebné trhaviny, což zlepší průběh vývoje nových výbušin. Cylinder test může být pro některé trhaviny zmenšen použitím trubky o polovičních rozměrech, tím je možno snížit množství trhaviny potřebné pro charakterizaci ještě více. Pro budoucí vývoj je potřeba také optimalizovat vyhodnocení kamerového záznamu a získání JWL parametrů z tohoto vyhodnocení.

# Literatura

- [1] J. H. S. Lee, *The detonation phenomenon*, **2008**.
- [2] M. Berthelot a P. Vieille, L'oude explosive, *Ann. Chem. Phys*, **28**(5):283, **1883**.
- [3] E. Mallard a H. Le Chatelier, Combustion of explosive gas mixtures, *Ann. Mine*, **1883**.
- [4] D. L. Chapman, Detonation Waves, *Philosophical Magazine*, **213**:90, **1899**.
- [5] E. Jouguet, Theory of detonation, *Pure Appl. Math*, **70**(1):347, **1904**.
- [6] V. A. Michelson, *On the normal ignition velocity of explosive gaseous mixtures*, Disertační práce, Moscow University, **1890**.
- [7] Y. B. Zeldovich, To the problem of energy use of detonation combustion, *Zh. Tekhn. Fiz.*, **10**(17):1453, **1940**.
- [8] J. Von Neuman, Theory of detonation waves, Výzkumná zpráva, Institute for Advanced Study Princeton NJ, **1942**.
- [9] W. Döring, Über den detonationsvorgang in gasen, *Annalen der Physik*, **435**(6-7):421, **1943**.
- [10] R. D. Cowan a W. Fickett, Calculation of the detonation properties of solid explosives with the kistiakowsky-wilson equation of state, *The Journal of Chemical Physics*, **24**(5):932, **1956**.
- [11] L. E. Fried, W. M. Howard a P. C. Souers, EXP6: A new equation of state library for high pressure thermochemistry, In *12th International Detonation Symposium, August*, s. 11–16, Citeseer, **2002**.
- [12] D. R. Hardesty a J. E. Kennedy, Thermochemical estimation of explosive energy output, *Combustion and Flame*, **28**:45, **1977**.
- [13] M. S. Shattuck, *Determination of detonation velocity of explosive compounds using optical techniques*, New Mexico Institute of Mining and Technology, **2015**.
- [14] F. Petitpas, R. Saurel, E. Franquet a A. Chinnayya, Modelling detonation waves in condensed energetic materials: Multiphase CJ conditions and multidimensional computations, *Shock waves*, **19**:377, **2009**.
- [15] G. Baudin a R. Serradeill, Review of Jones-Wilkins-Lee equation of state, In *EPJ Web of Conferences*, svazek 10, s. 00021, EDP Sciences, **2010**.
- [16] W. C. Davis, HIGH EXPLOSIVES, *Los Alamos Science*, **2**:48, **1981**.
- [17] W. Fickett a W. C. Davis, *Detonation: theory and experiment*, Courier Corporation, **2000**.
- [18] J. E. Shepherd, Detonation in gases, *Proceedings of the Combustion Institute*, **32**(1):83, **2009**.
- [19] R. E. Duff a E. Houston, Measurement of the Chapman-Jouguet Pressure and Reaction Zone Length in a Detonating High Explosive, *The Journal of Chemical Physics*, **23**(7):1268, **1955**.



- [20] H. Eyring, R. E. Powell, G. H. Duffy a R. B. Parlin, The Stability of Detonation., *Chemical Reviews*, **45**(1):69, **1949**.
- [21] W. W. Wood a J. G. Kirkwood, Diameter effect in condensed explosives. The relation between velocity and radius of curvature of the detonation wave, *The Journal of Chemical Physics*, **22**(11):1920, **1954**.
- [22] T. D. Aslam, J. B. Bdzil a D. S. Stewart, Level set methods applied to modeling detonation shock dynamics, *Journal of Computational Physics*, **126**:390, **1996**.
- [23] J. B. Bdzil, T. D. Aslam, R. A. Catanach, L. G. Hill a M. Short, DSD front models: nonideal explosive detonation in ANFO, In *12th Symposium (International) on Detonation, San Diego, CA, USA*, **2002**.
- [24] E. Kabwe, Influence of air gap volume on achieving steady-state velocity of detonation, *Mining, Metallurgy & Exploration*, **36**(6):1179, **2019**.
- [25] M. Sućeska, Evaluation of detonation energy from EXPLO5 computer code results, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **24**(5):280, **1999**.
- [26] P. A. Urtiew a B. Hayes, Parametric study of the dynamic JWL-EOS for detonation products, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, **27**(4):505, **1991**.
- [27] M. Sućeska, Experimental determination of detonation velocity, *Fragblast*, **1**(3):261, **1997**.
- [28] M. A. Cook, R. L. Doran a G. J. Morris, Measurement of Detonation Velocity by Doppler Effect at Three-Centimeter Wavelength, *Journal of Applied Physics*, **26**(4):426, **1955**.
- [29] F. C. Gibson, *Electrical Method for the Continuous Measurement of Propagation Velocities in Explosives and Propellants*, svazek 6207, US Department of the Interior, Bureau of Mines, **1963**.
- [30] J. Taylor, *Detonation in condensed explosives*, Clarendon Press Oxford, **1952**.
- [31] P. V. A. Hemalal, P. G. R. Dharmaratne a P. I. Kumarage, Use of dynamites, water-gels and emulsion explosives in Sri Lankan quarrying/mining practice, *The Institution of Engineers: Colombo*, **2015**.
- [32] E. M. Chan, V. Lee, S. P. Mickan a P. J. Davies, Low-cost optoelectronic devices to measure velocity of detonation, In *Smart Structures, Devices, and Systems II*, svazek 5649, s. 586–594, SPIE, **2005**.
- [33] J Benterou, CV Bennett, G Cole, DE Hare, C May a E Udd, Internal detonation velocity measurements inside high explosives, Výzkumná zpráva, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), **2009**.
- [34] G. O. Nevstad, Introduction to ionization pin probes to measure detonation velocity, Výzkumná zpráva, Forsvarets forskningsinstitutt, Horten, Norway, **2015**.
- [35] M. Sućeska, *Test methods for explosives*, Springer Science + Business Media, **1995**.
- [36] C. H. Johansson, Apparent Intermediate Supervelocity of Detonation, *Nature*, **190**(4777):709, **1961**.
- [37] OZM Research s.r.o., Method of measuring and evaluating characteristic of explosion-generated sequential optical signals, patent CZ 305407, **2015**.

