

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Petr Spáčil

Univerzita Pardubice
Ústav energetických materiálů

Vliv rychlosti vzorkování při měření výbuchových parametrů směsí hořlavých
plynů se vzduchem.

Bakalářská práce

2020

Petr Spáčil

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr Spáčil**
Osobní číslo: **C17020**
Studijní program: **B2802 Chemie a technická chemie**
Studijní obor: **Chemie a technická chemie**
Téma práce: **Vliv rychlosti vzorkování při měření výbuchového parametrů směsí
hořlavých plynů se vzduchem**
Zadávající katedra: **Ústav energetických materiálů**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši zadaného tématu.
2. Vyhodnoťte nalezené informace a ověřte nalezené informace experimentálně na výbuchové komoře.
3. Výsledky zpracujte ve formě bakalářské práce.

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

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Břetislav Janovský, Dr.**
Ústav energetických materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **28. února 2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

doc. Ing. Miloš Ferjenčík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Pardubicích dne 28. února 2020

Prohlašuji:

Tuto práci 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, 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 15. 7. 2020

Spáčil Petr

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych především poděkovat panu doc. Ing. Břetislavu Janovskému, Dr. za jeho ochotu a pomoc při psaní této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat všem mým přátelům a spolužákům, kteří mi vždy ochotně poradili. Velké poděkování bezpochyby patří i mým prarodičům a mé přítelkyni. Zároveň bych chtěl poděkovat každému, kdo bude věnovat této práci svůj čas na to, aby ji přečetl.

Anotace

Cílem práce je určit rychlost vzorkování, které je vhodné pro správné určení rychlosti nárůstu tlaku při výbuchu směsí hořlavých plynů se vzduchem. Způsobem dosažení cíle jsou experimenty, které budou probíhat v souladu s normou EN 15967, ve které je popsán postup stanovování maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárůstu tlaku. Výbuchy plynů byly prováděny ve dvanácti a dvaceti litrové výbuchové komoře. Pro měření tlaku bylo použito piezorezistivní tlakové čidlo. U tohoto čidla byla zaznamenávána chvění membrány tak, že mechanická práce byla převáděna na elektrický signál – napětí. Toto napětí bylo dále přes zesilovač vedeno do A/D převodníku a přepočteno na tlak. Vzorkování A/D převodníku bylo pak určující pro správné vyhodnocení rychlosti nárůstu tlaku. Dynamická měření probíhala s jedním čidlem ve dvanácti litrové nádobě a s dvěma v nádobě dvacetilitrové. Výsledné hodnoty rychlosti nárůstu tlaku byly porovnány se standardními hodnotami uvedenými v normě. Bakalářská práce se skládá ze čtyř částí a závěru. Práce začíná úvodem. Druhou kapitolou je rešerše, ve které budou vysvětleny základní informace týkající se výbuchů plynů a s nimi související normy. Mimo jiné budou popsány přístroje, na kterých se pracovalo a se kterými se lze v tomto odvětví setkat. Dále jsou zde vysvětleny principy A/D a D/A převodníků. Poté bylo nalezeno několik prací, které se zabývají podobnou problematikou měření. Ve třetí části bude popsáno praktické měření, při kterém bude zapalován aceton, methan a vodík ve dvanácti a dvaceti litrové výbuchové komoře. Následně ve čtvrté části budou výsledky práce prezentovány formou grafů a tabulek, které názorně ukazují kvalitu měření a ukáží, jak vhodné vzorkování (měření) tlaku může zpřesnit vyhodnocení maximální rychlosti nárůstu tlaku. Poslední částí je závěr.

Annotation

The aim of this work is to determine the sampling rate, which is suitable for the correct determination of the rate of pressure increase in the explosion of mixtures of flammable gases with air. The way to achieve the goal are experiments, which will be carried out in accordance with the standard EN 15967, which describes the procedure for determining the maximum explosion pressure and the maximum rate of pressure rise. Gas explosions were carried out in a twelve and twenty liter explosion chamber. A piezoresistive pressure sensor was used to measure the pressure. For this sensor, the

vibration of the diaphragm was recorded so that the mechanical work was converted into an electrical signal - voltage. This voltage was further fed via an amplifier to an A / D converter and converted to pressure. Sampling of the A / D converter was then decisive for the correct evaluation of the rate of pressure rise. Dynamic measurements were performed with one sensor in a twelve liter vessel and with two in a twenty liter vessel. The resulting values of the pressure rise rate were compared with the standard values given in the standard. The bachelor thesis consists of four parts and a conclusion. The work begins with an introduction. The second chapter is a search in which the basic information concerning gas explosions and related standards will be explained. Among other things, the devices that have been worked on and that can be encountered in this sector will be described. The principles of A / D and D / A converters are also explained here. Then several works were found that deal with similar measurement issues. The third part will describe a practical measurement in which acetone, methane and hydrogen will be ignited in a twelve and twenty liter explosion chamber. Subsequently, in the fourth part, the results of the work will be presented in the form of graphs and tables, which clearly show the quality of measurements and show how appropriate sampling (measurement) of pressure can refine the evaluation of the maximum rate of pressure increase. The last part is the conclusion.

Klíčová slova: výbuchy prachů, růst tlaku, rychlost vzorkování, výbuchy plynů

Keywords: Dust explosion, rate of pressure rise, sampling rate, gas explosion.

Obsah

1. Úvod	10
2. Rešerše.....	11
2.1. Požární trojúhelník	11
2.2. Ternární diagram	12
2.3. Příčiny výbuchů	13
2.3.1. Oheň na pracovišti	13
2.3.2. Statická elektřina.....	13
2.3.3. Samovznícení.....	14
2.3.4. Tření.....	15
2.3.5. Elektrické výboje	15

2.4.	Normy zabývající se problematikou výbuchů.....	16
2.5.	Popis výbuchové křivky	17
2.6.	Měření tlaku	18
2.7.	Zařízení používaná pro měření výbuchových vlastností látek.....	19
2.7.1.	Hartmanova trubice.....	19
2.7.2.	Výbuchový autokláv	20
2.7.3.	Godbert – Greenwaldova pec	22
2.7.4.	Elektrody.....	22
2.8.	Tenzometr:	23
2.9.	A/D a D/A převodníky	24
2.10.	Závislosti měřených parametrů na rychlosti vzorkování dat	28
3.	Praktická část.....	29
3.1.	Popis výbuchové komory CA 12L.....	29
3.2.	Příprava komory:.....	31
3.2.1.	Postup měření pro kapalný vzorek:	32
3.2.2.	Postup měření pro plynný vzorek:.....	34
4.	Výsledky a diskuze	34
4.1.	Ověření funkčnosti zařízení	34
4.2.	Výbuchy acetonu.....	35
4.3.	Výbuchy vodíku	37
4.4.	Měření vodíku s obsahem 31 % vodíku.	38
4.5.	Měření s metanem	41
5.	Závěr:.....	45
	Seznam obrázků:	46
	Seznam tabulek:	46
	Seznam grafů:.....	46
	Seznam zkratk a symbolů:.....	47
	Seznam použité literatury.....	48

1. Úvod

W. Bartknecht (1981) ve svých pracích informuje o původních projevech tehdy náhodných explozí, o kterých se v minulosti nevědělo, čím byly způsobeny. Postupem času se tyto exploze začaly selektovat (výbuchy v mlýnech, v cukrovarech, v truhlárnách). Pokaždé se předpokládalo, že chyba nastala někde jinde. Až postupem času se množství podobných výbuchů nahromadilo. Všechny výbuchy probíhaly podle podobného scénáře. A vzhledem k tomu, že si tyto výbuchy vyžádaly mnoho obětí na životech a znamenaly velkou finanční ztrátu pro podniky, bylo potřeba zjistit co je příčinou výbuchů. Příčiny mohou být různé. Například k vytvoření jiskry, která způsobí explozi, stačí mnohokrát velmi málo, a proto se nahodile stane, že nějakou větší nehodu způsobí zcela nečekaná situace, jako je změna ve výrobním procesu případně zanedbání bezpečnosti ze strany pracovníků.

V této práci bude cílem určit rychlost vzorkování dat, které je vhodné pro správné určení rychlosti nárůstu tlaku při výbuchu směsí hořlavých plynů se vzduchem.

Experimenty budou probíhat v souladu s normou EN 15967, ve které je popsán postup stanovování maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárůstu tlaku. Výbuchy plynů budou prováděny ve dvanácti a dvaceti litrových nádobách.

Základní principy různých výbuchů byly čerpány z knih W. Bartknechta, který se výbuchy celoživotně zabýval. Těmito knihami byly především Explosions (Bartknecht, 1981) a Dust Explosions (Bartknecht, 1989). Načerpané informace umožnily náhled do vlastností výbuchů a jejich popisu. Následně bylo zjištěno, jak se dané typy výbuchů iniciují, jak se rozvíjí a jaké jsou jejich následky. Výsledkem může být pouhé zahoření nebo naproti tomu fatální exploze, které hrozí v jakémkoli odvětví moderního průmyslu. Proto je v dnešní době mnoho věcí již popsáno, a tak se vycházelo z ověřených dat, když byla odhadována síla výbuchů. Vše se odvíjí od druhu materiálu, přístupu vzduchu, poloměru částic, teploty, tlaku, koncentrací, prostoru atp.

V bakalářské práci se bude vyskytovat řada norem, které se mohou regionálně lišit (jiné normy jsou v Evropě a jiné ve zbytku světa). Na rešerši bude navazovat experimentální část. Budou provedeny výbuchy ve dvanáctilitrové a dvacetilitrové nádobě. V použitých zařízeních budou tlaková čidla, která budou zaznamenávat průběh tlaku v závislosti na čase. Různou rychlostí vzorkování bude prokázáno, že pro reaktivnější plyny, jako je například vodík, musí být pro naměření správných hodnot použito vzorkování vyšší, než je běžné. Tato měření budou probíhat za konstantních podmínek.

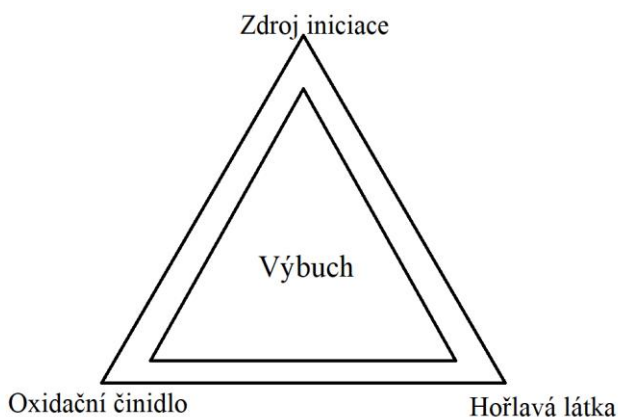
2. Rešerše

Výbuch je fyzikální jev, při kterém dochází k velmi prudkému uvolnění energie. Tato energie je uvolněná z chemické reakce. Relativně jednoduchým systémem pro výbuch jsou plynné směsi. Tvoří homogenní systém, ve kterém je dispergované palivo v oxidovadle (případně i naopak). V takovémto případě záleží iniciace na běžných podmínkách (teplota, tlak, typ a stechiometrie směsi). Kdežto u pevných částic se musí zohledňovat další faktory, jako je povrch (jemnost částic), dispergace (prachy si sedají vlivem gravitačních sil). S již zmiňovanou stechiometrií souvisí ternární diagram a požární trojúhelník, který bude vysvětlen níže.

Evropská Unie se stará o bezpečnost při práci ve výbušných atmosférách viz Nařízení vlády č. 406/2004 Sb. o posuzování bezpečnosti pracovišť ohledně výbuchu. Vyžaduje dokumentace o ochraně před výbuchem a také požárně technické charakteristiky.

2.1. Požární trojúhelník

Šimoníková (2014) uvádí, že aby mohlo dojít k výbuchu plynu, je potřeba splnit několik podmínek. Základní podmínky jsou tři, a jsou zobrazovány graficky tzv. „požárním“ nebo „výbuchovým“ trojúhelníkem (explosion triangle), který je uveden na obrázku 1.



Obrázek 1: Výbuchový trojúhelník

Jak je vyobrazeno nahoře, jsou zde tři strany, které jsou ve vzájemné korelaci. Každý roh charakterizuje vlastnost a strana symbolizuje koncentraci. Abychom byli schopni iniciovat výbuch, musíme se nacházet uprostřed tohoto trojúhelníku (dle stechiometrie). Na vrcholu trojúhelníku je iniciační zdroj, který může dosahovat různých hodnot v řádu od setin mJ do desítek až stovek J. V levém dolním rohu je oxidační činidlo. V pravém dolním rohu je

hořlavá látka. Samostatně nejsou tyto faktory postačující podmínkou pro výbuch, a stejně tak ani kombinace dvou faktorů. Vždy musí být splněny všechny tři podmínky.

Tento trojúhelník lze samozřejmě obohatit i o další podmínky, které mohou ovlivnit výbuch. Těmito vlivy jsou stěny nádoby a celková homogenita směsi. Faktorů ovlivňujících výbuch je více, a proto při zohlednění dalších faktorů vznikne N-úhelník. Příkladem je pětiúhelník, který je znázorněn níže na obrázku 2, a vyjadřuje nezbytné podmínky pro výbuch prachových disperzí.

