


# Štúdium výbuchových parametrov disperzie pracho-vzduchových zmesí zmenou molekulovej štruktúry

 30.09.2019

**Study of the explosion parameters of the powder-air dispersions by the change of the molecular structure**

**Matej Váňa<sup>1</sup>, Jan Skřínský<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB-TU Ostrava, Lumírova 630/13, 700 30 Ostrava, Česká republika; tel. +420 601 338 916, e-mail: [matej.vana.st@vsb.cz](mailto:matej.vana.st@vsb.cz)

<sup>2</sup>Výzkumné energetické centrum, VŠB-TU Ostrava, 17. Listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava, Česká republika; tel. +420 597 324 931, e-mail: [jan.skrinsky@vsb.cz](mailto:jan.skrinsky@vsb.cz)

kyseliny

výbuchové charakteristiky

bróm

## Abstrakt

Hlavným cieľom práce je analyzovať a experimentálne potvrdiť vplyv zmeny molekulovej štruktúry pyridín-3-karboxylovej kyseliny na jej výbuchové parametre naviazaním atómu brómu do jej štruktúry v pevnom skupenstve. V rámci práce bola vykonaná validácia experimentálnej aparatury pre meranie parametrov pri výbuchu prachovzduchovej disperzie, optimalizovanie meracích systémov výbuchovej komory a analýza závislosti parametrov pri výbuchu na počiatočných podmienkach. Nad rámec práce bol stanovený a diskutovaný vplyv iniciačného zdroja a rozvírovacieho systému na hodnoty pri výbuchu parametrov oboch chemických látok. Originalitou práce je kvantitatívne zhodnotenie parametrov pri výbuchu kyseliny a zlúčeniny, ktorá je vytvorená z tejto kyseliny náhradou atómu vodíka atómom brómu. Práca prepája základný a aplikovaný výskum a vedie k realizácii tzv. aplikačne zameraného základného výskumu.

**Klíčová slova:** Výbuchové parametre, kyselina, bróm, výbuchová komora

## Abstract

The main aim of the article is to analyze and experimentally confirm the effect of the change of the pyridine-3-carboxylic acid molecular structure on its explosion parameters by adding the bromine atom to its structure in the solid state. In the framework of the work, the experimental apparatus was validated to measure the explosion

parameters of the dust-air dispersion, optimize the measurement systems of the explosion chamber and analyze the dependence of the explosion parameters on the initial conditions. Above and beyond the scope of the work, the influence of the initiation source and the booster system on the values of the explosion parameters of both chemicals was determined and discussed. The originality of the work is a quantitative evaluation of the acid and compound explosion parameters, which is formed from this acid by the replacement of a hydrogen atom with a bromine atom. The article interconnects basic and applied research and leads to the implementation of so-called application-oriented basic research.