- [38] W. C. Prinse, B. J. Van der Meer, J. H. G. Scholtes, L. K. Cheng, C. Smorenburg, J. L. M. J. van Bree a R. Bouma, Development of fiber optic sensors at TNO for explosion and shock wave measurements, In *24th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*, svazek 4183, s. 748–758, SPIE, **2001**.
- [39] J. Pachman, M. Künzel, K. Kubát, J. Šelešovský, R. Marsalek, M. Pospisil, M. Kubicek a A. Prokes, OPTIMEX: measurement of detonation velocity with a passive optical fibre system, *Central European Journal of Energetic Materials*, volume 14, issue: 1, **2017**.
- [40] V. A. Kuznetsov a S. P. Bennetts, Development of Photon Doppler Velocimeter for Explosives Research, Výzkumná zpráva, DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION EDINBURGH (AUSTRALIA) WEAPONS . . . , **2013**.
- [41] Y. Barbarin, A. Lefrançois, V. Chuzeville, S. Magne, L. Jacquet, T. Elia, K. Woirin, C. Collet, A. Osmont a J. Luc, Development of a Shock and Detonation Velocity Measurement System Using Chirped Fiber Bragg Gratings, *Sensors*, **20**(4):1026, **2020**.
- [42] P. D. Sargis, N. E. Molau, D. Sweider, M. E. Lowry a O. T. Strand, Photonic doppler velocimetry, *United States*, s. 1–6, **1999**.
- [43] D. E. Hare, R. G. Garza, O. T. Strand, T. L. Whitworth a D. B. Holtkamp, Embedded Fiber Optic Probes to Measure Detonation Velocities Using the PDV, **2010**.
- [44] V. M. Bel'skii, A. L. Mikhailov, A. V. Rodionov a A. A. Sedov, Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **47**(6):639, **2011**.
- [45] MA Cook, RT Keyes a WO Ursenbach, Measurements of detonation pressure, *Journal of Applied Physics*, **33**(12):3413, **1962**.
- [46] C. H. Braithwaite, *High strain rate properties of geological materials*, Disertační práce, University of Cambridge, **2009**.
- [47] Z. Rosenberg, D. Yaziv a Y. Partom, Calibration of foil-like manganin gauges in planar shock wave experiments, *Journal of Applied Physics*, **51**(7):3702, **1980**.
- [48] Y. Oved, G. E. Luttwak a Z. Rosenberg, Shock wave propagation in layered composites, *Journal of Composite Materials*, **12**(1):84, **1978**.
- [49] W. E. Deal, Measurement of Chapman-Jouguet pressure for explosives, *The Journal of Chemical Physics*, **27**(3):796, **1957**.
- [50] J. W. Kury, H. C. Hornig, E. L. Lee, J. L. McDonnel, D. L. Ornellas, M. Finger, F. M. Strange a M. L. Wilkins, Metal acceleration by chemical explosives, In *fourth symposium (International) on Detonation*, s. 3–13, US Government Printing Office Washington, DC, **1965**.
- [51] W. R. Maines, D. E. Kittell a M. L. Hobbs, Combined Mini-Cylex & Disk Acceleration Tests in Type K Copper, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **43**(5):506, **2018**.
- [52] K. T. Lorenz, E. L. Lee a R. Chambers, A simple and rapid evaluation of explosive performance—The disc acceleration experiment, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **40**(1):95, **2015**.
- [53] C. M. Tarver, R. D. Breithaupt a J. W. Kury, Detonation waves in pentaerythritol tetranitrate, *Journal of applied physics*, **81**(11):7193, **1997**.
- [54] M. Chaos, E. L. Lee a K. T. Lorenz, Experimental Determination of Chapman-Jouguet Pressure Using Disc Acceleration eXperiment (DAX) Data, Výzkumná zpráva, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), **2018**.

- [55] P. W. Cooper, *Explosives engineering*, John Wiley & Sons, **2018**.
- [56] E. I. Zababakhin, *Some problems of the gasdynamics of explosions*, RFNC-VNIITF, **2001**.
- [57] B. Hayes, Particle-velocity gauge system for nanosecond sampling rate of shock and detonation waves, *Review of Scientific Instruments*, **52**(4):594, **1981**.
- [58] Y. Kato a K. Murata, Measurements of Shock and Detonation Phenomena, In *Detonation Phenomena of Condensed Explosives*, s. 103–148, Springer, **2023**.
- [59] V. V. Sil'vestrov, S. A. Bordzilovskii, S. M. Karakhanov a A. V. Plastinin, Temperature of the detonation front of an emulsion explosive, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **51**(1):116, **2015**.
- [60] M. Künzel, J. Kucera a J. Pachman, OPTIMEX: First attempts in detonation temperature measurements, In *Proceedings of the 24th Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Czech Republic*, **2022**.
- [61] M. Wellons, The Stefan-Boltzmann Law, *Physics Department, The College of Wooster, Wooster, Ohio*, **44691**:25, **2007**.
- [62] M. F. Gogulya, A. Y. Dolgoborodov, M. A. Brazhnikov a G. Baudin, Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurements), In *Proc. of the 11th Symp.(Int.) on Detonation*, s. 979–988, **1998**.
- [63] O. J. Morley, *Optical spectroscopy of HMX reaction regimes*, Disertační práce, University of Cambridge, **2021**.
- [64] S. Poef, *Équations d'état des produits de détonation des explosifs solides*, Disertační práce, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, **2018**.
- [65] A. Miyake, Y. Ohtagaki, T. Abe, Y. Wada, Y. Nakayama a T. Ogawa, Experimental determination of the detonation front curvature of non-ideal explosive ANFO, In *Materials Science Forum*, svazek 465, s. 181–184, Trans Tech Publ, **2004**.
- [66] R. A. Catanach a L. G. Hill, Diameter effect curve and detonation front curvature measurements for ANFO, In *AIP Conference Proceedings*, svazek 620, s. 906–909, American Institute of Physics, **2002**.
- [67] H. Dorsett a M. D. Cliff, Detonation front curvature measurements and aquarium tests of tritonal variants, Výzkumná zpráva, DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION EDINBURGH (AUSTRALIA) WEAPONS . . . , **2003**.
- [68] J. Pachman, M. Künzel, K. Kubát, J. Šelešovský, R. Maršálek, M. Pospíšil, M. Kubíček a A. Prokeš, OPTIMEX: measurement of detonation front curvature with a passive fiber optical system, *Central European Journal of Energetic Materials*, volume 13, issue: 4, **2016**.
- [69] K. Kubát, *Generátory rovinného čela rázové vlny*, Univerzita Pardubice, **2015**.
- [70] O. E. Petel, D. Mack, A. J. Higgins, R. Turcotte a S. K. Chan, Minimum propagation diameter and thickness of high explosives, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **20**(4-6):578, **2007**.
- [71] I. Jaffe a D. Price, Determination of the critical diameter of explosive materials, *ARS Journal*, **32**(7):1060, **1962**.
- [72] H. Badners a C. Leiber, Method for the determination of the critical diameter of high velocity detonation by conical geometry, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **17**(2):77, **1992**.

- [73] A. B. Amster, P. A. Kendall, L. J. Veillette a B. Harrell, Continuous oscillographic method for measuring the velocity and conductivity of stable and transient shocks in solid cast explosives, *Review of Scientific Instruments*, **31**(2):188, **1960**.
- [74] R. Engelke, Effect of the number density of heterogeneities on the critical diameter of condensed explosives, *The Physics of fluids*, **26**(9):2420, **1983**.
- [75] V. V. Sil'vestrov, A. V. Plastinin, S. M. Karakhanov a V. V. Zykov, Critical diameter and critical thickness of an emulsion explosive, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **44**(3):354, **2008**.
- [76] A. S. Tappan, C. D. Yarrington a R. Knepper, Detonation corner turning in vapor-deposited explosives using the micromushroom test, In *AIP Conference Proceedings*, svazek 1979, s. 100041, AIP Publishing LLC, **2018**.
- [77] M. Short a J. J. Quirk, High explosive detonation–confiner interactions, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **50**:215, **2018**.
- [78] R. Knepper, M. P. Marquez a A. S. Tappan, Effects of confinement on the detonation behavior of vapor-deposited hexanitrostilbene (HNS) films., Výzkumná zpráva, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), **2018**.
- [79] L. G. Hill a T. D. Aslam, The LANL Detonation-Confinement Test: Prototype Development and Sample Results, In *AIP Conference Proceedings*, svazek 706, s. 847–850, American Institute of Physics, **2004**.
- [80] S. I. Jackson, An analytic method for two-dimensional wall motion and product isentrope from the detonation cylinder test, *Proceedings of the Combustion Institute*, **35**(2):1997, **2015**.
- [81] L. G. Hill, Detonation product equation-of-state directly from the cylinder test, Výzkumná zpráva, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), **1997**.
- [82] N. E. Hoskin, J. W. S. Allan, W. A. Bailey, J. W. Lethaby a I. C. Skidmore, The motion of plates and cylinders driven by detonation waves at tangential incidence, In *4th International Symposium on Detonation*, s. 14–26, **1965**.
- [83] S. Goldstein a J. N. Johnson, Aquarium tests on aluminized ANFO, Výzkumná zpráva, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), **1981**.
- [84] M. H. Keshavarz, Y. H. Abadi, K. Esmailpour, S. Damiri a M. Oftadeh, Assessment of the effect of N-oxide group in a new high-performance energetic tetrazine derivative on its physicochemical and thermodynamic properties, sensitivity, and combustion and detonation performance, *Chemistry of Heterocyclic Compounds*, **53**(6):797, **2017**.
- [85] J. Köhler, R. Meyer a A. Homburg, *Explosives*, John Wiley & Sons, **2008**.
- [86] H. Ahrens, La Commission Européenne de Normalisation des Essais d'Explosifs (changé depuis 1976: Groupe d'Etude International pour la Normalisation des Essais d'Explosifs), *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, **2**(1-2):5, **1977**.
- [87] W. O. Snelling a C. Hall, *The effect of stemming on the efficiency of explosives*, svazek 17, US Government Printing Office, **1928**.
- [88] W. E. Gordon, F. E. Reed a B. A. Lepper, Lead-block test for explosives, *Industrial & Engineering Chemistry*, **47**(9):1794, **1955**.
- [89] J. Taylor a J. H. Cook, Improved Operation of the Ballistic Mortar for Determining the Power of High Explosives, *Journal of scientific instruments*, **26**(8):266, **1949**.