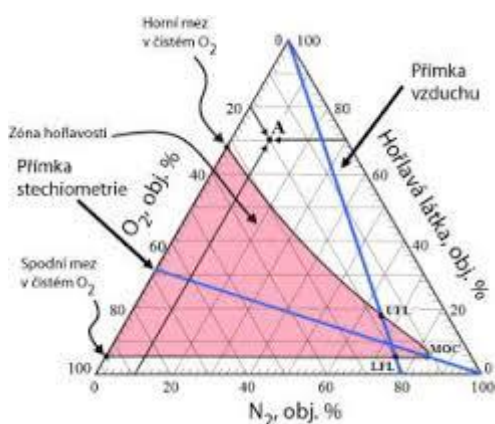


Obrázek 2: Výbuchový pětiúhelník (Šimoníková, 2014)

Z těchto důvodů je důležitá prevence a zmírňování následků výbuchů. S výbušnými plyny je tedy vhodné zacházet co nejopatrněji a v dobře odvětrávaných prostorech. Jak bude dále zmiňováno, je vhodné se vyvarovat iniciačním zdrojům hoření. Jedním z nejběžnějších iniciátorů je jiskra, kdy po následném zapálení hořlavé směsi roste teplota a v závislosti na poměru palivo vs. oxidant i tlak. Záznamem průběhu tlaku v závislosti na čase dojde k vytvoření výbuchové křivky, která bude zmíněna dále v textu.

2.2. Ternární diagram

Jedná se o diagram tří složek. Tyto složky jsou smíseny za daných podmínek v určitém poměru. Diagram má tvar trojúhelníku. Každá strana představuje jednu složku směsi (palivo, oxidant, inert). Tento trojúhelník může být rovnostranný nebo pravoúhlý. V tomto grafickém znázornění složení směsi lze najít dolní a horní mez výbušnosti a obecně celou oblast složení, kdy je směs schopná explodovat. Ternární diagram i s popiskem je na obrázku 3.



Obrázek 3: Ternární diagram (Zámostný, 2009)

2.3. Příčiny výbuchů

Ternární diagram zahrnuje dvě strany výbušného trojúhelníku. V třetím rohu je místo iniciace třetí složka (inert). Iniciačních zdrojů je velká řada. V následujících podkapitolách je uveden výčet těch nejběžnějších a nejčastějších.

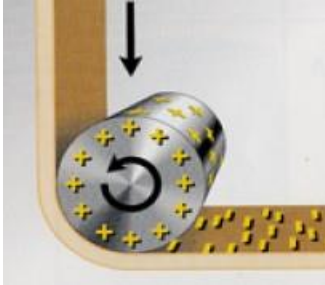
2.3.1. Oheň na pracovišti

Iniciovat požár může i nevědomě kuřák, který nerespektuje výstražné značení, spíše ten, který po sobě nechává na zemi doutnající nedopalky. Nebo jakýkoliv zaměstnanec, jenž přinese zdroj otevřeného ohně na pracoviště. Tento zdroj ohně může způsobit požár, který se může nekontrolovaně šířit po pracovišti a po určité době je velmi těžko zvládnutelný. Za tuto dobu lze považovat například dobu oběda nebo svačiny, kdy nemusí nikdo v místě vzniku požáru být.

2.3.2. Statická elektřina

Ačkoliv se to může zdát jako banalita, může i takto nenápadná maličkost způsobit výbuch. Statickou elektřinu je dobré svádět kabely až k uzemnění. Dokonce i zaměstnanci mnoha firem se při práci připínají pásky ke končetinám, aby se vznikající náboj mohl odvádět. V tomto případě nehrozí výbuch, ale nepříjemné chytání jisker při dotyku kovových zařízení. Dobrou prevencí je také náhrada kovových nástrojů za speciální plastové. Především ve výrobnách, kde se pracuje se střelným prachem a trhavinami. V případě měření pro tuto

bakalářskou práci byly použity vybíjecí tyče k vybití některých obvodů. Jak ukazuje obrázek 4, náboj může vznikat i na rotujících válcích, či kalandrech.



Obrázek 4: Válec vytvářející svou rotací statickou elektřinu (Šimoníková, 2014)

2.3.3. Samovznícení

Samovznícení se může projevit celkem nenápadně, stačí pouze, aby se přes stěnu nádoby, popřípadě zařízení postupně zvedala teplota na mez vznícení/výbuchu. Příčinou takového zahřátí může být požár ve vedlejší budově nebo místnosti. Horké plochy mohou také vzniknout zabráněním odvodu tepla z přístroje například zastavením vodního chladicího zařízení, případně při chlazení vzduchem ucpáním výdechů prachem nebo zakrytí nějakým materiálem (nedbalost). Tento typ selhání může vzniknout i při provozní sleposti, kdy pracovníci vnímají přehřátá zařízení jako normální stav. Na obrázku 5 je vidět zaprášený vnitřek počítače. Prach snižuje výkonost chlazení a zvyšuje teplotu jak na povrchu, tak uvnitř pláště.



Obrázek 5: Zaprášené chladiče u PC (Dukovský, 2020)

2.3.4. Tření

Tření může způsobit vznícení (zvýšením teploty), ale také může vytvořit jiskru. Míra tření se odvíjí od velikosti povrchu, a hlavně od jeho hrubosti. Neopomenutelným aspektem je rychlost tření a tepelná vodivost třeného materiálu. Rutinní údržbou lze takovému defektu předejít například pravidelným čištěním pohyblivých částí a jejich řádným promazáváním. Na obrázku 6, je vidět rotující zařízení, které třením o povrch vytváří jiskry.



Obrázek 6: Těleso, které při úpravě kovů vytváří jiskry (Šimoníková, 2014)

2.3.5. Elektrické výboje

Jedná se o elektrický proud, který je veden v plynném prostředí a vytváří se při něm i plazma. Aby došlo k výboji za normálních podmínek (tlaku a teploty), musí být mezi

elektrodami vytvořeno velké napětí nebo musí být prostor mezi nimi silně ionizovaný. Jeden typ elektrického výboje bude využíván v experimentální části této bakalářské práce (permanентní jiskra). K cílenému vytvoření výboje může být využito dvouelektrodové i tříelektrodové zapojení (Barknecht, 1989). Takový výboj je na obrázku 7.



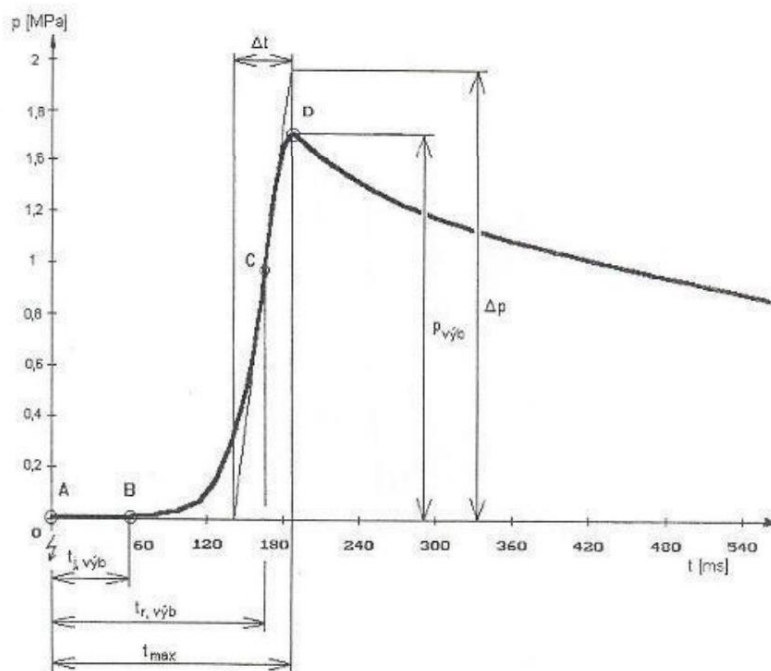
Obrázek 7: Výboj (Šimoníková, 2014)

2.4. Normy zabývající se problematikou výbuchů

Při měření je nutno dodržovat veškeré bezpečnostní konstrukční a jiné normy, které zde nyní budou zmíněny. Jednou z těchto norem je EN 15967, která je pro tuto práci stěžejní. Jedná se o normu, která se používá ke stanovení maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti nárustu výbuchového tlaku plynů a par. Tato norma popisuje metody pro stanovení rychlosti nárustu a maximální hodnotu nárustu výbuchového tlaku. Norma se nezabývá mlhami, nýbrž pouze párami, stejně jako se nezabývá detonačními jevy. Norma dále popisuje postup měření. Principem je iniciace výbuchu uprostřed kulaté zkušební nádoby definovaným iniciačním zdrojem. Norma definuje zkušební zařízení, což je nádoba o obsahu alespoň 5 l, která musí odolat tlaku 20 barů (konstrukce komory je v souladu s EN 14460). Dále musí být zařízení z nerezavějící oceli (tj. materiál, který nepodléhá korozi ani nereaguje s reaktanty). Mimo jiné jsou zde uvedeny i bezpečnostní podmínky, jako je již zmiňované utěsnění. Dále pak skutečnost, že nádoba musí vydržet větší tlakovou zátěž, než je minimum pro splnění normy. K tomu patří veškerá ochrana částí, které by se mohli uvolnit a také možnost odvětrávání, i pro případ, že by směs nezahořela. Další důležitou normou je ČSN ISO 1127-1 – Výbušná prostředí – zamezení a ochrana proti výbuchu. Jedná se o další z bezpečnostních norem, která vede k zamezení výbuchů. Používá se především ke konstrukci ochranných systémů. Cílem je identifikovat riziko, a následně jej eliminovat. Takovýmto rizikem mohou být vadná těsnění, která je potřeba přetěsnit. EN 13821 – Prostředí s nebezpečím výbuchu – Prevence a ochrana proti výbuchu – Stanovení minimální iniciační energie (MIE) směsi prachu se vzduchem. Tato norma je velmi důležitá, protože preventivně stanovuje MIE, takže díky ní lze říci od jakého množství energie dodaného do systému

nastane výbuch. To vše ve vhodném poměru reaktantů. Další norma, která se týká prachových disperzí je EN 14034 – Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu. Norma je rozdělena celkem na 4 části. Určuje maximální hodnotu tlaku při výbuchu. Základem je ochrana před destrukcí zařízení. Jednou z posledních velmi důležitých norem je ČSN EN ISO/IEC 80079 (332320) - Výbušné atmosféry. Je to norma popisující klasifikaci prostor, ve kterých se nachází, nebo může nacházet, rozvířený hořlavý prach. Umožňuje správný výběr a instalaci pro elektrická zařízení, která se vyskytují v laboratořích (prostorech) s hořlavým prachem.

2.5. Popis výbuchové křivky



Obrázek 8: Průběh výbuchu (Chlebková, 2010)

Typický průběh výbuchu lze znázornit křivkou na obrázku 8. Tento graf se nazývá výbuchová křivka. Na ose x je čas v milisekundách a na ose y je tlak v MPa. Jde zde o závislost růstu tlaku v čase. Jednotlivé části grafu je možné rozdělit na úseky, které mají své charakteristické rysy.

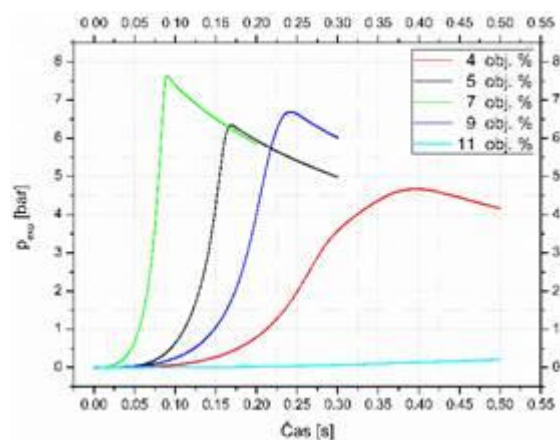
A – V tomto bodě dochází k velmi pomalému nárůstu tlaku. Začíná zde pomalé hoření, a oteplování prostoru sáláním (radiací tepla). Doba mezi bodem A a B se nazývá indukční perioda.

B – Začíná narůstat tlak, a především reakční rychlost kvůli zvýšení teploty.

C – S časem se zvyšuje teplota, tlak a také reakční rychlost, tento jev nastává až do bodu C, kde rychlost nárůstu tlaku dosáhne svého maxima. Toto maximum závisí na rychlosti šíření plamene, počátečním tlaku a počáteční teplotě směsi. Mezi body C a D se snižuje rychlost nárůstu tlaku a také dochází k chladnutí produktů chemické reakce za šířící se reakční zónou. To vše z důvodu postupného vyhořívání reakční směsi.

D – Je dosaženo maxima tlaku a rychlost nárůstu tlaku je nulová. Od tohoto bodu už pouze klesá teplota a s ní i tlak.

Plánuji porovnat výbuchové parametry v závislosti na koncentraci. Výsledný graf vytvořený pro aceton a methan by mohl vypadat podobně jako tento ethanolový na obrázku 9.



Obrázek 9: Graf vlivu rozdílné koncentrace vzorku (Celner, 2019)

2.6. Měření tlaku

Měření tlaku může probíhat mnoha způsoby. Nejběžněji se používají čidla:

Piezoelektrické

Při stlačení krystalů (např. křemene), dochází k vyvolání elektrického náboje, který odpovídá míře stlačení. Používají se nábojové zesilovače, které převádí náboj na napětí.