**Keywords:** Explosion parameters, acid, bromine, explosion vessel

Přijat k publikování / Received for publication 19. 4. 2019

## 1. Úvod

Prášky alebo prachové látky sú súčasťou mnohých priemyselných odvetví. Bez ohľadu na to či je prach produktom výroby alebo ako odpad, veľká väčšina prachov predstavuje nebezpečenstvo požiaru alebo výbuchu. Prachová vrstva hrúbky 1 mm v uzavretej miestnosti je dostatočná na to, aby spustila výbuch keď sa prach rozvíri a zapáli. Tieto fakty v kombinácii s tým, že postihnuté osoby nevedia o hroziacom nebezpečenstve (na rozdiel od nebezpečenstva výbuchu plynov) zdôrazňujú dôležitosť prevencie výbuchu prachu. Horľavé prachy môžu predstavovať rôzne nebezpečenstvo výbuchu. Nebezpečenstvo výbuchu horľavých prachov zahŕňa široké spektrum materiálov, odvetví a procesov. Akýkoľvek horľavý materiál vo forme prachu dokáže rýchlo vzplanúť. Všetky prachy menia svoje výbuchové parametre v závislosti na zrnitosti (čím jemnejší prach, tým razantnejší výbuch). Z dôvodu veľkého počtu faktorov ovplyvňujúcich zapáliteľnosť nie je možná exaktná definícia horľavosti látok a látkových zmesí použiteľná pre protipožiaru a protivýbuchovú ochranu. S istým obmedzením je možné povedať, že látky sú horľavé pokiaľ ich je možné v zmesi so vzduchom zapáliť. Pri stanovení nebezpečenstva požiaru a výbuchu je bežné látky a zmesi látok odstupňovať podľa teploty vzplanutia (kvapalné látky) a podľa teploty vznietenia (plynné látky a prachy v zmesi so vzduchom), pričom je potrebné brať do úvahy možnosť zmeny vlastností látok a zmesí látok pri miešaní s inými látkami, prípadne u pevných látok pri zmene veľkosti a tvaru častíc. Horľavé prachy môžu predstavovať rôzne nebezpečenstvo výbuchu. Nebezpečenstvo výbuchu horľavých prachov zahŕňa široké spektrum materiálov, odvetví a procesov. Akýkoľvek horľavý materiál vo forme prachu dokáže rýchlo vzplanúť. Všetky prachy menia svoje výbuchové parametre v závislosti na zrnitosti (čím jemnejší prach, tým razantnejší výbuch). Veľkosť prachových častíc je najdôležitejším faktorom, existujú však aj ďalšie dôležité faktory ovplyvňujúce priebeh explózie. Chemické zloženie - chemické zloženie prachu ovplyvňuje ako termodynamiku tak aj kinematiku, čo súvisí s množstvom tepla uvoľneného počas výbuchu a s rýchlosťou, akou sa teplo uvoľňuje. Niektoré prachy, v závislosti od ich chemického zloženia, majú väčšie spalné teplo na jeden mol  $O_2$ . To platí hlavne pre anorganické látky, čo znamená že výbuchové parametre látok anorganických v porovnaní s látkami organickými sú omnoho vyššie. Počiatočná teplota a tlak - zo zákona ideálneho plynu vyplýva, že po zvýšení počiatočnej teploty sa maximálny výbuchový tlak zníži. To je spôsobené znížením koncentrácie kyslíka na jednotku objemu prachového oblaku pri danom tlaku s rastúcou počiatočnou teplotou. Na druhú stranu, pri zvyšovaní počiatočnej teploty klesá minimálna výbušná koncentrácia prachu. Veľkosť častíc - Pri rastúcej veľkosti prachových častíc sa znižuje merný povrch látok, takže klesajú výbuchové parametre. Väčšina prachov nie je schopná iniciácie pokiaľ stredná veľkosť častíc presahuje 0,4 mm. Je potrebné si uvedomiť, že pri pridaní 5-10% látky o strednej veľkosti častíc menšej ako 0,04 mm sa zmes stáva výbušnou. Nevýbušný prach sa môže stať výbušným v prípade, že sa postupom času zmenší stredná veľkosť látok z dôvodu obrúsenia. Rozptýlenie prachu a turbulencia prachového oblaku - počiatočná turbulencia je turbulencia vytvorená pri výrobnom procese, v ktorom sa nachádza prach v zariadení. Pri vykonávaní experimentu v uzavretej nádobe sa prachový oblak vytvorí krátkym vzduchovým impulzom, ktorý prach rozvíri v priestore. V počiatočnom štádiu rozptýlenia prachu je turbulencia pomerne vysoká. Veľmi turbulentný oblak bude mať rovnomernejšie rozptýlený prach v priestore a bude horieť s vyššou intenzitou. Z tohoto dôvodu vyššia turbulencia oblaku spôsobuje intenzívnejší výbuch. Koncentrácia prachu - rozsah výbušných koncentrácií sa v prípade rozličných prachov líši. Pri žiadnom prachu však výbuchové parametre nie

sú konštantné a líšia sa z závislosti na koncentrácií. Iniciačná energia – s veľkosťou počiatkovej iniciačnej energie dochádza k nárastu predovšetkým maximálnej rýchlosti nárastu výbuchového tlaku. Pri príliš nízkej iniciačnej energii nie je možná iniciácia niektorých zmesí [1-4].