- [90] W. Taylor a G. Morris, The absolute measurement of the available energy of high explosives by the ballistic mortar, *Transactions of the Faraday Society*, **28**:545, **1932**.
- [91] S. Cudzilo, P. Kohlicek, V. A. Trzcinski a S. Zeman, Performance of emulsion explosives, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, **38**:463, **2002**.
- [92] M. E. Brown a P. K. Gallagher, *Handbook of thermal analysis and calorimetry: recent advances, techniques and applications*, Elsevier, **2011**.
- [93] M. V. Roux a M. Temprado, Thermochemistry, *Handbook of thermal analysis and calorimetry. Recent advances, techniques and applications*, **5**:539, **2011**.
- [94] O. Němec, T. Musil a M. Künzel, The Effect of Detonator Shell Materials on Detonation Calorimetry Results, *Central European Journal of Energetic Materials*, **17**(4), **2020**.
- [95] D. L. Ornellas, J. H. Carpenter a S. R. Gunn, Detonation calorimeter and results obtained with pentaerythritol tetranitrate (PETN), *Review of Scientific Instruments*, **37**(7):907, **1966**.
- [96] Y. Tongchang, Y. Menchao a W. Jianling, Determination of heats of detonation and influence of components of composite explosives on heats of detonation of high explosives, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **44**(6):1347, **1995**.
- [97] OZM Research, *OPTIMEX 64*, OZM Research s.r.o., URL <https://www.ozm.cz/explosives-performance-tests/optical-analyzer-of-explosive-processes-optimex64/>.
- [98] OZM Research, *TSV Series*, OZM Research s.r.o., URL [https://www.ozm.cz/gun-propellants-ballistics-tests/closed-vessels-tsv-series/?fbclid=IwAR00bQgyNF0vRVbad35dt\\_YcjsEm\\_gFSFsR9ruwf\\_su462a9VEJv8Aw4S2E](https://www.ozm.cz/gun-propellants-ballistics-tests/closed-vessels-tsv-series/?fbclid=IwAR00bQgyNF0vRVbad35dt_YcjsEm_gFSFsR9ruwf_su462a9VEJv8Aw4S2E).
- [99] ČSN ISO 1928 (441352) *Uhlí a koks - Stanovení spalného tepla*, Norma, International Organization for Standardization, Geneva, CH, **2021**.
- [100] MIL STD 286C w/change 2 *PROPELLANTS, SOLID: SAMPLING, EXAMINATION AND TESTING-(Method 802.1)-HEAT OF EXPLOSION (COMBUSTION) (ADIABATIC CALORIMETER METHOD)*, Standard, Picatinny Arsenal, NJ, New Jersey, USA, **2010**.
- [101] R. S. Jessup, Heat of formation of benzoic acid, with special reference to the standardization of bomb calorimeters, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, **29**:247, **1942**.
- [102] Institut für Chemische Technologie (ICT), ICT database of thermochemical values. Version 7.0 (2004), **2004**.
- [103] J. Majzlík a J. Zigmund, *Měření parametrů rovinných vysokotlakých dynamických dějů*, VÚPCH, **1994**.
- [104] A. B. Anderson, M. J. Ginsberg, W. L. Seitz a J. Wackerle, Shock initiation of porous TATB, Výzkumná zpráva, Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), **1981**.
- [105] D. Choudhuri a Y. M. Gupta, Shock compression and unloading response of 1050 aluminum to 70 GPA, In *AIP Conference Proceedings*, svazek 1426, s. 755–758, American Institute of Physics, **2012**.
- [106] J Pachman, M Künzel, O Němec a J Majzlík, A comparison of methods for detonation pressure measurement, *Shock Waves*, **28**(2):217, **2018**.

# **Přílohy**

## Příloha A

# Skript pro Octave

V této příloze je skript pro program Octave pro vyhodnocení cylinder testu a obrázek výsledného grafu porovnání dat získaných z kamery s PDV daty.