Piezorezistivní

Dnes nejpoužívanější princip, který používá piezorezistivní materiál (tím se liší od piezoelektrického). Tento materiál mění tlakovou sílu na změnu odporu, který je měřen. (Vojáček, 2007)

Odporový můstek

Též Wheatstoneův můstek. Jedná se o obvod (zařízení) používaný pro měření odporu a malých změn odporu, které jsou pro nás stěžejní.

V souvislosti s tlakovými snímači se objevují dva pojmy důležité zvláště při měření dynamicky se měnících tlaků. Jedná se o:

a.) natural frequency – vlastní frekvence

Formánek (2014) Uvádí že, se jedná o pohyb, kdy těleso neustále kmitá přes svou rovnovážnou polohu. Tyto kmity mohou být v ose případně oblouku. Tento pohyb je periodický. Probíhá s minimálním tlumením bez působení vnějších sil (krom první impulzové síly).

b.) resonant frequency – rezonanční frekvence

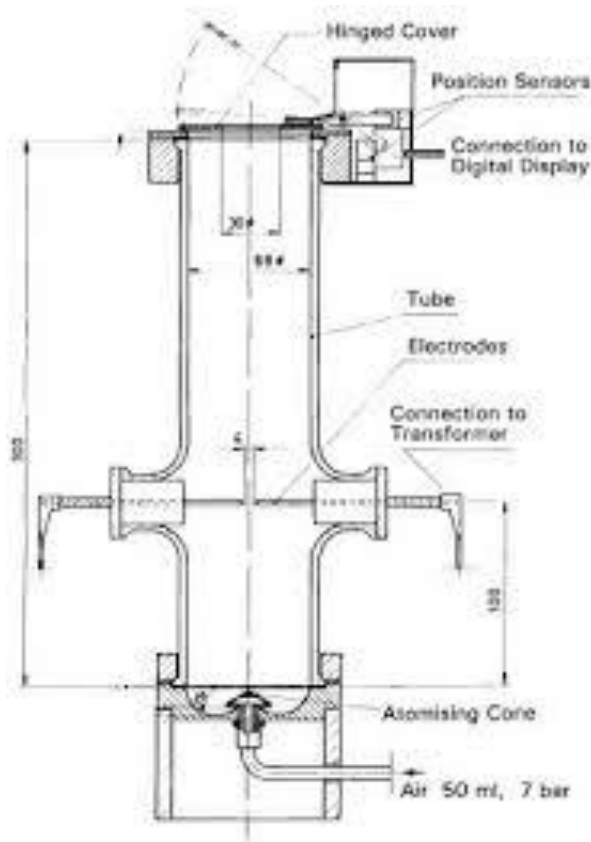
Dle Formánka (2014), je rezonance jev, při kterém těleso kmitá při pravidelném dodávání energie. Tento jev může být inhibiční nebo konstruktivní (když je energie dodávána při vhodné frekvenci, tak vzniká amplituda)

2.7. Zařízení používaná pro měření výbuchových vlastností látek

2.7.1. Hartmanova trubice

Jedná se o trubici posazenou do pevné základny a opatřenou otevíracím víkem, nebo průtržnou membránou (např. filtračním papírem). Z boku jsou do trubice vsazeny dvě elektrody, na které je přivedeno vysoké napětí z kondenzátoru způsobující elektrický výboj. Rozvířovací zařízení je umístěno pod základnou trubice. Vzorek je nasypan na dno základny, a z 50 ml nádoby natlakované vzduchem na 7 bar je přes hříbovitou trysku tento vzduch

přiveden proti dnu, což rozvíří nasypáný prach do objemu trubice. Toto zařízení se používá především pro zjištění minimální iniciační energie, a to postupným snižováním/zvyšováním přídatku energie pro zážeh. Zařízení je i s popisem na obrázku 10.

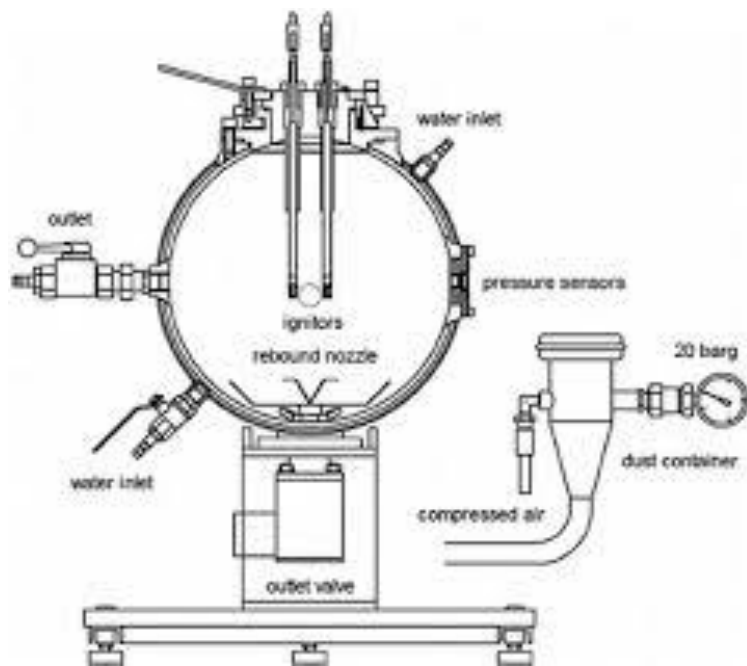


Obrázek 10: Hartmanova trubice (Cebák, 2017)

2.7.2. Výbuchový autokláv

Jedná se o dvouplášťovou kouli vyrobenou z nerezavějící oceli o objemu 20 litrů. Používá se pro měření výbuchových tlaků, rychlostí nárůstu tlaků, dolní meze výbušnosti, horní meze výbušnosti a limitního obsahu kyslíku. Existují podobná zařízení o objemu až deset metrů krychlových.

K zaznamenání výbuchových tlaků se využívají tlakové senzory. Až na objem a tvar komory je princip a funkce identická s Hartmanovou trubicí. Prach je však rozvířován přes rychloventil ze zásobníku prachu tlakem 20 bar. Plášť komory lze vytápět. Toto zařízení je zobrazeno na obrázku 11 jako nákres a na obrázku 12, jako již existující zařízení.



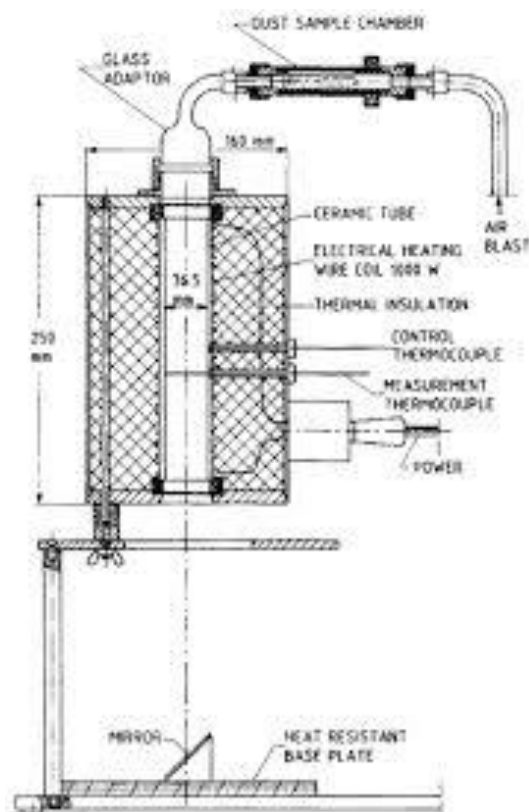
Obrázek 11: Nákres výbuchového autoklávu (Cebák, 2017)



Obrázek 12: Výbuchový autokláv (Cebák, 2017)

2.7.3. Godbert – Greenwaldova pec

Jedná se o zařízení, které funguje na stejných principech jako předešlé přístroje. Využívá se zejména pro určení teploty vznícení prachové disperze od horké plochy. Celá trubice je zahřívána a při konstantní teplotě se sleduje, při jaké teplotě se vzorek po rozvíření vznítí (MIE). Celé zařízení je znázorněno na obrázku 13.

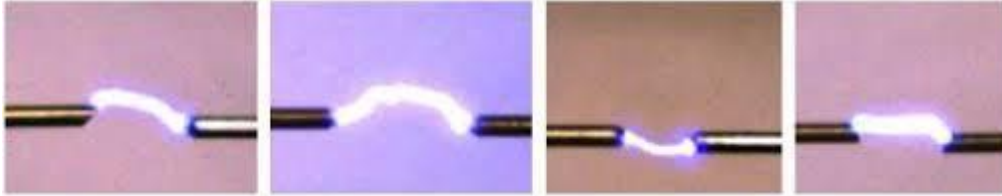


Obrázek 13: Godbert – Greenwaldova pec (Cebák, 2017)

2.7.4. Elektrody

Slouží k vytvoření vysokonapěťové jiskry, jako iniciačního zdroje. Energii jiskry lze ovlivnit mnoha faktory. Zejména je to napětí a případně kapacita kondenzátoru, ze kterého je napětí uvolněno. Dále je to pak vzdálenost mezi elektrodami, vlastnosti prostředí a materiál elektrod. Elektrody se konstruuji z různých materiálů, především se jedná o nerezavějící ocel, wolfram a mosaz. V této práci byly využity elektrody zhotovené z wolframu. Snadněji se udržují, jsou odolnější a vydrží tedy podstatně déle. Měly by vést do středu experimentálního zařízení, kde dojde k iniciaci hořlavé směsi.

Při experimentální části bude využita permanentní jiskra, která splňuje požadavky normy EN 15967. Dle normy je jasně definován průměr a tvar elektrod. Průměr může být maximálně 4 mm, úhel špiček 60° a vzájemná vzdálenost elektrod je $5 \pm 0,1$ mm. Na obrázku 14 je permanentní jiskra v detailu, kdežto na obrázku 15 je permanentní jiskra mezi elektrodami v zařízení, na kterém bylo měřeno.



Obrázek 14: Jiskra mezi elektrodami (Jankůj, 2019)



Obrázek 15: Wolframové elektrody (Interní materiály OZM Research s.r.o.)

2.8. Tenzometr:

Dle Vojáčka (2017) a Pavča (2015), se jedná o součástku, která měří mechanické napětí neboli svou vlastní deformaci. Celé měření probíhá na základě Hookova zákona. Dříve

používané byli kromě mechanických také optické, pneumatické a akustické tenzometry. Mechanické tenzometry převádějí mechanické napětí na změnu elektrického odporu. Tenzometr je pevně připojený na a nebo v zařízení (může to být most, nebo v případě této práce měřící zařízení). Tato součástka se protahuje/smršťuje v závislosti na tom, jak se protahuje/smršťuje objekt na kterém je. Měří tak, že při natahování se snižuje jeho průřez a zvětšuje jeho délka. Tím pádem se mění i jeho elektrický odpor. V takovém to případě mluvíme o kovových tenzometrech. Existují však i polovodičové odporové tenzometry (kde se uplatňuje spíše piezorezistivní jev). Čidlo se tedy skládá z drátků o průměru 0,01 mm, které jsou navařeny na vodič. Při jednotlivých výbuších budeme měřit rychlost vzorkování a z těchto výsledků dále vycházet. Jak se dá odhadnout, pro každé měření bude zapotřebí použít jiné čidlo, a to každé o jiné citlivosti (rychlosti vzorkování). Případně lze využít pouze jedno čidlo s velkou tolerancí na měřitelný ohyb. Toto čidlo je upevněno uvnitř nádoby. Do zařízení je našroubováno díky závitu, kterého si lze všimnout na obrázku 16. Mohou zde nastat i rušivé vlivy jako je například změna teploty (ovlivnění roztažností i vodivosti), opotřebení (vytahání drátků tenzometru), vlhkost, elektromagnetické pole. Proto je důležité měřit vždy za stejných podmínek.



Obrázek 16: Tenzometrické čidlo (Interní materiály OZM Research s.r.o.)

2.9. A/D a D/A převodníky

Dle Tichého (1998) své využití nachází v převodu a transportu signálů. Využívá se například v CD přehrávačích, mobilech a počítačích. Principem je navzorkování a následné kvantování.