## 2. Popis prístroja

Výbuchová komora je dvojplášťová nádoba guľového tvaru o objeme 0,020 m<sup>3</sup>. Nádoba je opatrená otvorom o priemere 145 milimetrov, ktorým je zabezpečený prístup do vnútra nádoby. Na uzavretie nádoby slúži príruha so zámkom na uzamknutie veka. Materiál použitý na výrobu nádoby je nerezová oceľ. Maximálny prevádzkový tlak autoklávu je 3 MPa, pričom autokláv bol podrobený hydraulickému testu pri tlaku 4 Mpa. Na výbuchovej komore sa nachádza jeden systém na rozvírenie prachu do priestoru. Tento systém pozostáva z nádoby na prach o objeme 0,6 dm<sup>3</sup>, potrubia o priemere 20 mm a rozprašovaču prachu. Nádoba je spojená s rýchloventilom, ktorého otvárací čas je kratší ako 25 ms. Prach opúšťa komoru cez tento rýchloventil a prepojavacím potrubím sa dostáva do komory pomocou rozprašovacej trysky. Na rozvírenie prachu vo výbuchovej komore sa používajú dva typy trysiek: tryska so spätným odrazom (rebound nozzle) a ohnutá rozvírovacia rúrka. Pre meranie výbuchových parametrov je v komore inštalovaný systém merania dynamického tlaku pomocou dvoch tlakových čidiel a takisto systém snímania intenzity svetla vygenerovaného pri horení testovaného vzorku. Na snímanie tlaku sa používajú piezoelektrické tlakové čidlá, ktoré vytvárajú elektrický signál na základe tlaku vyvíjaného na kremenný kryštál. Tento elektrický signál je spracovaný a prevedený na tlak. Chemické iniciátory – pri použití chemických iniciátorov používame dva chemické palníky, z ktorých každý má energiu 5 kJ, pričom celková hmotnosť je 2,4 gramu. Palníky sú umiestnené v strede výbuchovej komory a iniciujú od seba. Napájací obvod musí byť schopný odpáliť palníky v čase do 10 ms. Indukčná iskra – vzniká medzi elektródami ktoré majú rôzny potenciál. Ako vhodný materiál pre elektródy sa odporúča používať nerezová oceľ avšak pri pokusoch bolo zistené, že oceľ nemá príliš veľkú životnosť, kvôli čomu sa používa oceľ. Elektródy sú umiestnené v strede nádoby a majú priemer 4 mm. Vzďalenosť medzi špičkami elektród musí byť nastavená na  $5 \pm 0,1$  mm. Uhol špičiek elektród je 60°. Pred zahájením merania je potrebné si pripraviť požadované množstvo testovaného prachu, ktorý sa vloží do zásobníka. Po vložení prachu sa zásobník natlakuje na 20 barov. Následne je potrebné zmerať a zaznamenať teplotu vo vnútri komory. Pri zahájení rozvírenia prachu do komory objemu 0,020 m<sup>3</sup> musí byť v komore atmosférický tlak a takisto musí byť zmeraný a zaznamenaný skutočný tlak v komore pri iniciácii ( $p_1$ ). Aby bolo zabezpečené správne natlakovanie, nesmie objem prachu prekročiť  $\frac{3}{4}$  objemu zásobníku, V prípade že je potrebné dodanie väčšieho množstva prachu vyžaduje sa paralelné použitie dvoch rozvírovacích zariadení a zásobníkov. Zaznamenáva sa časový priebeh tlaku a následne sa z krivky závislosti tlaku na čase stanoví výbuchový tlak. Tlak v komore zaznamenávajú dva tlakové snímače. Výsledný výbuchový tlak sa stanoví vypočítaním aritmetického priemeru tlakov nameraných na oboch snímačoch. Pokiaľ rozdiel tlakov nameraných na snímačoch presiahne 10%, je potrebné skontrolovať presnosť snímačov a meranie opakovať. Za výbuch prachu môžeme považovať situáciu keď nameraný pretlak v komore je od počiatkovej tlaku väčší aspoň o 0,5 barov [ $p_{ex} \geq (p_1 + 0,5 \text{ bar})$ ]. Postup sa aplikuje pri meraní prachovej koncentračnej rady. Meranie sa začína s koncentráciou 250 g/m<sup>3</sup> a zvyšuje sa v krokoch po 250 g/m<sup>3</sup>, poprípade znižuje vždy na 50% predchádzajúcej koncentrácie. Keďže meranie sa uskutočňuje v komore o objeme 20 dm<sup>3</sup>, je potrebné koncentráciu prepočítať a previesť na objem 20 dm<sup>3</sup>. Pre každú jednu koncentráciu sa stanoví výbuchový tlak  $p_{ex}$ . Tieto hodnoty sa zaznačia do grafu v závislosti na koncentrácií, z čoho sa určí maximálny výbuchový tlak  $p_{max}$ . Výbuchový tlak musí byť stanovený pre minimálne dve nasledujúce koncentrácie na oboch stranách od koncentrácie, ktorá má maximálnu hodnotu výbuchového tlaku. V prípade, že nie je možné definitívne určiť maximálnu hodnotu, je potrebné meranie koncentračnej rady aspoň raz opakovať, pričom výsledkom bude aritmetický priemer maximálnych hodnôt v každej rade. Takisto sa postupuje v prípade určenia maximálnej hodnoty rýchlosti nárastu výbuchového tlaku [5].