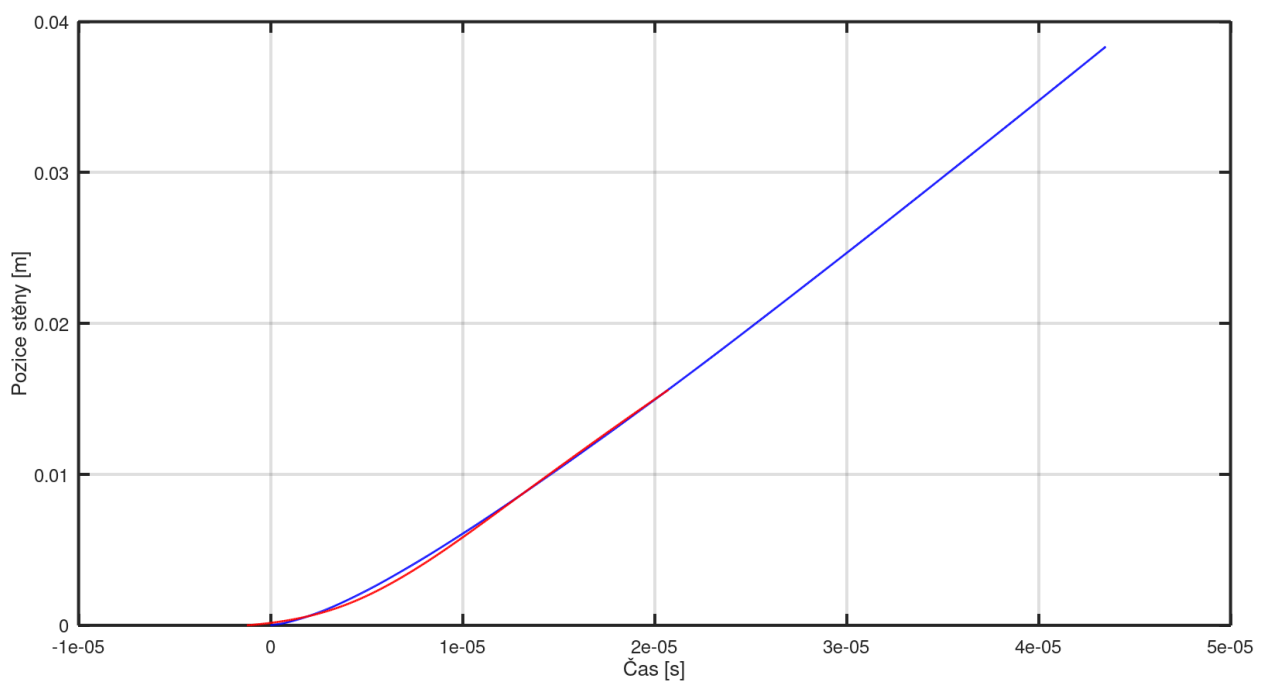
```
1 clear all
2 %Na zacatek je potreba definovat rozliseni osy x a osy y
3 prompt = {"X_axis_Pixel_To_meters","Y_axis_Pixel_To_seconds"};
4 defaults = {0.0003,0.00000006};
5 INPUT = inputdlg(prompt, "Input Info",1, defaults);
6 m = cellfun(@str2num,INPUT);
7 pix_x = m(1,1);
8 pix_y = m(2,1);
9 %nahrani upraveného snimku
10 pkg load image
11 [fname, fpath, fltidx] = uigetfile ();
12 im = imread(fname);
13 l = length(im(:,1));
14 %vyhlazeni snimku
15 ima = im2double(im);
16 Z = [0 -1 0;-1 5 -1;0 -1 0];
17 imagf = imfilter( ima, Z, 'same', 'conv', 'symmetric');
18 bw = im2bw(imagf);
19 %Prevraceni hodnot 0 a 1 v bitmape snimku
20 imrev = 1- bw;
21 %nacteni dat z PDV (csv upraveno-pouze data)
22 [fname2, fpath2, fltidx2] = uigetfile ();
23 PDV = csvread(fname2);
24 %integrace hodnot
25 PDVI = cumtrapz(PDV(:,1),PDV(:,2));
26 %prazdna matice pro zapis dat z loopu
27 B = [];
28 %loop
29 for i = 1:l;
30
31     v = imrev(i,:);
32
33     idxf = find(v,1,"first"); %nalezeni prvnio a posledniho cisla 1, reprezentujici
        plochu zastinenou trubkou
34     idxl = find(v,1,"last");
35
36     B = [B;[i idxf idxl]]; %vytvori matici kde prvni sloupec je souradnice pixelu a
        dalsi jsou souradnice prvni a poslednich cisel 1
37
38 endfor;
39 %je potreba prohodit poradi pixelu zeshora dolu
40 C = [flip([B(:,1)]) B(:,2)]];
41 %fitnuti polynomu pres surova data
42 breaks = linspace(0,l,5);
43 sp = splinefit(C(:,1),C(:,2),breaks);
44 y = ppval(sp,C(:,1));
```

```

45 %prepocitani pixelu na vzdalenost
46 D = [C(:,1), y*pix_x];
47 %prepocitani prvniho sloupce matrice pro cas a prevraceni druheho sloupce do kladnych
    hodnot
48 E = [D(:,1)*pix_y, D(:,2)*-1];
49 %vyrovnnani hodnot y na nulu pomoci odedcteni prumeru prvnych 85 hodnot
50 prm = mean(E(1-85:1,2));
51 F = [E(:,1), E(:,2)-prn];
52 %odstraneni casti rovne trubky pomoci
53 %udelani rovne linie 0,5% prumnerne hodnoty souradnice y nad trubkou, po tom co se
    zacne stena zvedat tak, ze tuto linii protne
54 %tam se usekne zaznam a pouzije se jen expandujici cast
55 if prn<0;
56     corr = prn-0.005*prn;
57 else corr = prn+0.005*prn;
58     end;
59
60 val_matrix = corr * ones (1, 1);
61 ln_fn = [E(:,1), val_matrix];
62 substr = [E(:,1),E(:,2)-val_matrix];
63 zlom = find(substr(:,2)<0.0000001,1,"first");
64 %matice pro prolozena data z obrazku
65 G = [F(1:zlom,1)-F(zlom,1), F(1:zlom,2)-F(zlom,2)];
66 %matice pro surova data z obrazku
67 H = [F(1:zlom,1)-F(zlom,1), C(1:zlom,2)*-pix_x-prn];
68 %Otoceni poradí v matici G (indexy byly od konce místo od začátku)
69 Gf = [flip([G(:,1)]) flip([G(:,2)]) ];
70 %lineární proložení PDV
71 PDVpos = [PDV(:,1)-PDV(1,1),PDVI(:,1)];
72 Gfp = [Gf(:,1),Gf(:,2)];
73 %definice délky matice Gfp
74 Gfpl = length(Gfp(:,1));
75 %Rychlost udána směrnicí pro data z kamery, úplně na konci zaznamu, posledních 30
    bodu;
76 P = polyfit(Gfp(Gfpl-30:Gfpl,1),Gfp(Gfpl-30:Gfpl,2),1)
77 X = linspace(min(Gfp(Gfpl-30,1)),max(Gfp(Gfpl,1)));
78 fP = P(1)*X+P(2);
79 comy = (Gfp(end,2));
80 %Posunutí dat z kamery aby časově sedely s PDV
81 PDVx = find(PDVpos(:,2)>comy,1,"first");
82 I = [Gfp(:,1)-(Gfp(end,1)-(PDVpos(PDVx,1))), Gfp(:,2)];
83 %Rychlost udána směrnicí pro data z PDV, úplně na konci zaznamu, posledních 30 bodu;
84 Pp = polyfit(PDVpos(PDVx-30:PDVx,1),PDVpos(PDVx-30:PDVx,2),1)
85 Xp = linspace(min(PDVpos(PDVx-30,1)),max(PDVpos(PDVx,1)));
86 fPp = Pp(1)*Xp+Pp(2);
87 %Finalní graf
88 figure, plot(PDVpos(:,1),PDVpos(:,2),"linewidth",2,"b-", I(:,1),I(:,2),"linewidth",2,
    "r-")
89 xlabel ("Cas [s]");
90 ylabel ("Pozice steny [m]");
91 set(gca, "linewidth", 3, "fontsize", 24)

```





Obrázek A.1: Graf výsledku z Octave, pozice expandující stěny trubky získaná z kamery je znázorněna červenou křivkou a je porovnávána s daty získanými z PDV - modrou křivkou.

Příloha B

## **Výsledky z programu EXPLO 5 (verze 6.0.4.)**

```

REACTANT INFORMATION:
-----
1. TETRYL, 100 %
C(7,000) H(5,000) N(5,000) O(8,000)

Molecular weight = 287,14
Density of reactant = 0,9 g/cm3
Initial pressure = 0,1 MPa
Oxygen balance = -47,36037 %
Enthalpy of formation = 109,35 kJ/kg
Energy of formation = 187,05 kJ/kg

DETONATION PARAMETERS (at the C-J point) :
-----
Heat of detonation = -4063,011 kJ/kg
Detonation temperature = 3712,8 K
Detonation pressure = 6,90252 GPa
Detonation velocity = 5379,942 m/s
Particle velocity = 1425,546 m/s
Sound velocity = 3954,396 m/s
Density of products = 1,224447 g/cm3
Volume of products = 0,8166953 cm3/g
Exponent 'gamma' = 2,773911
Moles of gaseous products = 10,82119 mol/mol explosive
Moles of condensed products = 7,055295E-05 mol/mol explosive
Volume of gas at STP = 921,6454 dm3/kg
Mean molecular mass of gas, prod. = 26,5351 g/mol
Mean molecular mass of cond.prod. = 12,011 g/mol
Mean molecular mass of all prod. = 26,535 g/mol
Entropy of products = 7,8723 kJ/kg K
Internal energy of products = 5079,132 kJ/kg, i.e. 4,571218 kJ/cm3
Compression energy = 1016,12 kJ/kg, i.e. 0,9145082 kJ/cm3

CONCENTRATION OF DETONATION PRODUCTS :
(26 products considered)
-----
PRODUCT mol/mol exp. mol/kg expl. Mol % Mass %
-----
CO = 5,630982E+00 1,961044E+01 52,0363 54,9289
N2 = 2,351299E+00 8,188628E+00 21,7285 22,9388
H2O = 9,019979E-01 3,141295E+00 8,3354 5,6591
CO2 = 6,211405E-01 2,163182E+00 5,7400 9,5202
H2 = 5,764467E-01 2,007532E+00 5,3270 0,4047
CH4 = 1,611681E-01 5,612836E-01 1,4894 0,9005
HCN = 1,508953E-01 5,255075E-01 1,3944 1,4202
C2H4 = 1,404201E-01 4,890268E-01 1,2976 1,3718
NH3 = 1,130202E-01 3,936040E-01 1,0444 0,6703
CH2O2 = 9,184630E-02 3,198637E-01 0,8488 1,4722
HCNO = 3,041574E-02 1,059258E-01 0,2811 0,4558
H = 2,755359E-02 9,595806E-02 0,2546 0,0097
C2H6 = 1,159650E-02 4,038596E-02 0,1072 0,1214
CH3OH = 6,659806E-03 2,319342E-02 0,0615 0,0743
CH2O = 2,713702E-03 9,450731E-03 0,0251 0,0284

Excluded products (I9) :
C; C(Liq.1); C(Liq.2); C2; C3; CH;
CH2; CN2; H2O(l); HNO2; HNO3; HO2;
N2O3; NH; NO3; O; O2; O3;
OH;

EXPANSION ISENTROPE
-----
Heat of detonation (CJ point) = -3,6567 kJ/cm3 (-4,063 MJ/kg)
Total energy of detonation (1 bar, 298.15 K) = -3,5698 kJ/cm3 (-3,966 MJ/kg)
Mechanical energy of detonation (1 bar) = -3,5698 kJ/cm3 (-3,966 MJ/kg)
Thermal energy of detonation (Etot-Emech) = 0,0000 kJ/cm3 (0,0000 MJ/kg)
Heat of detonation [H2O(l) at 298.15 K]* = -3,6570 kJ/cm3 (-4,063 MJ/kg)
*calculated assuming the equilibrium composition of products is frozen
at T = 2250 K, and all products are in the standard state at 298.15 K
(e.g. H2O(l), Al2O2(s), etc.)
This value corresponds to the value determined by detonation calorimetry.

Results of JWL EOS fit:
-----
Note: Freezing occurred at T = 2250 K

JWL coefficients:
A = 135,763434 GPa
B = 2,610788 GPa
C = 0,904508 GPa
R1 = 4,667917
R2 = 1,146998
Omega = 0,358883

Correlation coefficient = 0,9999912

Detonation energy from the JWL EOS coefficients:
- Eo(V->*) = -3,816552 kJ/cm3 (-4,2406 MJ/kg)
- Eo(p=1 bar) = -3,589269 kJ/cm3 (-3,9881 MJ/kg)
- Eo(p=100 MPa) = -2,425825 kJ/cm3 (-2,6954 MJ/kg)