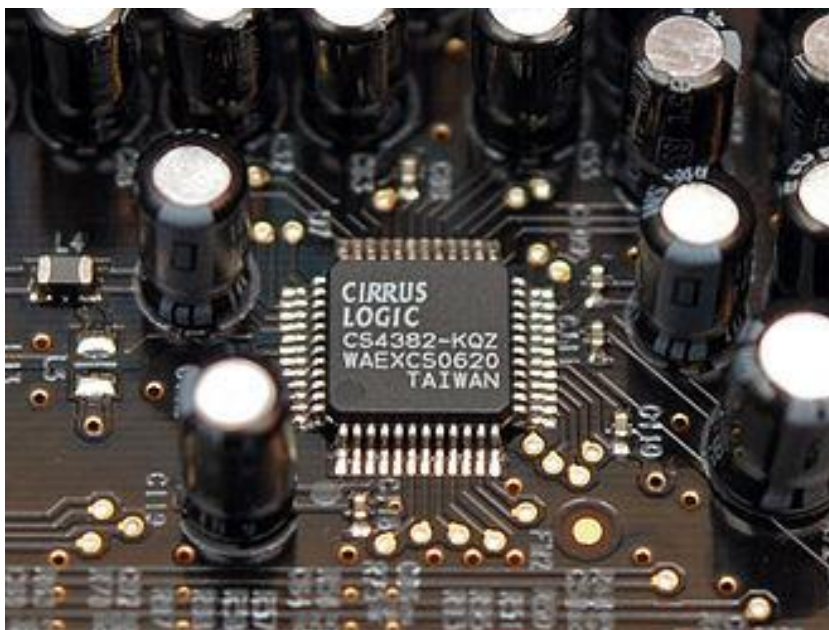
A/D převodník = elektronická součástka, která převádí spojitý analogový signál na digitální (též diskretní). Tento převod signálu se využívá kvůli umožnění zpracování analogového signálu na počítačích. Důvod je velmi prostý a logický. Jde o to, že počítače mají omezenou

paměťovou kapacitu a určitý čas na zpracování. Díky těmto převodníkům spojité graf rozdělíme na určitý počet bodů, které lze poté opět složit na spojité graf. Tímto počinem je zmenšena přesnost, ale umožněno zpracování a zálohování dat. Odchylka po složení grafu z A/D převodníku je vždy závislá na počtu bodů, na které je signál rozložen a složen. Obecně platí, že čím více bodů je získáno, tím přesnější graf vzniká, a tím je i menší odchylka. A/D převodník je na obrázku 17.



Obrázek 17: A/D převodník (Wikipedia, 2020)

U D/A převodníku se také jedná o elektronickou součástku, která ale převádí digitální signál na signál analogový (též spojité). Plní opačnou funkci A/D převodníku, jehož funkce a význam je uvedena u D/A převodníku. D/A převodník je na obrázku 18.



Obrázek 18: D/A převodník (Wikipedia, 2020)

Na následujících obrázcích 19 a 20 je graficky znázorněn průběh funkce, která byla původně spojitá, tedy ideální. Následně byla rozložena a složena. Je důležité vzít v potaz, že zde byl velmi malý počet vzorků. Bylo by možné si podobného jevu všimnout v případě, že by byl složený graf velmi přiblížen.

Počet kvantifikačních úrovní

Zpracovávaný signál se v počítačích zpravidla zpracovává v binární numerické soustavě. Proto jsou počty kvantifikačních úrovní A/D převodníků rovny N -té mocnině čísla 2, poté lze tedy signál vyjádřit v N bitech.

Aliasing

Máčalík (2012) tvrdí, že aliasing je způsoben špatným vzorkováním. Tím může vzniknout zcela jiná funkce, nebo jiný průběh, který může být jen velmi málo podobný původní funkci. Vzniká v případě extrémně nízkého počtu vzorků.

Kvantifikační šum

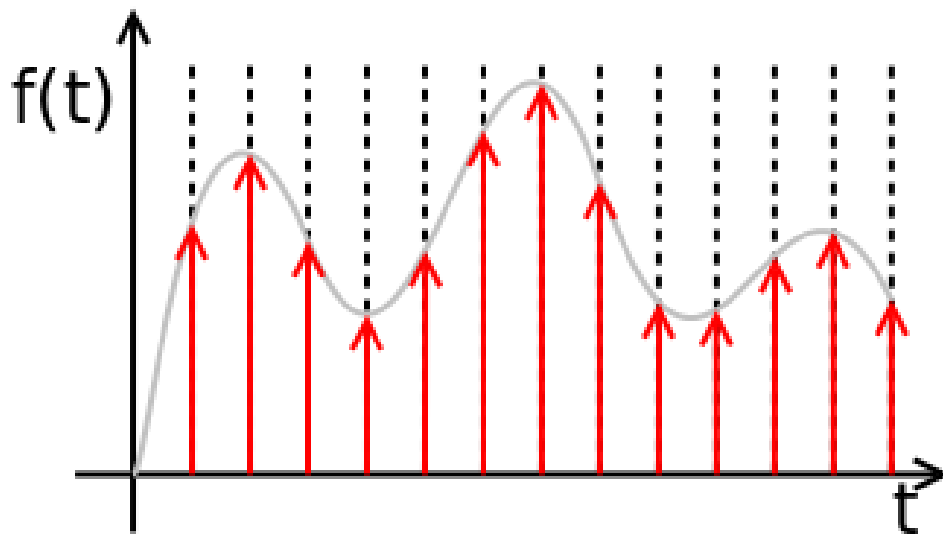
Lze jej zjistit ze znalosti původního průběhu funkce. Jedná se o hodnoty, které se jakýmkoliv způsobem liší od původní funkce. Kdyby byly vyneseny pouze tyto odchylky do grafu, byl by

získán pouze čistý šum, který je zcela nahodilý. Kvantifikační chyba je u všech lineárních převodníků stejná (interval $+\frac{1}{2}$ až $-\frac{1}{2}$ kvantifikační úrovně).

Bit

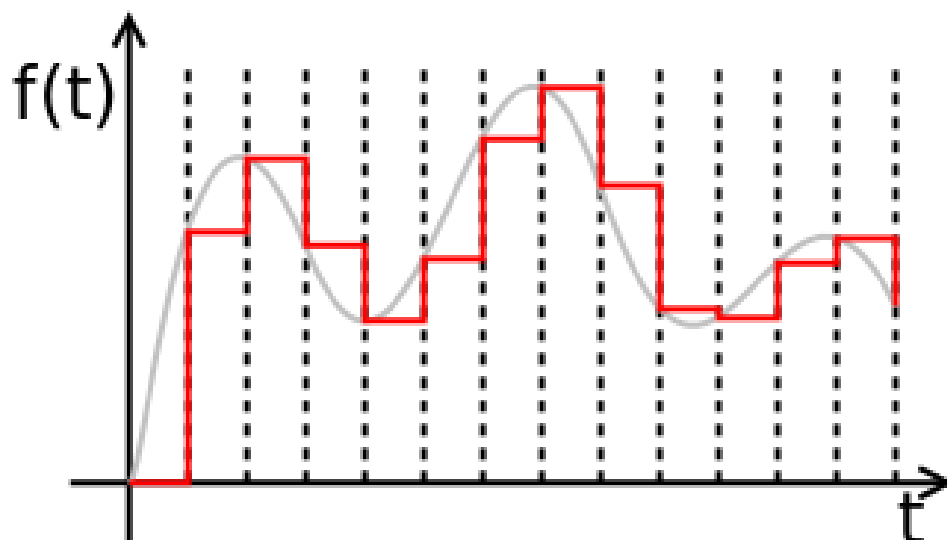
Je základní jednotka kapacity paměti. Značí se písmenem b. nejčastější značení je 1 nebo 0 (lze i + či -).

Ideálně zaznamenaný signál je uveden na obrázku 19



Obrázek 19: Původní signál (Wikipedia, 2020)

Signál, který lze poskládat z výstupu A/D převodníku je uveden na obrázku 20



Obrázek 20: Znovu složený signál (Wikipedia, 2020)

2.10. Závislosti měřených parametrů na rychlosti vzorkování dat

Rychlostí vzorkování se zabýval již Jacobs s kolektivem (2019). Jim šlo především o prudké proudy vody a rázy ve vodě při technických pochodech (různé těžby a demolice). Zprvu měřili rychlostí 200 kVzorků za vteřinu a domnívali se, že hodnota tlaku může být ve skutečnosti vyšší. Poté prováděli podobná měření při 10 000 kVzorcích za vteřinu a potvrdilo se, že skutečný rázový tlak je podstatně vyšší. Jejich práce měla především ekologické a ochranné zaměření (ochrana zdraví a života ryb). Doporučovali využívat rychlost vzorkování 5000 kVzorků za vteřinu, což se do té doby nepoužívalo. Další, kteří se tímto tématem zabývali byl Skotak (2018), který se svým kolektivem správně tvrdili, že se naměřené hodnoty tlakových signálu mohou lišit od skutečných. Zabývali se také tím, že mnoho publikací může být nepřesných z různých druhů zanedbání (vzorkovací frekvence, trvání, doba náběhu). Stamps a kolektiv (2009) se zabývali vlastnostmi výbuchu za různých podmínek a okolností.

3. Praktická část

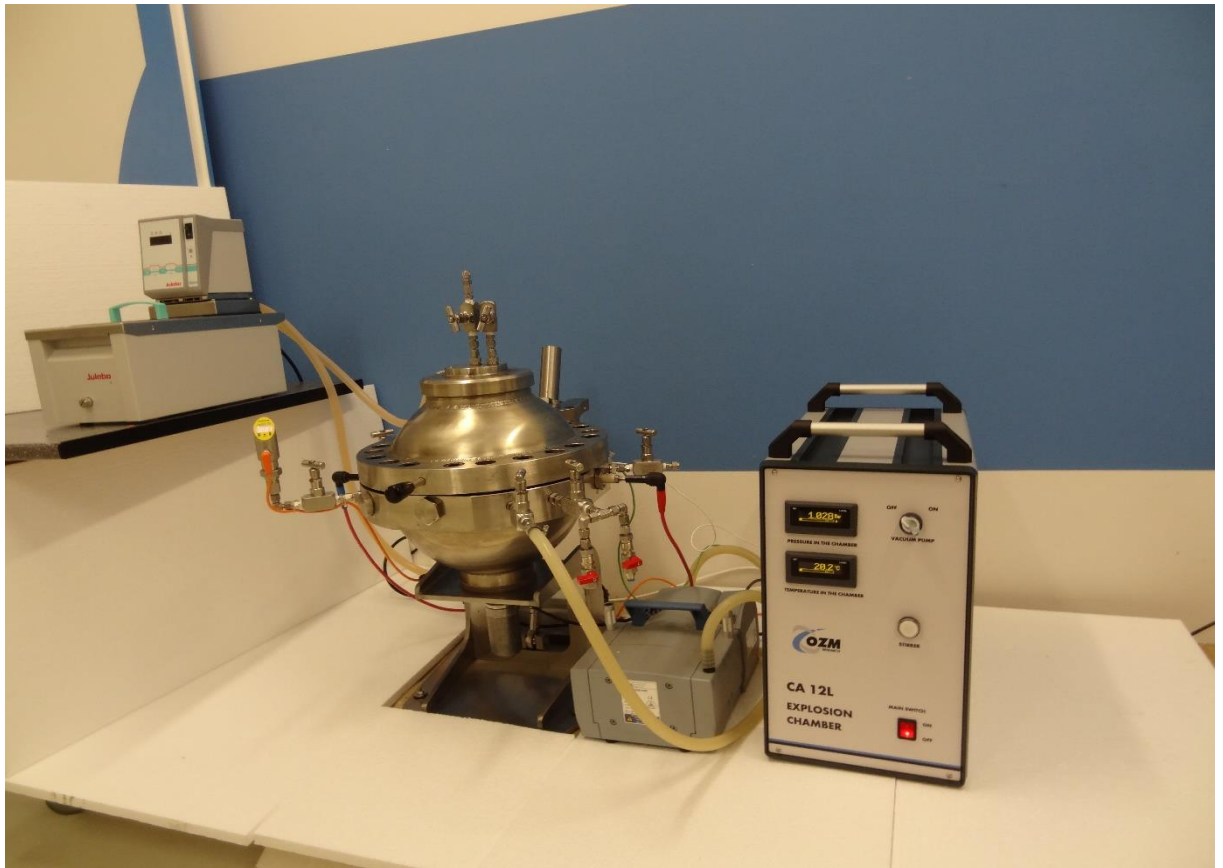
Měření probíhalo ve dvanácti a dvaceti litrové nádobě.