### 3. Charakteristika použitých látok

Kyselina nikotínová, tiež známa ako niacín, je bezfarebná organická zlúčenina bez zápachu a forma vitamínu B3, ktorý je základnou ľudskou živinou. Má vzorec  $C_6H_5NO_2$ . Patrí do skupiny pyridínkarboxylových kyselín. Je vo vode rozpustná a vyskytuje sa v mnohých živočíšnych a rastlinných tkanivách [6]. Kyselina nikotínová sa takisto používa na kalibráciu výbuchovej komôr. Kyselina 5-brómnikotínová sa vyskytuje ako biely, žltkastobiely až sivobiely prášok. Má široké využitie ako medziprodukt pre agrochemikálie, doplnky výživy, liečivá, poprípade ako nicergolín. Je nekompatibilná so silnými oxidačnými činidlami [7]. Na meranie veľkosti častíc sa používa laserová difrakcia. Princíp fungovania laserovej difrakcie leží vo viac ako 100 rokoch známom princípe interakcie svetla a hmoty, na ktorú dopadá, konkrétne na rozptylu a difrakcií takto dopadajúceho svetla. Pre popis týchto javov sú používané dve základné teórie: MIE a Fraunhofer [8]. Reprezentatívna vzorka, dispergovaná v primeranej koncentrácii vo vhodnej kvapaline alebo plyne (suchá metóda), prechádza cez lúč monochromatického svetelného zdroja (laseru). Svetlo rozptýlené časticami v rôznych uhloch sa meria viacprvkovým detektorom a potom sa zaznamenávajú číselné hodnoty týkajúce sa rozptylového vzoru pre následnú analýzu. Tieto numerické hodnoty rozptylu sa potom transformujú pomocou vhodného optického modelového matematického postupu, aby sa dosiahol podiel celkového objemu na oddelenom počte veľkostných tried tvoriacich objemové rozdelenie veľkosti častíc [9]. Podľa štandardu na testovanie výbuchovej prachov nesmie vlhkosť vzorky presiahnuť 5% kvôli zabráneniu ovplyvnenia výsledku. Pre väčšinu materiálov platí, že suchá vzorka bude mať najvyššie hodnoty výbuchovej tlaku a rýchlosti nárastu výbuchovej tlaku. Avšak pre niektoré materiály reagujúce s vodou, ako napríklad niektoré kovy, platí, že prítomnosť vlhkosti môže zvýšiť ich maximálne hodnoty [10-11]. Stredná veľkosť častíc mletej vzorky kyseliny nikotínovej je 28,05  $\mu\text{m}$  a kyseliny 5-brómnikotínovej 25,21  $\mu\text{m}$ . Vlhkosť mletej vzorky kyseliny nikotínovej je 3,8 hm. % a kyseliny 5-brómnikotínovej 3,2 hm. %.