```

Obrázek B.1: Výsledkové okno z výpočtu detonáčích parametrů trhaviny tetryl o hustotě 0,9 g/cm<sup>3</sup> programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6.

```

REACTANT INFORMATION:
-----
1. TETRYL, 100 %
C(7,000) H(5,000) N(5,000) O(8,000)

Molecular weight = 287,14
Density of reactant = 1,0 g/cm3
Initial pressure = 0,1 MPa
Oxygen balance = -47,36037 %
Enthalpy of formation = 109,35 kJ/kg
Energy of formation = 187,05 kJ/kg

DETONATION PARAMETERS (at the C-J point) :
-----
Heat of detonation = -4276,212 kJ/kg
Detonation temperature = 3804,478 K
Detonation pressure = 8,938293 GPa
Detonation velocity = 5688,215 m/s
Particle velocity = 1571,353 m/s
Sound velocity = 4116,863 m/s
Density of products = 1,381687 g/cm3
Volume of products = 0,723753 cm3/g
Exponent 'gamma' = 2,619919
Moles of gaseous products = 10,30291 mol/mol explosive
Moles of condensed products = 0,5360667 mol/mol explosive
Volume of gas at STP = 877,5033 dm3/kg
Mean molecular mass of gas. prod. = 27,24509 g/mol
Mean molecular mass of cond.prod. = 12,011 g/mol
Mean molecular mass of all prod. = 26,49166 g/mol
Entropy of products = 7,7354 kJ/kg K
Internal energy of products = 5510,814 kJ/kg, i.e. 5,510815 kJ/cm3
Compression energy = 1234,602 kJ/kg, i.e. 1,234602 kJ/cm3

EXPANSION ISENTROPE
-----
Heat of detonation (CJ point) = -4,2762 kJ/cm3 (-4,276 MJ/kg)
Total energy of detonation (1 bar, 298.15 K) = -4,0415 kJ/cm3 (-4,042 MJ/kg)
Mechanical energy of detonation (1 bar) = -4,0415 kJ/cm3 (-4,042 MJ/kg)
Thermal energy of detonation (Etot-Emech) = 0,0000 kJ/cm3 (0,0000 MJ/kg)
Heat of detonation [H2O(l) at 298.15 K]* = -4,1393 kJ/cm3 (-4,139 MJ/kg)
*calculated assuming the equilibrium composition of products is frozen
at T = 2250 K, and all products are in the standard state at 298.15 K
(e.g. H2O(l), Al2O2(s), etc.)
This value corresponds to the value determined by detonation calorimetry.

Results of JWL EOS fit:
-----
Note: Freezing occurred at T = 2250 K

JWL coefficients:
A = 150,802332 GPa
B = 2,93159 GPa
C = 0,944554 GPa
R1 = 4,421138
R2 = 1,105486
Omega = 0,357557
Correlation coefficient = 0,9999934

Detonation energy from the JWL EOS coefficients:
- Eo(V->*) = -4,310368 kJ/cm3 (-4,3104 MJ/kg)
- Eo(p=1 bar) = -4,073298 kJ/cm3 (-4,0733 MJ/kg)
- Eo(p=100 MPa) = -2,869313 kJ/cm3 (-2,8693 MJ/kg)

CONCENTRATION OF DETONATION PRODUCTS :
(26 products considered)
-----
PRODUCT mol/mol exp. mol/kg expl. Mol % Mass %
CO = 4,880362E+00 1,699633E+01 45,0260 47,6067
N2 = 2,364382E+00 8,234192E+00 21,8137 23,0664
H2O = 1,067780E+00 3,718648E+00 9,8513 6,6993
CO2 = 8,272271E-01 2,880899E+00 7,6320 12,6788
C(BF) = 5,360667E-01 1,866905E+00 4,9457 2,2423
H2 = 4,004602E-01 1,394642E+00 3,6946 0,2812
CH2O2 = 1,749798E-01 6,093842E-01 1,6144 2,8047
C2H4 = 1,371492E-01 4,776356E-01 1,2653 1,3399
CH4 = 1,300353E-01 4,528607E-01 1,1997 0,7265
NH3 = 1,219182E-01 4,245920E-01 1,1248 0,7231
HCN = 1,098707E-01 3,826354E-01 1,0137 1,0341
HCNO = 3,551311E-02 1,236779E-01 0,3276 0,5321
H = 2,860816E-02 9,963070E-02 0,2639 0,0100
C2H6 = 1,081784E-02 3,767418E-02 0,0998 0,1133

```

Obrázek B.2: Výsledkové okno z výpočtu detonáčních parametrů trhaviny tetryl o hustotě 1,0 g/cm<sup>3</sup> programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6.

REACTANT INFORMATION:  
 -----  
 1. TETRYL, 100 %  
 C(7,000) H(5,000) N(5,000) O(8,000)  
 Molecular weight = 287,14  
 Density of reactant = 1,1 g/cm3  
 Initial pressure = 0,1 MPa  
 Oxygen balance = -47,36037 %  
 Enthalpy of formation = 109,35 kJ/kg  
 Energy of formation = 187,05 kJ/kg

DETONATION PARAMETERS (at the C-J point):  
 -----  
 Heat of detonation = -4505,139 kJ/kg  
 Detonation temperature = 3864,441 K  
 Detonation pressure = 10,75715 GPa  
 Detonation velocity = 5955,721 m/s  
 Particle velocity = 1641,974 m/s  
 Sound velocity = 4313,747 m/s  
 Density of products = 1,518701 g/cm3  
 Volume of products = 0,6584573 cm3/g  
 Exponent 'gamma' = 2,627147  
 Moles of gaseous products = 9,771566 mol/mol explosive  
 Moles of condensed products = 1,185173 mol/mol explosive  
 Volume of gas at STP = 832,2482 dm3/kg  
 Mean molecular mass of gas. prod. = 27,92876 g/mol  
 Mean molecular mass of cond.prod. = 12,011 g/mol  
 Mean molecular mass of all prod. = 26,20697 g/mol  
 Entropy of products = 7,5981 kJ/kg K  
 Internal energy of products = 5853,203 kJ/kg, i.e. 6,438524 kJ/cm3  
 Compression energy = 1348,065 kJ/kg, i.e. 1,482871 kJ/cm3