3.1. Popis výbuchové komory CA 12L

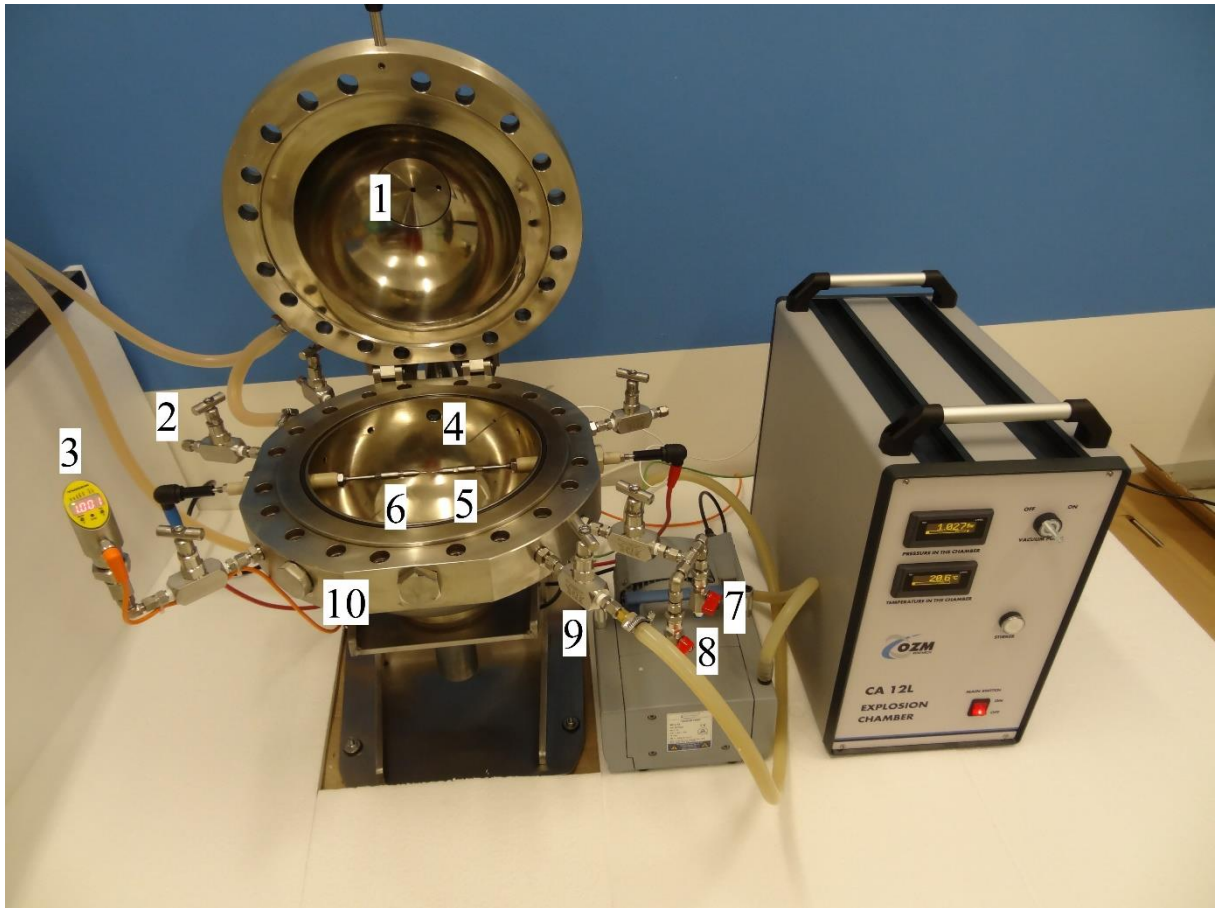
Jednalo se o ocelovou nádobu, která byla složená z ocelových vrchlíků. V ní byly navrtány instalační otvory pro jednotlivá čidla, dávkovače a elektrody. Oba vrchlíky byly pevně spojeny dvaceti šrouby a pevné části byly precizně navařeny. Vnitřek měřicího zařízení (koule) byl vysoce vyleštěn, a tak měl ideálně zrcadlový povrch. Vnitřek byl vždy čistěn odmašťovacími spreji, takže nehrozilo žádné ovlivnění měření znečištěním. V plášti zařízení byla vedena spirála, pro proudící kapalinu. Tato kapalina mohla být ohřívána, případně chlazená, záleželo na podmínkách požadovaného měření. Měření pro tuto práci probíhala při teplotě 25 °C. K případnému ohřevu sloužila termostatická lázeň, která byla externě připojena hadicemi. Uvnitř zařízení byly utěsněnými otvory prostrčeny snímače (termočlánek, tlakové čidlo), a také iniciační elektrody, které iniciovali hoření. K měření a zpracovávání dat byl použit počítač, protože byla generována velká množství dat, která by se na papíře těžko zpracovávala. Zde našli své uplatnění také A/D a D/A převodníky. Celé zařízení je na obrázku 21, a na obrázku 22 je to samé zařízení v otevřené pozici.

Popis zařízení:

1. Dávkovač vzorku – slouží k dávkování vzorku
2. Výpusť – výfuk
3. Tlakové čidlo
4. Tepelné čidlo
5. Pravá elektroda
6. Levá elektroda
7. Příklad natlakovaného kyslíku
8. Příklad natlakovaného dusíku
9. Odvod do vývěvy
10. Optické čidlo



Obrázek 21: Dvanáctilitrové zařízení, ve kterém byly prováděny výbuchy – uzavřené (Interní materiály OZM Research s.r.o.)



Obrázek 22: Dvanáctilitrové zařízení, ve kterém byly prováděny výbuchy – otevřené (Interní materiály OZM Research s.r.o.)

3.2. Příprava komory:

- 1.) Aparatura pro provádění výbuchů o objemu 12 litrů byla utěsněna a doplněna o optická čidla. Utěsnění se provádělo ráčnou, kterou byly dotaženy šrouby. Tyto šrouby byly utahovány postupně v pořadí protilehlých šroubů s posunem o 90° kvůli možnému poškození těsnícího o-kroužku.
- 2.) Kontrola těsnosti systému.
- 3.) Kalibrace měřících prvků – pomocí kalibrovaného tlakového snímače DP333Pi výrobce BDSensors byl zkalibrován dynamický tlakový snímač Kulite HEL-312 pracující v rozsahu 0–127 bar a dále byla provedena kalibrace teploměru.

3.2.1. Postup měření pro kapalný vzorek:

- 1.) Bylo vypočítáno množství acetonu pro 6 objemových procent ve dvanácti litrové nádobě (Čičmanec, 2016).

6% objemu

$$12\text{ l} \dots\dots\dots 100\%$$

$$1 \dots\dots\dots 6\%$$

$$x = \frac{12 \cdot 6}{100} = \frac{72}{100} = \underline{0,72\text{ l}}$$

$$n = \frac{V}{V_m}$$

$$n = 0,72 : 22,41$$

$$n = \underline{0,0321\text{ mol}}$$

$$m = n \cdot M = 0,0321 \cdot 58,08 = \underline{1,866\text{ g}}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1,866}{0,784} = \underline{2,38\text{ ml}}$$

Ostatní výpočty probíhaly stejným způsobem, tento byl pouze pro názornost. Tabulka 1 obsahuje výsledky výpočtů pro všechny koncentrace. V této tabulce jsou hmotnosti kapalného acetonu, které byly naváženy pro získání dané koncentrace v plynné fázi.

Objem litrů v procentech (%)	Hmotnost (g)
1	0,3110
2	0,6220
2,2	0,6842
2,5	0,7775
3	0,9330
4	1,2440
5	1,5550
6	1,8660
7	2,1770

8	2,4880
9	2,7990

Tabulka 1: Výsledky navažovaných hmotností

- 2.) Na předvážkách bylo diferenčně naváženo vypočítané množství. Pro kontrolu sloužil výpočet objemu. Vážení vzorku bylo provedeno za pomoci injekčních stříkaček.
- 3.) Do dávkovače vzorků byla vpravena injekční jehla.
- 4.) Byla otevřena vpust' pro vývěvu a byl odsát vzduch pro docílení tlaku přibližně 0,08-0,09 bar.
- 5.) Na septum byla nasazena stříkačka se vzorkem a trochou vzduchu. Obsah byl poté nasán do nádoby.
- 6.) Byl uzavřen dávkovač vzorku a obsah zařízení byl promíchán pomocí vestavěného elektrického míchadla.
- 7.) Byla otevřena vpust' pro přísun tlakového vzduchu, a to do té doby, dokud nebyl tlak v nádobě roven 1 bar. Pro lepší homogenitu směsi a ustálení teploty se využívalo míchání.
- 8.) Byl uzavřen ruční ventil oddělující dávkovací tlakový senzor s nízkým pracovním rozsahem tlaků. A tedy i nízkým destrukčním tlakem, který by byl při explozi překročen.
- 9.) V ovládacím softwaru byl spuštěn záznam sledovaných hodnot.
- 10.) Z transformátoru bylo na 2 elektrody uvnitř nádoby přivedeno napětí přibližně 15 kV na dobu 200 ms.
- 11.) Po dokončení reakce (exploze) byla uložena data popisující její průběh.
- 12.) Po ochlazení obsahu nádoby pod teplotu 100 °C, byl otevřen výpustný ventil zároveň s ventilem přívodu tlakového vzduchu. Tím byla nádoba proplachována cca 1 min.
- 13.) Body 1 – 12 byly opakovány pro hodnoty objemových procent 9; 8; 7; 6; 5; 4; 3; 2,5; 2,2 a 2.

3.2.2. Postup měření pro plynný vzorek:

Postup byl zcela analogický až na to, že se místo septa využívalo přímého přívodu plynu z tlakové nádoby do měřicího zařízení. Zde se připravovali požadované koncentrace již zmiňovanou metodou parciálních tlaků. Dávkování probíhalo přes jehlový ventil, který zamezil náhlému nárůstu tlaku a tím snížení přesnosti dávkování.

Z bezpečnostních důvodů bylo také důležité prověřit, zda nikde neuniká hořlavý plyn. Místa možného úniku byla hlavně v oblastech připojení těchto hořlavých plynů. Kontrole samozřejmě podlehli i další riziková místa jako například přívod do měřicího zařízení, všechny ventily, a samozřejmě hadice po celé své délce. Měření probíhalo velice jednoduše pomocí přenosného detektoru unikajících plynů, který je zobrazen na obrázku 23. Toto zařízení fungovalo tak, že po zapnutí ihned začalo nasávat hadičkou okolní plyn. Dále se tento plyn analyzoval a vyhodnotil na digitální obrazovce. Tato zařízení se běžně využívají a jsou dostupná.



Obrázek 23: Detektor úniku plynu (Interní materiály OZM Research s.r.o.)

4. Výsledky a diskuze

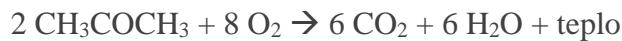
4.1. Ověření funkčnosti zařízení

Ověření funkčnosti zařízení bylo provedeno měřením výbuchových charakteristik acetonu v závislosti na jeho koncentraci. V rámci měřeného rozsahu koncentrací se s rostoucí

koncentrací výbušné směsi zvyšovala rychlost nárustu tlaku. S jistotou lze říci, že provedená měření potvrdila funkčnost měřícího zařízení.

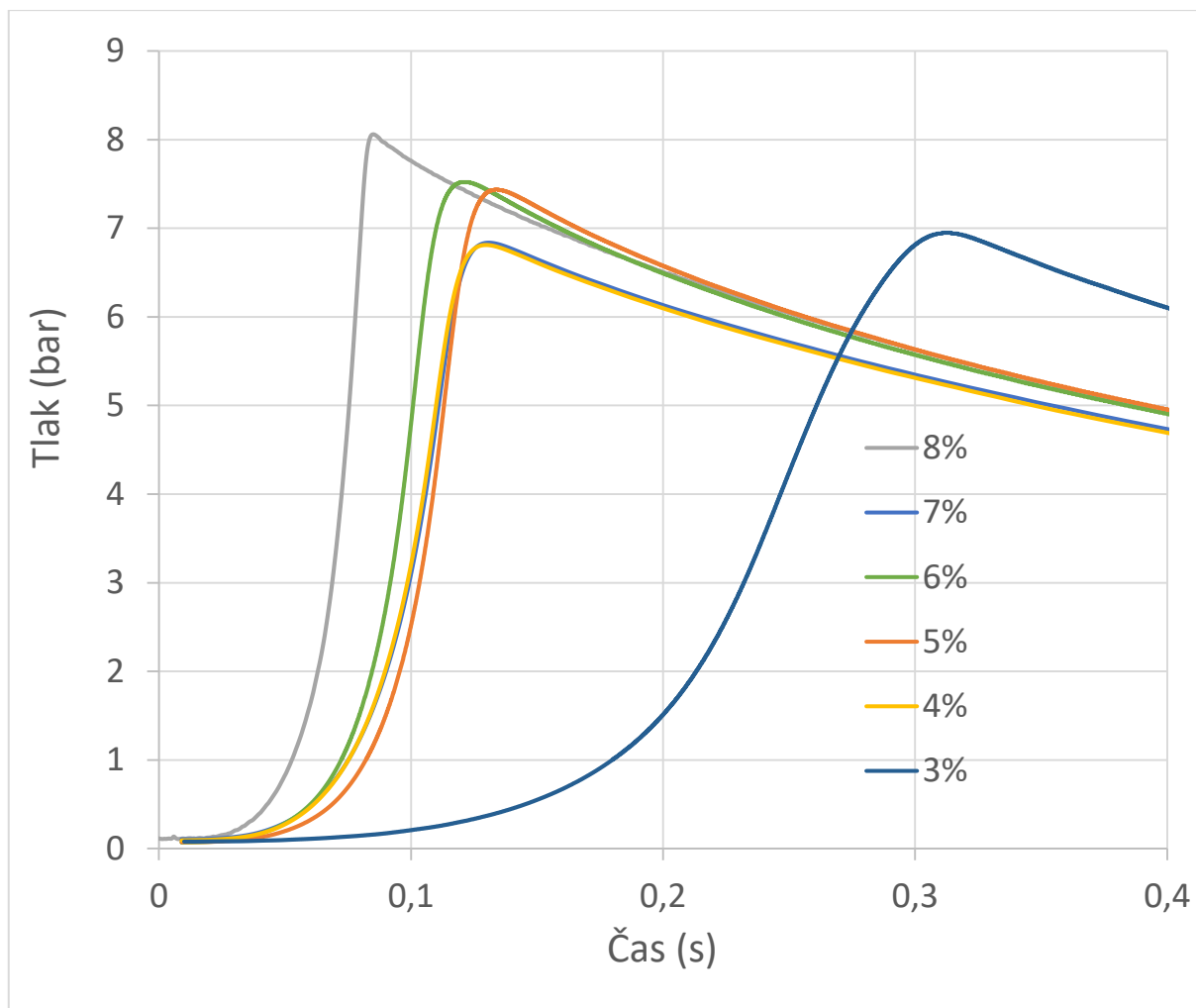
4.2. Výbuchy acetonu

Stechiometrická rovnice spalování acetonu:



Pro co nejpřesnější odměření vzorku byl použit kapalný aceton, který byl dle vypočítaných množství navážen, a zapsán v tabulce 1. K rychlému odpaření v nádobě přispělo vakuum, které bylo předem připravené vývěvou. Kvůli rychlému odparu se obsah nádoby mírně ochladil a díky míchadlu se palivo zhomogenizovalo se vzduchem, který byl postupně připouštěn. Atmosférický vzduch, který se dodával stlačený z kompresoru, byl přiváděn tak, aby se tlak v nádobě rovnal 1 baru. Pro zajištění stejné teploty směsi bylo používáno připojené chlazení/ohřev. Takže výparné teplo, které systém ztratil bylo systému dodáno, a tak veškeré výbuchy probíhaly za stejných podmínek. Naopak po výbuchu probíhalo chlazení proudem natlakovaného vzduchu skrze zařízení a také prouděním tekutiny uvnitř pláště nádoby. Tato tekutina, měla požadovanou standartní teplotu.