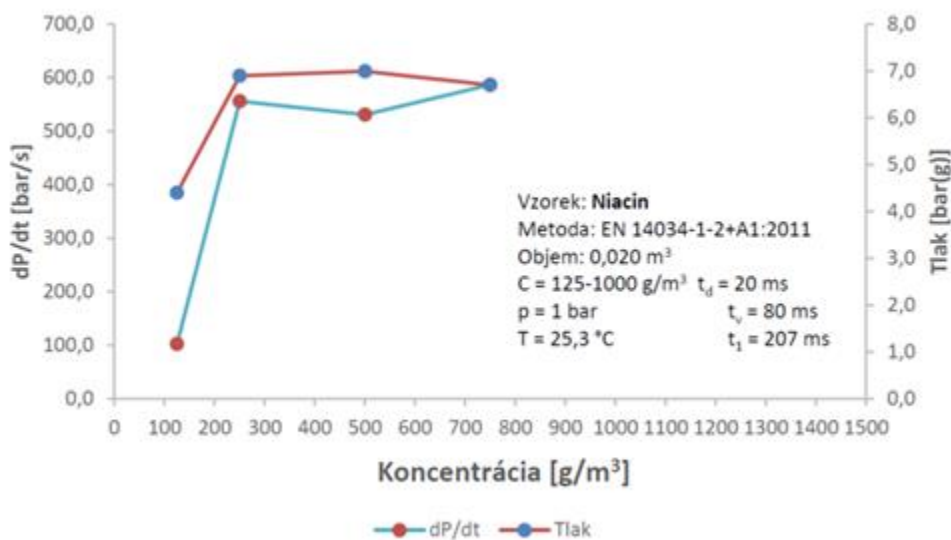
### 4. Výsledky

Pre stanovenie trendu závislosti výbuchovej tlaku a maximálnej rýchlosti nárastu výbuchovej tlaku bola vykonaná séria piatich experimentov, ktoré sú zobrazené na obr. 1.

**Obrázok 1: Priebeh výbuchových parametrov vzhľadom na koncentráciu**

Na obr. 1 je zobrazený priebeh výbuchových parametrov kyseliny 5-brómnikotínovej v závislosti na koncentrácií. Najvyššia hodnota výbuchového tlaku je dosiahnutá pri koncentrácii  $500 \text{ g/m}^3$  a jej hodnota je 6,5 bar. Najvyššia hodnota  $dP/dt$  je dosiahnutá takisto pri koncentrácii  $500 \text{ g/m}^3$  a dosahuje  $175 \text{ bar.m/s}$ . Pri porovnaní výbuchových parametrov kyseliny nikotínovej a kyseliny 5-brómnikotínovej v závislosti na koncentrácii môžeme vidieť pokles maxima výbuchového tlaku z hodnoty 7,5 bar pri koncentrácii  $500 \text{ g/m}^3$  na hodnotu 6,5 bar pri rovnakej koncentrácii. Môžeme povedať, že atóm brómu v molekule kyseliny nikotínovej ovplyvňuje maximum výbuchového tlaku ale nie v príliš veľkom rozsahu. Avšak pri porovnaní maximálnych hodnôt dosiahnutých pri  $dP/dt$  má atóm brómu obsiahnutý v molekule kyseliny výrazne negatívny vplyv. Pri kyseline nikotínovej je maximum  $dP/dt$  dosiahnuté pri koncentrácii  $250 \text{ g/m}^3$  a dosahuje hodnoty  $635 \text{ bar.m/s}$  a pri kyseline 5-brómnikotínovej je maximum  $dP/dt$  iba  $175 \text{ bar.m/s}$ .

**Obrázok 2: Priebeh výbuchových parametrov vzhľadom k iniciačnému zdroji - palník**



**Obrázok 3: Priebeh výbuchových parametrov vzhľadom na iniciačný zdroj - iskra 50 J**

Na obr. 3 je zobrazený priebeh výbuchových parametrov pri použití permanentnej iskry s energiou 10 W (50J). Z Obr. 3 je zrejmé, že hodnota  $dP/dt$  je najvyššia pri koncentrácii  $750 \text{ g/m}^3$  a odpovedá hodnote  $587 \text{ bar.m/s}$  a hodnota  $P_{\text{max}}$  je najvyššia pri koncentrácii  $500 \text{ g/m}^3$  a nadobúda hodnoty 7,0 bar. Porovnaním Obr. 2-3 získame informácie o vplyve