CONCENTRATION OF DETONATION PRODUCTS:  
 (26 products considered)  
 -----  

PRODUCT	mol/mol exp.	mol/kg expl.	Mol %	Mass %
CO =	4,056820E+00	1,412827E+01	37,0258	39,5733
N2 =	2,379625E+00	8,287276E+00	21,7184	23,2151
H2O =	1,249183E+00	4,350400E+00	11,4010	7,8374
C(gr) =	1,185173E+00	4,127480E+00	10,8168	4,9575
CO2 =	1,042661E+00	3,631170E+00	9,5162	15,9808
H2 =	2,822629E-01	9,830081E-01	2,5762	0,1982
CH2O2 =	2,793457E-01	9,728486E-01	2,5495	4,4775
NH3 =	1,230399E-01	4,284984E-01	1,1230	0,7298
C2H4 =	1,025783E-01	3,572388E-01	0,9362	1,0021
CH4 =	9,257004E-02	3,223842E-01	0,8449	0,5172
HCN =	7,570271E-02	2,636421E-01	0,6909	0,7125
HCNO =	3,711933E-02	1,292717E-01	0,3388	0,5562
H =	2,819916E-02	9,820634E-02	0,2574	0,0099
CH3OH =	8,985220E-03	3,129190E-02	0,0820	0,1003

Obrázek B.3: Výsledkové okno z výpočtu detonálních parametrů trhaviny tetryl o hustotě 1,1 g/cm<sup>3</sup> programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6.

```

REACTANT INFORMATION:
-----
1. Hexogen (RDX), 95 %
2. Wax, 5 %
C(3,431) H(6,877) N(5,372) O(5,372)

Molecular weight = 209,34
Density of reactant = 1,66 g/cm3
Initial pressure = 0,1 MPa
Oxygen balance = -37,67002 %
Enthalpy of formation = 236,82 kJ/kg
Energy of formation = 341,14 kJ/kg

DETONATION PARAMETERS (at the C-J point) :
-----
Heat of detonation = -5475,625 kJ/kg
Detonation temperature = 3500,871 K
Detonation pressure = 26,62092 GPa
Detonation velocity = 8084,933 m/s
Particle velocity = 1983,521 m/s
Sound velocity = 6101,412 m/s
Density of products = 2,199653 g/cm3
Volume of products = 0,4546172 cm3/g
Exponent 'gamma' = 3,076039
Moles of gaseous products = 6,635874 mol/mol explosive
Moles of condensed products = 1,66714 mol/mol explosive
Volume of gas at STP = 775,2343 dm3/kg
Mean molecular mass of gas. prod. = 28,52854 g/mol
Mean molecular mass of cond.prod. = 12,011 g/mol
Mean molecular mass of all prod. = 25,21203 g/mol
Entropy of products = 7,4811 kJ/kg K
Internal energy of products = 7442,817 kJ/kg, i.e. 12,35508 kJ/cm3
Compression energy = 1967,193 kJ/kg, i.e. 3,26554 kJ/cm3

NO = 3,009993E-03 1,437854E-02 0,0363 0,0431
HCN = 8,596103E-04 4,106304E-03 0,0104 0,0111
C2H6 = 6,630361E-04 3,167281E-03 0,0080 0,0095
N = 2,984268E-04 1,425566E-03 0,0036 0,0020
NH2 = 2,504711E-04 1,196485E-03 0,0030 0,0019
NH4 = 1,111425E-04 5,309205E-04 0,0013 0,0017
N2O = 1,154051E-05 3,417445E-04 0,0009 0,0015
H2O2 = 1,730335E-06 8,265699E-06 0,0000 0,0000
HNO = 9,385729E-07 4,483503E-06 0,0000 0,0000
CNO = 7,530585E-07 3,597313E-06 0,0000 0,0000
CH2O = 6,513544E-07 3,111478E-06 0,0000 0,0000
C(Gr) = 1,415193E-07 6,760285E-07 0,0000 0,0000
NO2 = 9,341216E-08 4,462239E-07 0,0000 0,0000
CN2 = 2,456859E-09 8,295716E-09 0,0000 0,0000
C(Gr) = 0,000000E+00 0,000000E+00 0,0000 0,0000

Excluded products (19) :
C; C(Liq.1); C(Liq.2); C2; C3; CH;
CH2; CN2; H2O(1); HNO2; HNO3; H2O2;
N2O3; NH; NO3; O; O2; O3;
OH;
-----

EXPANSION ISENTROPE
-----
Heat of detonation (CJ point) = -9,0895 kJ/cm3 (-5,476 MJ/kg)
Total energy of detonation (1 bar, 298,15 K) = -8,8530 kJ/cm3 (-5,333 MJ/kg)
Mechanical energy of detonation (1 bar) = -8,8530 kJ/cm3 (-5,333 MJ/kg)
Thermal energy of detonation (Etot-Emech) = 0,0000 kJ/cm3 (0,0000 MJ/kg)
Heat of detonation [H2O(1) at 298,15 K]* = -9,3608 kJ/cm3 (-5,639 MJ/kg)
*Calculated assuming the equilibrium composition of products is frozen
at T = 2250 K, and all products are in the standard state at 298,15 K
(e.g. H2O(1), Al2O3(s), et.c)
This value corresponds to the value determined by detonation calorimetry.

Results of JWL EOS fit:
-----
Note: Freezing occurred at T = 2250 K

JWL coefficients:
A = 760,540331 GPa
B = 25,512367 GPa
C = 1,156481 GPa
R1 = 5,053536
R2 = 1,52266
Omega = 0,323646

Correlation coefficient = 0,9999678

Detonation energy from the JWL EOS coefficients:
- Eo(V->oo) = -9,285948 kJ/cm3 (-5,5939 MJ/kg)
- Eo(p=1 bar) = -8,923215 kJ/cm3 (-5,3754 MJ/kg)
- Eo(p=100 MPa) = -7,329847 kJ/cm3 (-4,4156 MJ/kg)