Graf 1 obsahuje výbuchové křivky acetonu. Jedná se o průběh tlaku v závislosti na čase. Jsou zde uvedeny výbuchové křivky pro koncentrace od 3 do 8 %.



Graf 1: Výbuchové křivky acetonu pro koncentrace 3 – 8 %

Během měření výbuchů acetonu se ukázal problém s odparem kapalin. Ačkoliv je aceton velice těkavý, nestihl se kompletně před výbuchem odpařit. Přes dlouhé čekací doby se spuštěným míchadlem nebyl zaznamenán dostatečný nárůst tlaku. Příčinu lze hledat v chování kapaliny nakapané do odsáté komory. Kapalina dávkovaná ze stříkačky vytvářela velké kapky, které sice byly rozstříknuty míchadlem na stěny, ale kapky nebyly dostatečně malé pro rychlý odpar. Na obrázku 24 je vidět velikost kapek vytvořených dopadem kapaliny na roztočené míchadlo.



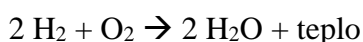
Obrázek 24: Neodpařená kapalina (Interní materiály OZM Research s.r.o.)

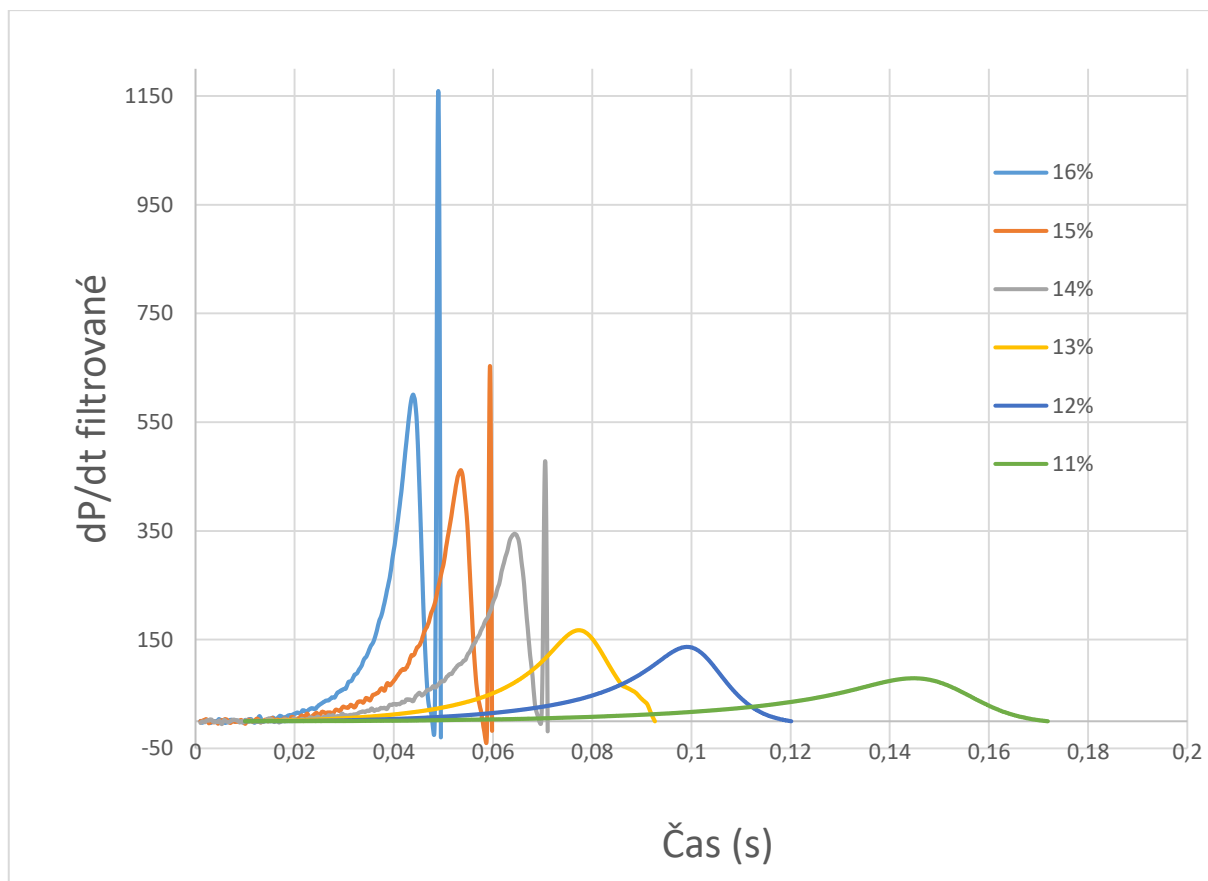
4.3. Výbuchy vodíku

Použité koncentrace byly v rozmezí od 11 do 16 % viz graf 2. Při pozdějších měřeních byla využita koncentrace 31 % viz graf 5.

Při výbuších bylo vidět, jak měli koncentrovanější směsi prudší rychlost nárůstu tlaku a také vyšší hodnotu maximálního tlaku (Graf 2). Poloha inflexního bodu určovala čas při kterém byla dosažena maximální hodnota rychlosti nárůstu tlaku. Po dosažení maximálního tlaku pak tlak klesal, kvůli ochlazení plynné směsi o studené stěny nádoby. Měřené teploty dosahovaly stovek stupňů celsia. Proto se spaliny před vypouštěním nechávaly ochladit, aby nedošlo k poškození plastové výfukové hadice. Polohu a hodnotu maximální měřené rychlosti nárůstu tlaku bylo možné ovlivnit rychlostí vzorkování tzn., že čím více bylo zaznamenaných dat tím přesněji byl graf vykreslen.

Stechiometrická rovnice spalování vodíku:



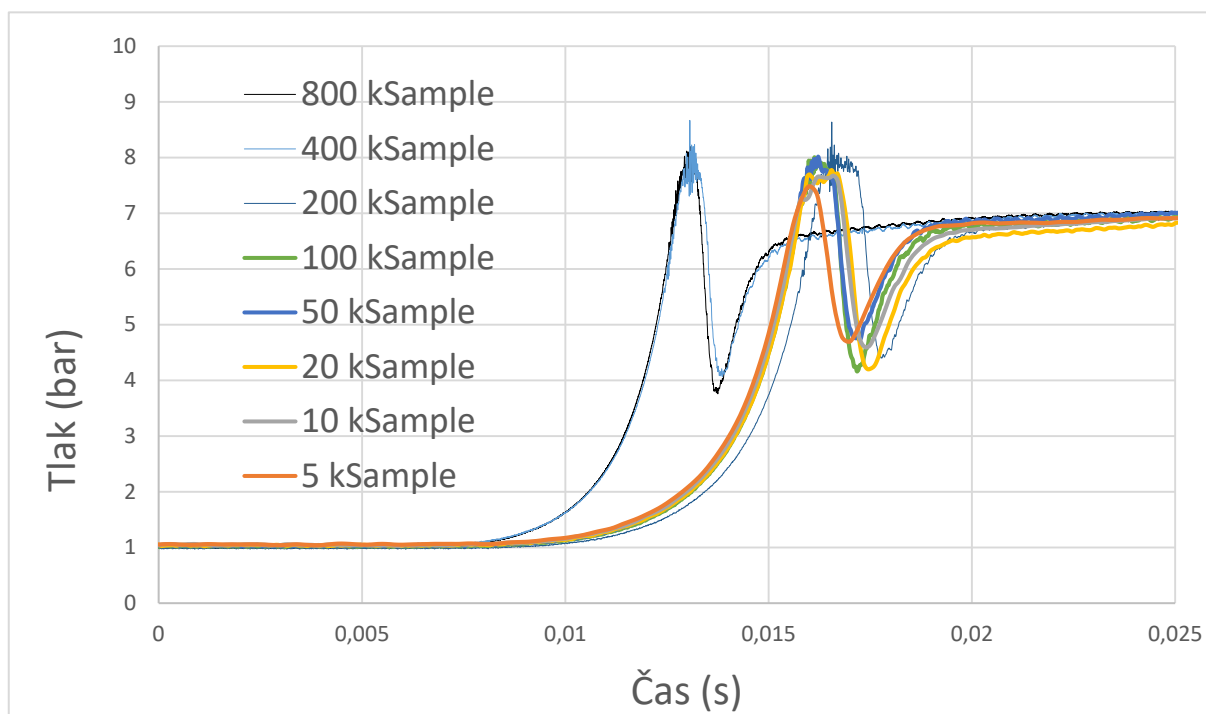


Graf 2: Průběhy nárůstu tlaku vodíku pro koncentrace 11 – 16 %

Plynné vzorky byly dávkovány metodou parciálních tlaků. Po nadávkování potřebného množství vodíku byla směs doplněna stlačeným vzduchem do hodnoty 1 bar. Přípravu směsí usnadňoval program Pm_M-Unity napsaný v softwaru Promotic, který pomáhal vypočítávat obsah paliva a dalších komponent ve směsi. V grafu 2 bylo zřetelně vidět, že s rostoucí koncentrací paliva rostla stejně jako u acetonu rychlost nárůstu tlaku a teploty. Jelikož počet molů při reakci klesal, došlo po ochlazení produktů hoření na pokojovou teplotu k poklesu tlaku v nádobě na hodnotu nižší, než byla před výbuchem.

4.4. Měření vodíku s obsahem 31 % vodíku.

Měření probíhalo za standardních podmínek, ale výbuchové křivky vypadaly jinak než výbuchové křivky pro aceton a než by skutečně vypadat měly. Výbuchové křivky jsou uvedeny v grafu 3.

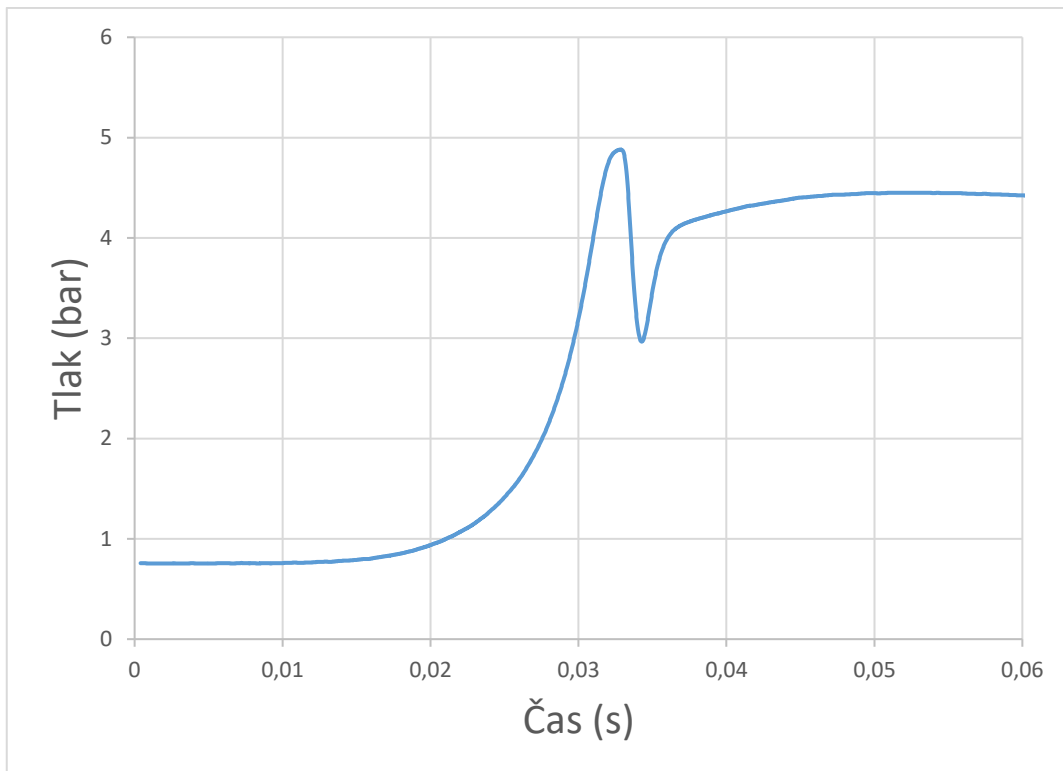


Graf 3: Špatný průběh křivky způsobený kanálkem čidla (31 % vodíku, 5 - 800 kS)

Grafy 3 a 4 ukazovaly průběh výbuchové křivky se dvěma tlakovými maximy, kdy po prvním maximu následoval pokles tlaku na hodnoty nižší, než byl tlak před druhou tlakovou špičkou následovaný opětovným nárustem tlaku na hodnotu odpovídající očekávanému tlakovému průběhu. Průběh ukazoval značnou podobnost s rázovou vlnou vytvořenou detonací testované směsi. Bylo vytvořeno několik teorií zdůvodňujících tento průběh, které se ovšem následnými testy nepotvrdily.