iniciačného zdroja na zapálenie prachovzduchovej zmesi. Zoradením výsledkov výbuchového tlaku podľa veľkosti môžeme konštatovať, že najvyššie hodnoty nadobúdame pri použití dvoch chemických iniciátorov (7,7 bar), ďalej jedného chemického iniciátora (7,5 bar) a najmenší výbuchový tlak dosiahneme pri použití permanentnej iskry (7,0 bar). Zaujímavým zistením je fakt, že všetky tieto výsledky ležia v experimentálnej chybe 10%, vzťahujúcej sa k energii dvoch iniciátorov, ale ležia mimo interval spoľahlivosti štatistických hodnôt používaných pri validácii (7,6 až 9,2 bar). Rozdiel v nameraných hodnotách spočíva v tom, že pri používaní chemických iniciátorov dochádza k vytvoreniu prúdu žhavých častíc v tvare kužela, zatiaľ čo pri použití elektrickej iskry sa jedná o bodový iniciačný zdroj. Maximálny výbuchový tlak stanovený v uzavretej guľovej nádobe o objeme 0,020 m<sup>3</sup> je závislý na tlakovom účinku chemických zapaľovačov v dôsledku malého objemu 20-litrovej gule. Zatiaľ čo pri použití elektrickej iskry ako iniciačného zdroja je tlakový účinok zanedbateľný.

**Obrázek 4: Priebeh výbuchových parametrov vzhľadom na typ rozvírovacieho zariadenia - tryska so spätným odrazom**

**Obrázek 5: Priebeh výbuchových parametrov - dierovaná polkruhová rúra**

Na obr. 4-5 je uvedený priebeh výbuchových parametrov použitím dierovanej polkruhovej rúry. Merania boli vykonané pri koncentráciách 250, 500 a 750 g/m<sup>3</sup>, tlaku 1 bar a s použitím chemického iniciátora (5 kJ). Najvyššia hodnota výbuchového tlaku bola dosiahnutá pri koncentrácii 750 g/m<sup>3</sup> a nadobúda hodnotu 6,2 bar. Pre hodnotu dP/dt bolo maximum dosiahnuté pri koncentrácii 250 g/m<sup>3</sup> a dosiahlo hodnotu 94 bar.m/s. Pri porovnaní tlakov môžeme vidieť pri kyseline nikotínovej, že hodnota tlaku so zvyšujúcou sa koncentráciou klesá, zatiaľ čo pri kyseline 5-brómnikotínovej hodnota pri zvýšení koncentrácie z 250 g/m<sup>3</sup> na 500 g/m<sup>3</sup> klesne, avšak pri ďalšom zvýšení koncentrácie na 750 g/m<sup>3</sup> dosiahne svoje maximum. Pri porovnávaní typu rozvírovacieho zariadenia sme mohli pozorovať, že pri hodnotách výbuchového tlaku nezáleží na použitom type rozvírovacieho zariadenia. Z hľadiska hodnoty dP/dt môžeme usúdiť, že

je lepšie používať trysku so spätným odrazom, ktorá zabezpečí lepšiu turbulenciu zmesi a tým dosiahneme aj vyššie hodnoty  $dP/dt$ .

## 5. Záver

Hlavným cieľom práce je analyzovať a experimentálne potvrdiť vplyv zmeny molekulovej štruktúry pyridín-3-karboxylovej kyseliny na jej výbuchové parametre naviazaním atómu brómu do jej štruktúry v pevnom skupenstve. Bol vykonaný podrobný opis použitej experimentálnej aparatury pre štúdium prachových disperzií so zameraním na opis výbuchovej komory, systému rozvírenia prachu, systému merania výbuchových parametrov a iniciácii zmesi. Bol popísaný postup merania, príprava a charakterizácia jednotlivých vzoriek. Boli namerané tlakové záznamy v závislosti na čase. Z týchto kriviek boli priamo stanovené výbuchové tlaky a druhou deriváciou záznamu následne vypočítaná rýchlosť nárastu výbuchového tlaku. Bola vykonaná séria meraní štandardných koncentračných radov pre stanovenie maxím študovaných pri výbuchu parametrov. Každé z uvedených meraní bolo vykonané pre čistú aj brómom obohatenú prachovú disperziu. Vďaka vyššie uvedeným fyzikálnym závislostiam bolo možné jednoznačne určiť vplyv molekulovej štruktúry na hodnotu študovaných výbuchových parametrov. Experimenty sa budú vykonávať vo výbuchových komorách dvoch veľkostí, v prvom rade všeobecne používaná 20-L výbuchová komora a ďalej potom štandardná komora s objemom  $1\text{ m}^3$ . Budúce štúdie možno podporiť tak, že malé zariadenia, o objeme  $0,020\text{ m}^3$ , sa v priemysle príliš nevyskytujú, napriek tomu sa výbuchové komory o tak malom objeme takmer výhradne používajú pre štúdium výbuchov.