```

Obrázek B.4: Výsledkové okno z výpočtu detonačních parametrů trhaviny A-IX-1 programem EXPLO 5 (verze 6.0.4.). Pro výpočet byla použita stavová rovnice EXP-6.

```

Combustion condition:
-----
Isochoric combustion (V=const.)
Loading density = 0,010 g/cm3
Equation of state of gas = Virial EOS
Reactant information:
-----
1. Octogen (HMX), 100 %

Formula: C(4,000) H(8,000) N(8,000) O(8,000)

Molecular weight = 296,16
Density of explosive = 1,905 g/cm3
Oxygen balance = -21,60859 %
Enthalpy of formation = 252,55 kJ/kg
Energy of formation = 352,99 kJ/kg

Thermodynamic parameters of combustion products at combustion temperature:
-----
- Adiabatic combustion temperature = 3698,4 K
- Heat of isochoric combustion = -4373,92 kJ/kg
- Heat of isochoric combustion [H2O(l)] = -4733,65 kJ/kg
- Enthalpy of products (ballistic energy) = 5565,52 kJ/kg
- Maximum pressure in closed vessel = 13,096 MPa
- Force on 'specific energy' (F = nRT) = 1,29665 MJ/kg
- Covolume of gaseous products = 0,986 cm3/g
- Compressibility factor = 1,010
- Total mol number of gaseous products = 42,169 mol/kg explosive
- Volume of gaseous products (at SATP) = 1045,34 L/kg explosive
- Mass of gaseous products = 1000,0 g/kg explosive
- Mass of condensed products = 0,0 g/kg explosive
- Density of gaseous products = 0,010 g/cm3
- Density of condensed products = 0,000 g/cm3
- Mean molecular mass of gaseous prod. = 23,713 g
- Mean molecular mass of all products = 23,713 g
- Specific gas constant = 350,596 J/kg K
- Specific heat capacity at p=const. (Cp) = 1814,91 J/kg K
- Specific heat capacity at V=const. (Cv) = 1464,34 J/kg K
- Specific heat ratio (Cp/Cv) = 1,2394

CONCENTRATION OF COMBUSTION PRODUCTS :
-----
PRODUCT mol/mol expl. mol/kg expl. Mol % Mass %
N2 = 3,945025E+00 1,332059E+01 31,5883 37,3150
CO = 3,180268E+00 1,073834E+01 25,4648 30,0781
H2O = 2,563510E+00 8,655827E+00 20,5263 15,5937
H2 = 1,110150E+00 3,748481E+00 8,8891 0,7557
CO2 = 8,196045E-01 2,767438E+00 6,5627 12,1795
OH = 3,411737E-01 1,151991E+00 2,7318 1,9592
H = 3,099540E-01 1,046576E+00 2,4818 0,1055
NO = 1,090542E-01 3,682272E-01 0,8732 1,1049
O2 = 5,658439E-02 1,910602E-01 0,4531 0,6114
O = 5,201262E-02 1,756234E-01 0,4165 0,2810
HO2 = 5,658575E-04 1,910648E-03 0,0045 0,0063

Combustion condition:
-----
N = 3,223329E-04 1,088374E-03 0,0026 0,0015
HNO = 1,646253E-04 5,558660E-04 0,0013 0,0017
NH3 = 1,386324E-04 4,680996E-04 0,0011 0,0008
NH = 1,146517E-04 3,871276E-04 0,0009 0,0006
H2O2 = 6,848346E-05 3,312380E-04 0,0005 0,0008
HCN = 6,299790E-05 2,127158E-04 0,0005 0,0006
NO2 = 5,121808E-05 1,729406E-04 0,0004 0,0004
CH2O = 2,801912E-05 9,460804E-05 0,0002 0,0003
HCNO = 2,753503E-05 9,297349E-05 0,0002 0,0004
CNO = 4,9121165E-06 1,658619E-05 0,0000 0,0001
CH2 = 7,247095E-08 2,447020E-07 0,0000 0,0000
CH = 3,945653E-08 1,332277E-07 0,0000 0,0000
CH4 = 2,241090E-08 7,567161E-08 0,0000 0,0000
CN2 = 2,456859E-09 8,295716E-09 0,0000 0,0000
C(Gr) = 0,000000E+00 0,000000E+00 0,0000 0,0000

Excluded products(19):
-----
C; C(d); C(Liq.1); C(Liq.2); C2; C2H4;
C2H6; C3; CH2O2; CH3OH; H2O(l); HNO2;
HNO3; N2H4; N2O; N2O3; NH2; NO3;
O3;

ISOCHORIC COOLING:
-----
Freeze-out temperature = 1500, K

T, K P, MPa Qv, kJ/kg F, MJ/kg Z ng, mol/kg R, J/kgK Cp/Cv
3698,41 13,10 -4373,9 1,297 1,010 42,17 350,60 1,239
3358,37 11,62 -4895,3 1,150 1,010 41,20 342,51 1,235
3018,33 10,33 -5141,1 1,022 1,010 40,75 338,75 1,235
2678,29 9,13 -5233,7 0,904 1,010 40,58 337,38 1,238
2338,25 7,96 -5267,0 0,788 1,010 40,53 336,97 1,244
1998,21 6,80 -5285,3 0,673 1,010 40,52 336,87 1,251
1658,17 5,64 -5307,2 0,559 1,009 40,52 336,85 1,261
1318,12 4,48 -5307,2 0,444 1,009 40,52 336,85 1,274
978,08 3,32 -5307,2 0,329 1,007 40,52 336,85 1,292
638,04 2,15 -5307,2 0,215 1,001 40,52 336,85 1,316
298,00 1,00 -5307,2 0,100 1,000 40,52 336,85 1,355

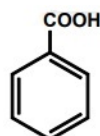
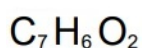
All products are taken to be their standard state (T=298.15, P=1 bar, STP):
298,15 0,79 -5671,5 0,079 1,000 31,75 263,97 1,256

```

Obrázek B.5: Výsledkové okno z výpočtu parametrů hoření trhaviny HMX programem EXPLO 5 (verze 6.0.4).

## Příloha C

# Kalorimetrické hodnoty z ICT databáze



Molecular weight: **122,123 g**  
Oxygen balance: **-196,52 %**  
Aggregation state: **Solid**  
Class:

Names:  
**BENZOIC ACID**  
**65-85-0**

Density:	<b>1,321 g/cm<sup>3</sup></b>	20° C	Source: 295
Density:	<b>1,266 g/cm<sup>3</sup></b>	(15° C)	Source: H
Melting point:	<b>122,4 ° C</b>		Source: H
Boiling point:	<b>249,2 ° C</b>		Source: H
Heat of combustion:	<b>771,32 kcal/Mol</b>		Source: C

Enthalpy of Formation:			
<b>-385,22 kJ/Mol</b>	<b>-92,07 kcal/Mol</b>	<b>-3154,37 kJ/kg</b>	Source: 2622
<b>-393,71 kJ/Mol</b>	<b>-94,10 kcal/Mol</b>	<b>-3223,92 kJ/kg</b>	Source: 15
<b>-384,89 kJ/Mol</b>	<b>-91,99 kcal/Mol</b>	<b>-3151,63 kJ/kg</b>	Source: C

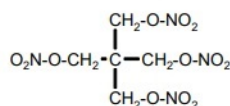
Energy of Formation:			
<b>-375,30 kJ/Mol</b>	<b>-89,70 kcal/Mol</b>		Source: 2622
<b>-383,80 kJ/Mol</b>	<b>-91,73 kcal/Mol</b>		Source: 15
<b>-374,97 kJ/Mol</b>	<b>-89,62 kcal/Mol</b>		Source: C

Sources:

- 295 Auer Technikum, Ausgabe 12, 1988  
Herausgeber: Auer-Gesellschaft GmbH, Thiemannstr.1, 12059 Berlin
- H R.C. Weast: CRC Handbook of Chemistry and Physics  
CRC Press, Inc., 65th Edition, 1984-1985  
resp. D.R. Lide: CRC Handbook of Chemistry and Physics  
CRC Press, Inc., 75th Edition, 1994-1995
- C J.D. Cox, G. Pilcher: Thermochemistry of Organic and  
Organometallic Compounds Academic Press, London, 1970
- 2622 J.P. Guthrie, D.C. Pike, Y.-C. Lee / Can. J. Chem., 1992, 70, 1671-1683
- 15 H.G. Münzberg: Flugantriebe  
Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1972

Obrázek C.1: Kalorimetrické hodnoty pro kyselinu benzoovou z ICT databáze [102].





Molecular weight: **316,138 g**  
Oxygen balance: **-10,12 %**  
Aggregation state: **Solid**  
Class: **Energetic fillers**

Names:

**PENTAERYTHRITOL TETRANITRATE**  
**NITROPENTA**  
**PENTRIT**  
**PETN**  
**78-11-5**

Density: **1,778 g/cm<sup>3</sup>** Source: 63  
Melting point: **142,9 ° C** Source: 63  
Boiling point: **180 ° C** Source: 236  
Boiling point: **148 ° C** Decomposition (DTA onset) Source: 3378  
Heat of combustion: **614,8 kcal/Mol** Source: C

Enthalpy of Formation:

<b>-538,90 kJ/Mol</b>	<b>-128,80 kcal/Mol</b>	<b>-1704,63 kJ/kg</b>	Source: C
<b>-532,20 kJ/Mol</b>	<b>-127,20 kcal/Mol</b>	<b>-1683,46 kJ/kg</b>	Source: STB
<b>-530,53 kJ/Mol</b>	<b>-126,80 kcal/Mol</b>	<b>-1678,16 kJ/kg</b>	Source: 121
<b>-506,39 kJ/Mol</b>	<b>-121,03 kcal/Mol</b>	<b>-1601,80 kJ/kg</b>	Source: 88
<b>-544,34 kJ/Mol</b>	<b>-130,10 kcal/Mol</b>	<b>-1721,84 kJ/kg</b>	Source: 549
<b>-540,15 kJ/Mol</b>	<b>-129,10 kcal/Mol</b>	<b>-1708,60 kJ/kg</b>	Source: 554
<b>-556,89 kJ/Mol</b>	<b>-133,10 kcal/Mol</b>	<b>-1761,54 kJ/kg</b>	Source: 1543

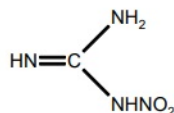
Energy of Formation:

<b>-509,19 kJ/Mol</b>	<b>-121,70 kcal/Mol</b>	Source: C
<b>-502,50 kJ/Mol</b>	<b>-120,10 kcal/Mol</b>	Source: STB
<b>-500,82 kJ/Mol</b>	<b>-119,70 kcal/Mol</b>	Source: 121
<b>-476,68 kJ/Mol</b>	<b>-113,93 kcal/Mol</b>	Source: 88
<b>-514,63 kJ/Mol</b>	<b>-123,00 kcal/Mol</b>	Source: 549
<b>-510,45 kJ/Mol</b>	<b>-122,00 kcal/Mol</b>	Source: 554
<b>-527,18 kJ/Mol</b>	<b>-126,00 kcal/Mol</b>	Source: 1543