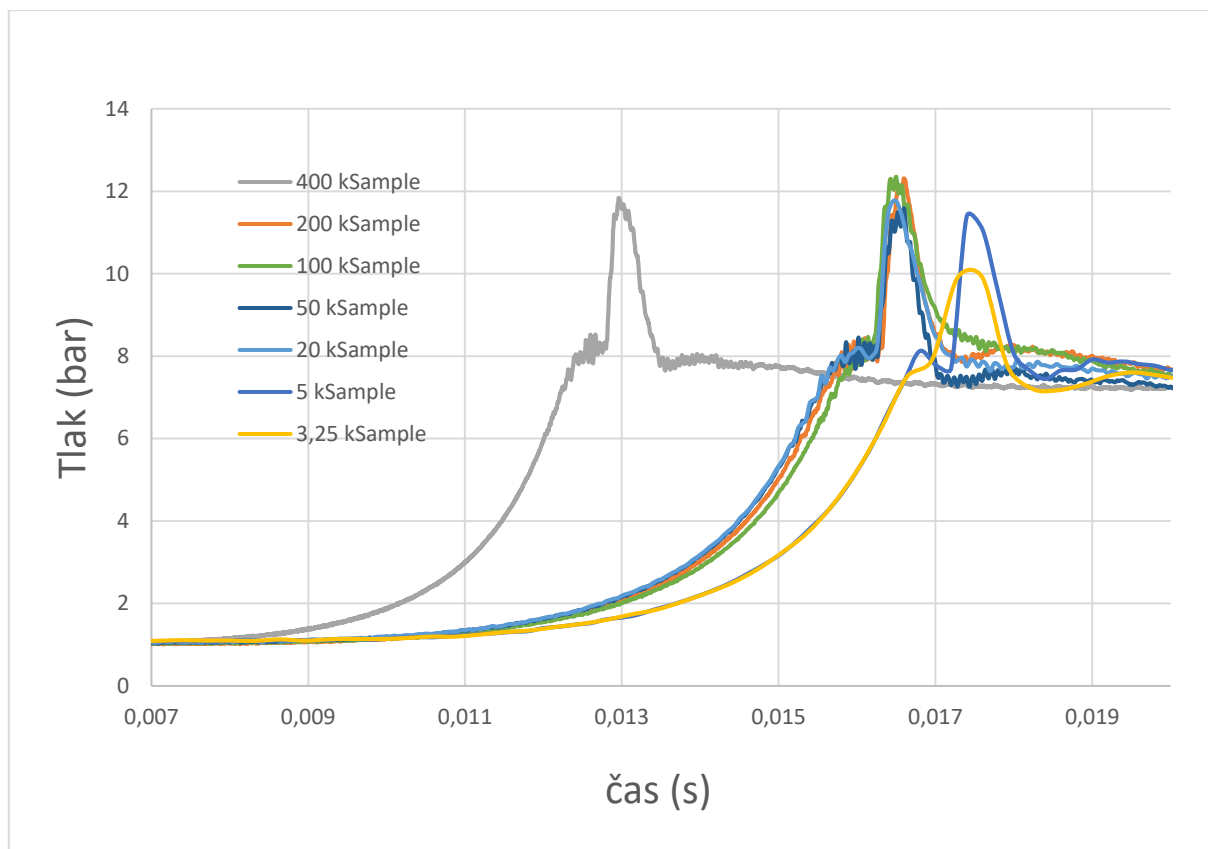
Všechny teorie se snažily vysvětlit jak k přechodu od hoření do detonace (DDT) mohlo dojít. Jednou z teorií byla geometrie míchadla vytvářející drobný uzavřený prostor pod míchadlem, a tedy potenciál pro urychlení hoření a přechod do detonace. Tato teorie byla vyvrácena testem s vyvýšeným uložením míchadla. Další teorií byly procesy urychlení hoření v kanále před tlakovým čidlem, vedoucí až přechodu do detonace. Podobný efekt byl popsán ve zprávě projektu SAFEKINEX (BAM, 2002), kde tuto extra špičku tlaku přisoudili sekundárnímu výbuchu v kanálu před čidlem. Po analýze signálu se však ukázala další možná příčina, kterou je rezonance čidla při frekvenci odpovídající vibraci komory (55 - 65 kHz).

Problém s druhou špičkou se však objevoval i při nižších koncentracích. Příkladem je graf 4, kde je uvedena výbuchová křivka směsi 20 % vodíku se vzduchem.



Graf 4: Výbuchová křivka 20 % vodíku se vzduchem.

Na základě výsledků měření byl upraven kanál před tlakovým čidlem. Průměr 6 mm byl zvětšen na 8 mm a délka kanálu 8 mm byla zkrácena na 65 mm. Ověření úpravy bylo provedeno při koncentraci 31 % vodíku ve vzduchu. Rozmezí měření bylo od 5 kSample až do 400 kSample (graf 5). V tomto grafu si lze povšimnout, že měření při 3,25 kSample bylo nedostačující oproti oblasti vzorkování 20 - 200 kSample. Oblast 20 - 200 kSample splývala. Naopak měření při 400 kSample poukazovala na rychlejší průběh děje.



Graf 5: Vliv rychlosti vzorkování pro směs s obsahem 31 % vodíku (3,25 – 400 kS).

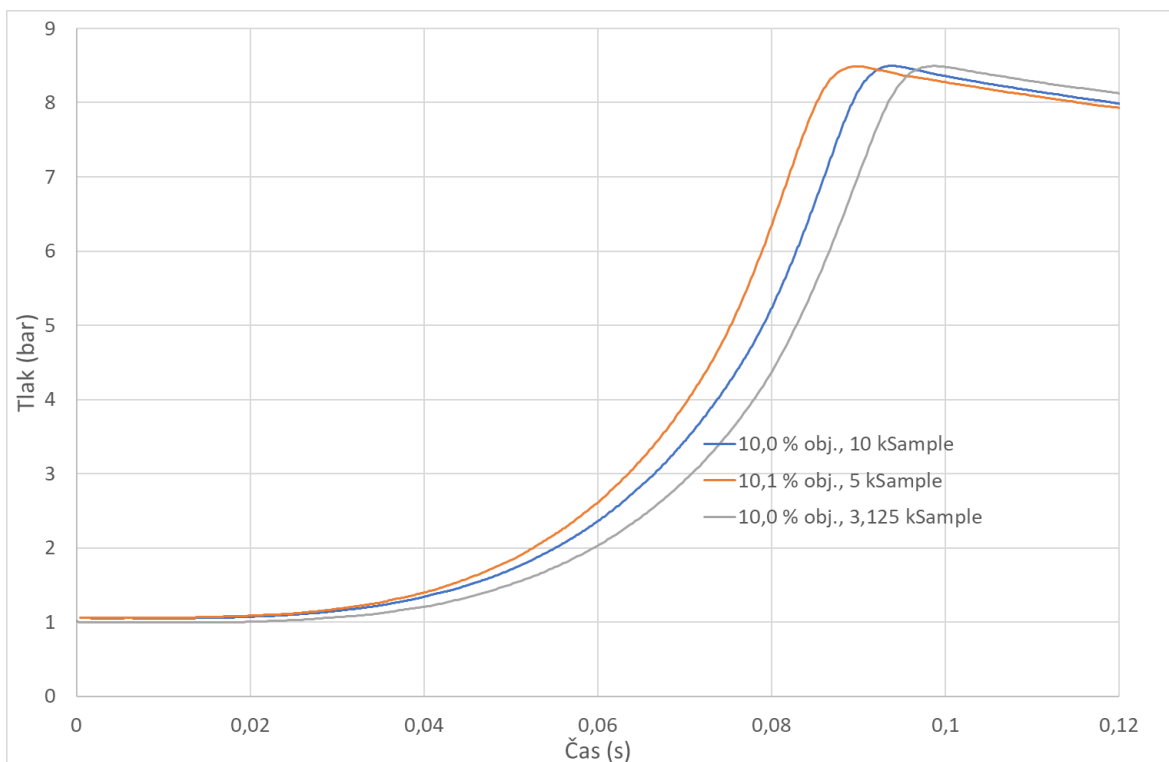
4.5. Měření s metanem

Protiváhou jednomu z nejreaktivnějších plynů, jakým byl vodík, byly experimenty s jedním z nejméně reaktivních plynů, a to metanem.

Rovnice pro spalování metanu:

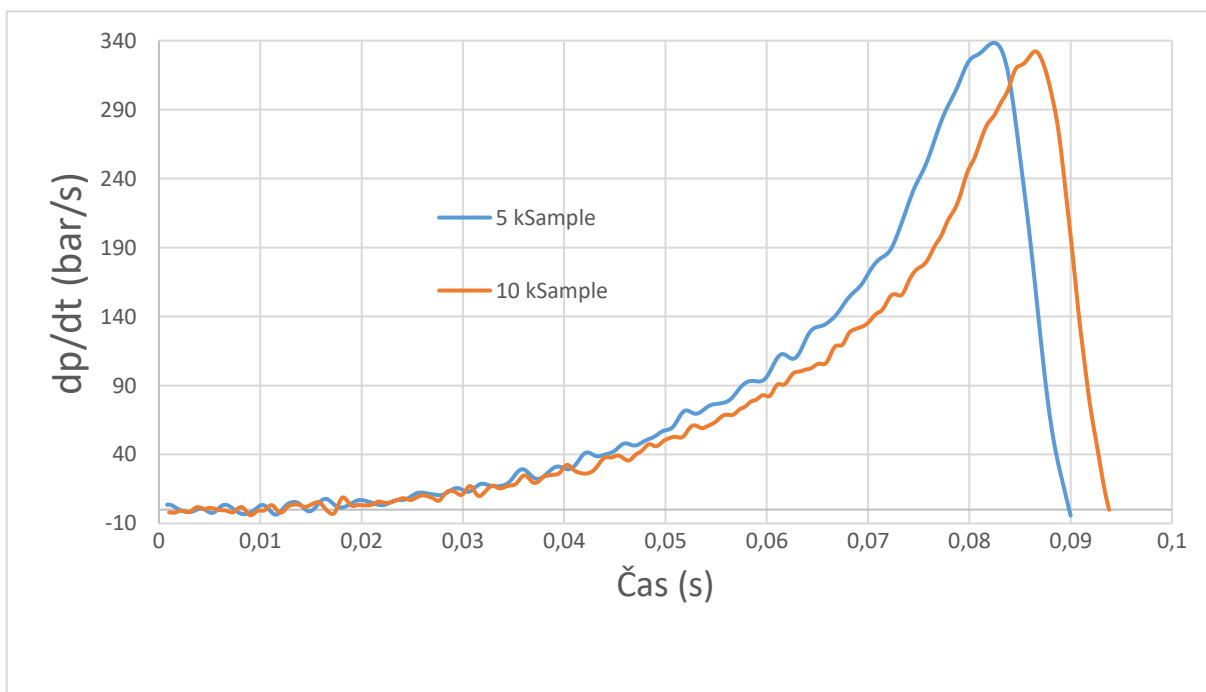


Graf 6 zobrazoval průběh tlaku v závislosti na čase při spalování metanu s koncentrací 10 % při 10, 5 a 3,125 kSample. Není zde žádná pozorovatelná změna ve výšce nebo průběhu křivky.

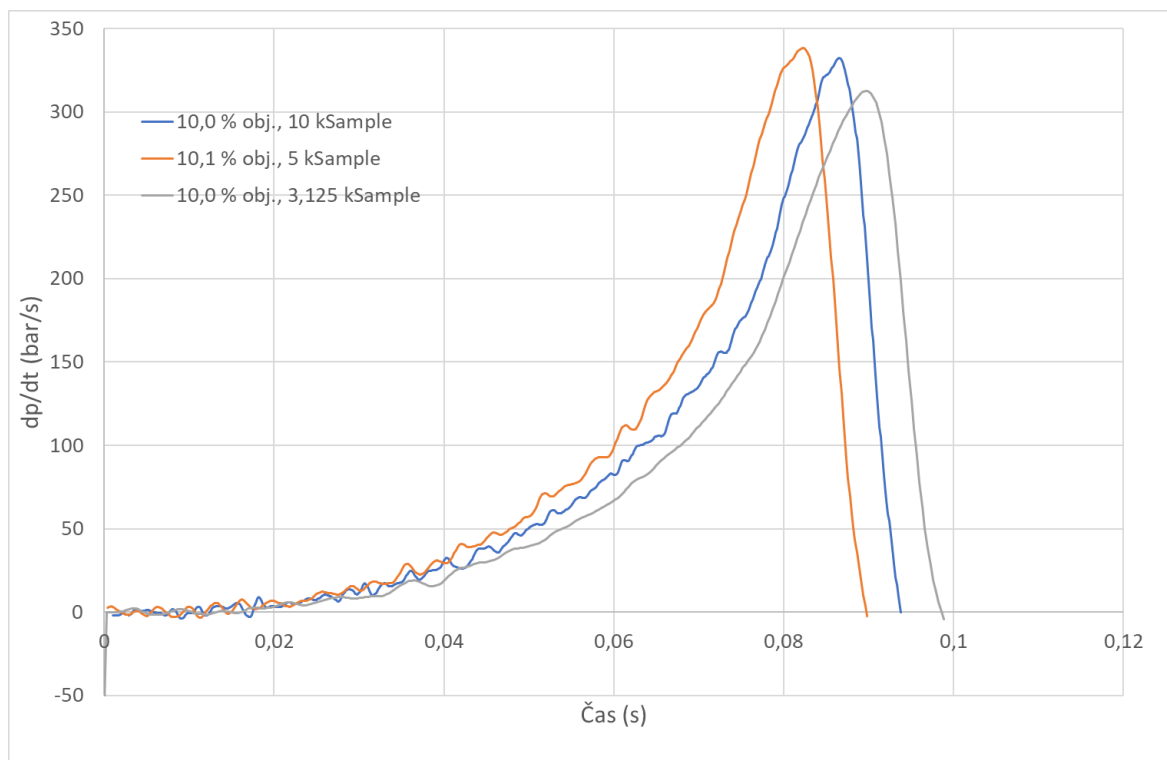


Graf 6: Vliv rychlosti vzorkování pro metan

Obdobně jako probíhalo měření v grafu 6, probíhalo i měření grafu 7, zde ale jen s 5 a 10 kSample.