Oblasť zaoberajúca sa procesmi výbuchu je veľmi žiadúca z pohľadu ochrany pracovníkov pred účinkami výbuchu v súlade s Európskou direktívou ATEX 137, ale aj vo vzťahu k prevencii a minimalizácii možných škôd súvisiacich s účinkami výbuchu na technológie. Realizácia výskumu napomôže k zlepšeniu a posilneniu znalostnej a informačnej základne o problematike prevencie a obmedzovania rizík výbuchov čistých látok rovnakého skupenstva. V širšom poňatí celej témy sa možno domnievať, že realizácia práce, respektíve výsledky tohto základného výskumu budú mať uplatnenie v mnohých odvetviach priemyslu s výskytom horľavého materiálu, ale aj v špecifických zariadeniach, kde sa prevádzkujú rizikové činnosti, ktoré môžu vyústiť v havárie typu požiar alebo výbuch s následkami na životoch a zdraví ľudí, životnom prostredí a majetku.

## 6. Poděkování

Táto práca bola vypracovaná v rámci projektu „Inovace pro efektivitu a životní prostředí - Growth“, identifikačný kód LO1403 za finančnej podpory MŠMT v rámci programu NPU I a špecifického výskumu SP 2019/89.

## 7. Zoznam literatúry

[1] BUSSENIUS, S. *Protipožární a protivýbuchová ochrana průmyslu*. Praha: SPO ČSSR, 1985.

[2] *Understanding the Dust Explosion Pentagon* [online]. Hughes Environmental, February 3, 2015 [cit. 2019-04-08]. Dostupný z: <https://hughesenv.com/understanding-dust-explosion-pentagon/>.

[3] ECKHOFF, R. K. *Dust explosions in the Process Industries*. Elsevier: 2003. S. 473-543.

[4] SKAVLAND, C. E. *An experimental study in the 20-liter Siwek sphere and a 0,5m<sup>3</sup> non standardized vessel*. Bergen, 2018. diplomová práca. 109 s.

[5] LEPIK, P. *Úvod do problematiky a výbušnost látek* [online]. Ostrava: VŠB-TUO [cit. 2019-04-08]. Dostupný z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewiAxons44DIAhWOYVA>

- [6] Niacin. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online] [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Niacin>.
- [7] *5-Bromonicotinic Acid* [online]. IndiaMART, c1996-2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/5-bromonicotinic-acid-1881503488.html>.
- [8] *A Guide to Understanding Laser Diffraction Principles + Theory* [online]. ATA Scientific Pty, 2018 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.atascientific.com.au/principles-laser-diffraction/>.
- [9] Light diffraction measurement of particle size. *Pharmacopeia* [online] [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: [http://www.uspbpep.com/usp31/v31261/usp31nf26s1\\_c429.asp](http://www.uspbpep.com/usp31/v31261/usp31nf26s1_c429.asp)
- [10] ASTM E1226-12a. *Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds*.
- [11] ČSN EN 14034-1-2+A1. *Stanovení výbuchového charakteristik rozvířeného prachu*. Praha: ÚNMZ, 2011.

### **Vzorová citace**

VÁŇA, Matej; SKŘÍNSKÝ, Jan. Štúdium výbuchového parametrov disperzie pracho-vzduchového zmesí zmenou molekulovej štruktúry. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online]. 2019, roč. 12, č. 2. Dostupný z: <https://www.bozpinfo.cz/josra/studium-vybuchovych-parametrov-disperzie-pracho-vzduchovych-zmesi-zmenou-molekulovej-struktury>. ISSN 1803-3687.

---

Autor článku:

[Bc. Matej Váňa](#)

[Ing. Jan Skřínský, Ph.D.](#)