Sources:

- 63 R. Weinheimer (Chairman, IPS Wall Chart Committee)  
Properties of Selected High Explosives  
Proceedings of the Eighteenth International Pyrotechnics Seminar  
13-17 July 1992, 939-972
- 236 R. Haas, J. Thieme  
Verdachtslandorte von Rüstungsalllasten in Deutschland  
Band 4, Teilvorhaben Explosivstofflexikon  
Texte 8/93, Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit/ Forschungsbericht 103 40 102
- 3378 Zeman, S./ Study of the impact reactivity of polynitro compounds. Part IV.  
Proceed. V.Seminar "New trends in research of energetic materials, Pardubice, 2002, p.434-443
- C J.D. Cox, G. Pilcher: Thermochemistry of Organic and  
Organometallic Compounds Academic Press, London, 1970
- STB D.R. Stull, E.F. Westrum, G.C. Sinke: The Chemical Thermodynamics  
of Organic Compounds John Wiley and Sons, Inc., 1969  
Classification of the Enthalpies of Formation:  
good value
- 121 J. Quinchon, J. Tranchant: Les poudres, propegols et explosifs  
Tome 2: Les nitrocelluloses et autres matieres de base des  
poudres et propegols/ Technique et documentation, Paris  
or: J. Quichon, J. Tranchant: Nitrocelluloses  
Ellis Horwood Limited
- 88 L. Stiefel, T.A. Doris, Jr.: Ingredient Effects on the  
Thermochemical Output of Small Arms Primers  
Journal of Ballistics, Vol. 8, Nr. 1, (1984)
- 549 R.L. Raun, A.G. Butcher  
Estimating Heat of Formation of Energetic Compounds Using Corrected Semiempirical Molecular Orbital Theory  
Joint Army Navy Air Force: Combustion Subcommittee Meeting; 31st, 1994, pp. 185-196
- 554 P. Marecek, P. Vavra;  
Simple Correlation of Some Parameters of CHNO(F) Explosives  
Proc. 28th Int. Conference of ICT, 1997
- 1543 L.M. Kostikova et al./ Efficient Energies of Interaction of Functional Groups and Energies of Dissociation Bonds in Alkyltrinitrates  
Proc. 32nd Intern. Annual Conference of ICT, 2001

Obrázek C.2: Kalorimetrické hodnoty pro pentaerythritol tetranitrát z ICT databáze [102].



Molecular weight: **104,068 g**  
Oxygen balance: **-30,75 %**  
Aggregation state: **Solid**  
Class: **Energetic fillers**

Names:

**NITROGUANIDINE**  
**NIGU**  
**NQ**  
**556-88-7**

Density:	<b>1,77 g/cm<sup>3</sup></b>		Source: 563
Melting point:	<b>257 °C</b>		Source: 29
Melting point:	<b>232 °C</b>	Decomposition	Source: 1445
Melting point:	<b>235 °C</b>		Source: 3250
Heat of combustion:	<b>208,6 kcal/Mol</b>		Source: C

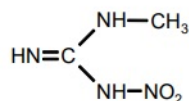
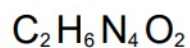
Enthalpy of Formation:			
<b>-86,61 kJ/Mol</b>	<b>-20,70 kcal/Mol</b>	<b>-832,23 kJ/kg</b>	Source: 17
<b>-94,47 kJ/Mol</b>	<b>-22,58 kcal/Mol</b>	<b>-907,82 kJ/kg</b>	Source: 99
<b>-91,04 kJ/Mol</b>	<b>-21,76 kcal/Mol</b>	<b>-874,85 kJ/kg</b>	Source: 358

Energy of Formation:			
<b>-74,22 kJ/Mol</b>	<b>-17,74 kcal/Mol</b>		Source: 17
<b>-82,09 kJ/Mol</b>	<b>-19,62 kcal/Mol</b>		Source: 99
<b>-78,66 kJ/Mol</b>	<b>-18,80 kcal/Mol</b>		Source: 358

Sources:

- 563 G. Piacenza et al.:  
Molecular Mechanicals versus Volume Additivity Methods in Prediction of Energetics Materials Density  
Proc. 28th Int. Conference of ICT, 1997
- 29 B.M. Dobratz: LLNL Explosives Handbook  
University of California, Livermore, March 1981, UCRL-52997  
with UCRL-52997 Change 2, January 1985
- 1445 G. Krien  
Ergebnisse der thermoanalytischen Untersuchung von Treibstoffen und ihren Ausgangsstoffen  
BICT-Bericht, Az: 3.0-3/6038/82, 1982
- 3250 Lundstrom, N.H. Greso, A.J.; Scheffee, R.S./ Proc. 29th Int. Pyrotechnics Seminar, 2002, 139-146
- C J.D. Cox, G. Pilcher: Thermochemistry of Organic and Organometallic Compounds Academic Press, London, 1970
- 17 G. Krien, H.H. Licht, J. Zierath: Thermochemische Untersuchungen an Nitraminen Thermochimica Acta, 6(1973), 465-472
- 99 A. Davenas: Solid Rocket Propulsion Technology Pergamon Press, 1993
- 358 B.H. Justice, I.H. Carr  
The Heat of Formation of Propellant Ingredients  
AFRPL-TR-67-311, AD 387455, December 1967

Obrázek C.3: Kalorimetrické hodnoty pro nitroguanidin z ICT databáze [102].



Molecular weight: **118,095 g**  
Oxygen balance: **-67,74 %**  
Aggregation state: **Solid**  
Class:

Names:

**METHYLNITROGUANIDINE**  
**N-METHYL-N'-NITROGUANIDINE**  
**1-METHYL-3-NITROGUANIDINE**  
**4245-76-5**

Density: **1,49 g/cm3**  
Heat of combustion: **376,6 kcal/Mol**

Source: 125  
Source: 919

Enthalpy of Formation:

<b>-72,55 kJ/Mol</b>	<b>-17,34 kcal/Mol</b>	<b>-614,34 kJ/kg</b>
<b>-142,26 kJ/Mol</b>	<b>-34,00 kcal/Mol</b>	<b>-1204,59 kJ/kg</b>

Source: 919  
Source: 125

Energy of Formation:

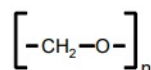
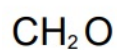
<b>-57,70 kJ/Mol</b>	<b>-13,79 kcal/Mol</b>
<b>-127,40 kJ/Mol</b>	<b>-30,45 kcal/Mol</b>

Source: 919  
Source: 125

Sources:

- 125 Mr. Gupta, BICT, personal communication, 1992  
919 G.R. Handrick  
Report of the study of pure explosive compounds  
Rpt. C-58247 by A.D. Little, Inc., Cambridge, MA, 1956, 467-573

Obrázek C.4: Kalorimetrické hodnoty pro methyl-nitroguanidin z ICT databáze [102].



Molecular weight: **30,026 g**  
Oxygen balance: **-106,57 %**  
Aggregation state: **Solid**  
Class:

Names:

**POLYOXYMETHYLENE**  
**POLYFORMAL**  
**PARAFORMALDEHYDE**  
**9002-81-7**

Heat of combustion: **121,44 kcal/Mol**

Source: C

Enthalpy of Formation:

**-171,25 kJ/Mol**  
**-175,44 kJ/Mol**

**-40,93 kcal/Mol**  
**-41,93 kcal/Mol**

**-5703,43 kJ/kg**  
**-5842,77 kJ/kg**

Source: C  
Source: 10

Energy of Formation:

**-167,53 kJ/Mol**  
**-171,71 kJ/Mol**

**-40,04 kcal/Mol**  
**-41,04 kcal/Mol**

Source: C  
Source: 10

Sources:

C J.D. Cox, G. Pilcher: Thermochemistry of Organic and Organometallic Compounds Academic Press, London, 1970

10 P. Tavernier, J. Boisson, B. Crampel: Propergols Hautement Energetiques Agardographie Nr. 141 (1970)

Obrázek C.5: Kalorimetrické hodnoty pro polyoxy methylén z ICT databáze [102].