Graf 7: Vliv vzorkování 5 a 10 kSample



Graf 8: Vliv počtu vzorkování pro metan, rychlost nárůstu tlaku

U grafu 7 byl měřen rozdíl v nárůstu tlaku u metanu, kde bylo měřeno při koncentraci 10 %. Modrá křivka znázorňovala 5 kSample za vteřinu, kdežto oranžová 10 kSample. Měření probíhalo analogicky jako u vodíku. Další měření vzorků (graf 8) nemělo velký smysl, všechny křivky při stejném složení vypadali téměř identicky. Z toho vyplývá, že pro takto málo reaktivní plyny nemá smysl zvyšovat rychlost vzorkování.

Jako na stěžejní bych chtěl poukázat, že norma stanovuje pro obsah vodíku 35 % ($\pm 0,3$ %) při 25°C a tlaku 1 bar maximální rychlost nárůstu tlaku jako 2965 ± 202 bar/s. V případě této práce byl měřen vodík o koncentraci 31 %. A za stejných podmínek bylo naměřeno při 400 kSample 4773 bar/s (viz tabulka 2). Poté při 800 kSample nenastal velký rozdíl od 400 kSample (ale i tak se hodnoty odklonily od normy).

Počet kSample	dP/dt (bar/s)
minimum stanovené normou	2965
5	1918
10	2762
20	3452
50	3800
100	4044
400	4773

800	4779
-----	------

Tabulka 2: Rychlost nárůstu tlaku v závislosti na rychlosti vzorkování pro směs obsahující 31 % vodíku

Za stejných podmínek byl měřen i metan o obsahu $10 \pm 0,2$ %. Zde zvyšování počtu vzorkování nemělo nijak extrémní vliv.

Počet kSamplů	dP/dt (bar/s)
minimum stanovené normou	$249,22 \pm 14,11$
3,125	314
5	331
10	335

Tabulka 3: Rychlost nárůstu tlaku v závislosti na rychlosti vzorkování pro směs obsahující 10 % metanu.

Metan byl měřen ve dvanáctilitrové nádobě a vodík ve dvacetilitrové (analogická ke dvanáctilitrové).

5. Závěr:

V úvodu bakalářské práce byly vysvětleny základní pojmy a podmínky pro výbuch. Následně zde byly popsány důležité normy, zejména norma EN 15967. Tato norma, jenž se týkala pracovních postupů a požadavků na zařízení byla pečlivě dodržována. Dále byla věnována pozornost A/D a D/A převodníkům, aby bylo patrné, že se nezanedbal žádný negativní vliv na kvalitu signálu. V další části práce bylo popsáno měřící zařízení a práce s ním. Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, zda má rychlost vzorkování vliv na tlakový nárůst výbuchu. Jednalo se pouze o plynné směsi, které byly rovnoměrně rozprostřeny uvnitř nádoby. Experimentální měření bylo prováděno ve spolupráci se společností OZM Research s.r.o. Experimentální měření proběhlo v souladu se všemi dalšími normami. Tyto normy se týkaly mimo jiné bezpečnosti a pracovních podmínek. Po popisu výbuchové křivky, a dalších nezbytných pojmů následovalo vytvoření a vyhodnocení grafů z naměřených hodnot. Z vytvořených grafů a hlavně tabulky 2 bylo prokazatelné, že vliv rychlosti vzorkování byl velmi znatelný zejména pro velice reaktivní plyny jako byl například vodík. Díky zvýšenému počtu vzorků (až 800 kSampů za vteřinu) se nám podařilo dokonaleji vykreslit výbuchové křivky. Z nich bylo možné vyčíst vyšší hodnoty nárůstu tlaků, než byly uvedené v normě. Naopak, kdyby bylo měřeno při nižším počtu vzorků za vteřinu, tak by normu splňovali, a chovali se stejně jako méně reaktivní plyny. Vyšší hodnoty vzorkování, díky citlivějšímu čidlu, také doprovázel šum s vyšší frekvencí, než by byl při nižší rychlosti vzorkování, tento šum byl filtrován. Téma této práce by bylo vhodné zkoumat i nadále, protože norma ČSN EN 15967 je platná jen pro některé, zejména méně reaktivní plyny a také za určitých podmínek.

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Výbuchový trojúhelník.....	11
Obrázek 2: Výbuchový pětiúhelník (Šimoníková, 2014).....	12
Obrázek 3: Ternární diagram (Zámostný, 2009).....	13
Obrázek 4: Válec vytvářející svou rotací statickou elektřinu (Šimoníková, 2014).....	14
Obrázek 5: Zaprášené chladiče u PC (Dukovský, 2020).....	15
Obrázek 6: Těleso, které při úpravě kovů vytváří jiskry (Šimoníková, 2014).....	15
Obrázek 7: Výboj (Šimoníková, 2014).....	16
Obrázek 8: Průběh výbuchu (Chlebková, 2010).....	17
Obrázek 9: Graf vlivu rozdílné koncentrace vzorku (Celner, 2019).....	18
Obrázek 10: Hartmanova trubice (Cebák, 2017).....	20
Obrázek 11: Nákres výbuchového autoklávu (Cebák, 2017).....	21
Obrázek 12: Výbuchový autokláv (Cebák, 2017).....	21
Obrázek 13: Godbert – Greenwaldova pec (Cebák, 2017).....	22
Obrázek 14: Jiskra mezi elektrodami (Jankůj, 2019).....	23
Obrázek 15: Wolframové elektrody (Interní materiály OZM Research s.r.o.).....	23
Obrázek 16: Tenzometrické čidlo (Interní materiály OZM Research s.r.o.).....	24
Obrázek 17: A/D převodník (Wikipedia, 2020).....	25
Obrázek 18: D/A převodník (Wikipedia, 2020).....	26
Obrázek 19: Původní signál (Wikipedia, 2020).....	27
Obrázek 20: Znovu složený signál (Wikipedia, 2020).....	27
Obrázek 21: Dvanáctilitrové zařízení, ve kterém byly prováděny výbuchy – uzavřené (Interní materiály OZM Research s.r.o.).....	30
Obrázek 22: Dvanáctilitrové zařízení, ve kterém byly prováděny výbuchy – otevřené (Interní materiály OZM Research s.r.o.).....	31
Obrázek 23: Detektor úniku plynu (Interní materiály OZM Research s.r.o.).....	34
Obrázek 24: Neodpařená kapalina (Interní materiály OZM Research s.r.o.).....	37

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Výsledky navažovaných hmotností.....	Chyba! Záložka není definována.
Tabulka 2: Rychlost nárůstu tlaku v závislosti na rychlosti vzorkování pro směs obsahující 31 % vodíku.....	44
Tabulka 3: Rychlost nárůstu tlaku v závislosti na rychlosti vzorkování pro směs obsahující 10 % metanu.....	44

Seznam grafů:

Graf 1: Výbuchové křivky acetonu pro koncentrace 3 – 8 %.....	36
---	----

Graf 2: Průběhy nárůstu tlaku vodíku pro koncentrace 11 – 16 %	38
Graf 3: Špatný průběh křivky způsobený kanálkem čidla (31 % vodíku, 5 - 800 kS)	39
Graf 4: Výbuchová křivka 20 % vodíku se vzduchem.	40
Graf 5: Vliv rychlosti vzorkování pro směs s obsahem 31 % vodíku (3,25 – 400 kS).	41
Graf 6: Vliv rychlosti vzorkování pro metan.....	42
Graf 7: Vliv vzorkování 5 a 10 kSample	42
Graf 8: Vliv počtu vzorkování pro metan, rychlost nárůstu tlaku	43

Seznam zkratk a symbolů:

MIE	Minimální iniciační energie
EN	Evropská norma
ISO	International Organization for Standardization
LEL	Dolní mez výbušnosti (lower explosion limit)
UEL	Horní mez výbušnosti (upper explosion limit)
IEC	"International Electrotechnical Commission" (mezinárodní elektrotechnická komise)
kS	Kilosample = tisíc vzorků za jednotku času
Tzn.	To znamená
J	Joule
n	Látkové množství
V	Objem plynné směsi
V _m	Molární objem
m	Hmotnost
M	Molární hmotnost
ρ	Hustota
Atp	A tak podobně

Seznam použité literatury:

A. Vojáček (2007), <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007012601>

A. Vojáček (2017), <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>

BAM (2002), Report on the experimentally determined explosion limits, explosion pressures and rates of explosion pressure rise – Part 1: methane, hydrogen and propylene, Contract No. EVG1-CT-2002-00072

D. Stamps, E. Cooper III, R. Egbert, S. Heerdink, V. Stringer (2009), *Pressure rise generated by the expansion of a local gas volume in a closed vessel*

E. O. Jacobs, C. Aimone-Martin, B. Meins (2019), *Influence of Sample Rate on Underwater Blast Pressure Measurements*

Evropská komise (2003) <https://docplayer.cz/2141038-Komise-evropskych-spolecenstvi-sdeleni-komise.html>

https://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk

https://cs.wikipedia.org/wiki/D/A_p%C5%99evodn%C3%ADk

<https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=2000>

<https://training.ti.com/ti-precision-labs-adcs?context=1140267-1128375>

<https://www.ti.com/data-converters/adc-circuit/high-speed/learning-center.html>

<https://www.ti.com/data-converters/adc-circuit/precision-adcs/learning-center.html>

CHEMAGazín (2006), <https://www.bozpinfo.cz/pozarne-technicke-charakteristiky-prachu-jejich-vyznam-v-technicke-praxi>

I. Šimoníková (2014), <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/10972-zpusoby-ochrany-pred-vybuchem-cast-1-primarni-protivybuchova-ochrana>

Interní materiály OZM Research s.r.o.

J. Cebak (2017), <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/69054/F2-DP-2017-Cebak-Jiri-priloha-Navrh%20linky%20na%20zpracovani%20praskoveho%20materialu%20-%20Priloha%204%20Testovani%20vybuchovych%20vlastnosti.pdf?sequence=7&isAllowed=y>

J. Celner, J. Skřínský (2019) <https://www.bozpinfo.cz/josra/vybuchove-parametry-smesi-alkoholu-se-vzduchem>

- J. Celner, Jan Skřínský (2019) <https://www.bozpinfo.cz/josra/vybuchove-parametry-smesi-alkoholu-se-vzduchem>
- J. Dřínovský, T. Frýza, V. Růžek, J. Lapčík (2012), *Radioelektrická měření*, ISBN 978-80-214-4495-9
- J. Dukovský (2020), <https://www.duk-pc.com/pc-servis-brno/cisteni-pocitace-od-prachu/>
- J. Formánek (2014), <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvuka/Data/kmitani/uvod.htm>
- L. Máčalík (2012), http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/93093/MAC841_FEI_B2647_2612R059_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- M. Pavčo (2015), https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109190/PAV0112_FMMI_B3923_3911R034_2015.pdf?sequence=1
- M. Skotak, E. Alay, N. Chandra (2018), *On the Accurate Determination of Shock Wave Time-Pressure Profile in the Experimental Models of Blast-Induced Neurotrauma*
- M. Šícha, M. Tichý (1998), *Elektronické zpracování signálů*
- P. Čičmanec, M. Hájek, H. Drobná, K. Frolich (2016), *Fyzikální chemie pro bakalářské studium*, ISBN: 978-80-7560-006-6
- P. Chlebková (2010), http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/79056/CHL097_FBI_N3908_3908T002_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- P. Zámotný (2009) <http://www.zamostny.net/wp-content/uploads/2009/10/2009-03-rizika-horlavych-a-vybusnych-latek.pdf>
- V. Jankůj, A. Bernatík (2019), https://kpo.tuzvo.sk/sites/default/files/delta_2019_13_2_61.pdf
- W. Barknecht (1989), *Dust explosions: course, prevention, protection*, ISBN:10:3642739474
- W. Bartknecht (1981), *Explosions: course, prevention, protection*, Berlin: springer Verlagve, ISBN: 3540102167