

VÝBUŠNOSŤ PRACHU

EXPLOSIVE DUST

Martina SKLENÁROVÁ¹, Petr ŠTROCH²

ABSTRACT:

The aim of the article is to bring knowledge about the influence of dust properties and other factors on the occurrence and course of the explosion. The article deals with the investigation of the conditions and their impact on the occurrence of an explosion: dust properties, particle size, explosion limit, dust concentration, oxygen concentration limit. In the next section, the article deals with parameters and conditions influencing the course of the explosion. It examines the factors affecting the explosion parameters, thus its actual course of the explosion, its strength and speed. These are: particle size, degree of fineness of material, concentration of explosive mixture, initial pressure and temperature, initiation energy, location of initiator, turbulence, volume, shape and container arrangement, oxygen content, flammable gas, or vapour, and how they affect the formation and course of the explosion. The article presents also the results of laboratory and large-scale tests of the plastic dust.

KEYWORDS: Dust. Flammable dust. Explosion. Particle size. Explosion limits. Limiting concentration of oxygen. Dust concentration. Explosion pressure. Maximum explosion pressure. Maximum explosive pressure rise rate. Cubic constant.

ÚVOD

Prach sa považuje za výbušný, ak po zapálení zmesi prachu a vzduchu s vhodným zdrojom dochádza k šíreniu plameňa v kombinácii s nárastom tlaku.

Základnou podmienkou pre vznik výbuchu je látka so svojimi vlastnosťami, čo predstavuje nebezpečenstvo výbuchu. Do tejto podmienky vstupujú faktory zodpovedné za vznik ako aj za rozšírenie výbuchu. Príslušné vlastnosti prachov sú dané požiarno-technickými parametrami, stanovujú sa experimentálne v laboratóriách a nie sú fyzikálnymi konštantami, preto aj daná látka nemusí vykazovať rovnaké hodnoty požiarno-technických charakteristík, ak je vyrábaná a spracovávaná v rôznych častiach technologických zariadení a za rôznych prevádzkových podmienok [2].

1. PRACH, HORLAVÝ PRACH, FORMY JEHO VÝSKYTU A RIZIKÁ Z NICH VYPLÝVAJÚCE

Prach tvoria častice pevnej látky menšie ako

0,5 mm. U vlákien môže byť dĺžka vlákna väčšia ako 0,5 mm. Niektoré atypické materiály sa môžu správať ako prachy aj pri väčších rozmeroch častíc. Pojem prach teda zahŕňa rozomleté pevné látky označované ako púder, múčka, prášok, úlomky vlákien a podobne [3].

Prach sa vyskytuje v dvoch stavoch [3]:

- usadený prach,
- rozvírený prach.

Prach môže ľahko prejsť z jedného stavu do druhého. Usadený prach možno rozvíriť, napríklad vibráciami, otrasmi, prúdom vzduchu. Rozvírený prach sedimentáciou prechádza do usadeného stavu.

V technológii sa môže vyskytovať prach v obidvoch uvedených stavoch. Príklady jeho výskytu:

- vo vnútri zariadenia, v ktorom sa s prachom manipuluje, alebo sa prach spracúva. Nedá sa tu často zabrániť vrstvám prachu, ktoré môžu mať nekontrolovateľnú hrúbku, pretože sú neoddeliteľnou súčasťou výroby, pri plnení zásobníkov prachom – nad hladinou sedimentovaného prachu je vysoká koncentrácia najjemnejších podielov prachu,

¹ Martina Sklenárová, Ing., VŠB- Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, 17. listopadu 2172/15, Ostrava-Poruba, tel.: +421 903 340 200, e-mail: martina.sklenarova.st@vsb.cz.

² Petr Štroch, doc., Ing., Ph.D., VŠB- Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, 17. listopadu 2172/15, Ostrava-Poruba, tel.: +420 596 252 170, e-mail: petr.stroch@vsb.cz.

- v potrubí (vzduchotechnické potrubie, vedenie vzduchu za filtrom a pod.) sa môžu tvoriť usadeniny prachu, ale aj rozvírený prach,
- pri nábehu a odstavovaní zariadení sa môže vyskytovať rozvírený prach,
- pri výbuchu zmesi plynu alebo pary so vzduchom, sa kvapalina môže odpariť a potom sa vysušený prach môže rozvíriať a podieľať sa na výbuchu.

2. VÝBUCH A PODMIENKY JEHO VZNIKU

Výbuch je označovaný ako náhla oxidačná alebo rozkladná reakcia vyznačujúca sa nárastom teploty, tlaku alebo nárastom oboch týchto veličín súčasne.

Je známa aj definícia o výbuchu: exotermický, chemický proces, ktorý ak sa vyskytuje pri konštantnom objeme, vedie k náhlemu a výraznému nárastu tlaku [2].

Aby mohlo dôjsť k výbuchu, musia byť splnené tieto predpoklady:

- jemne rozptýlená horľavá látka vyskytujúca sa v potrebnej koncentrácii,
- priestor, v ktorom sa môže vytvárať nebezpečná koncentrácia prachu,
- oxidačný prostriedok vyskytujúci sa v posudzovanom priestore,
- dostatočne silný iniciačný zdroj.

Všeobecne platí, že horľavé látky môžu vytvárať výbušnú atmosféru, pokiaľ sa skúškami nepreukáže, že nie sú schopné so vzduchom vytvárať zmesi umožňujúce vznik a šírenie výbuchu [3].

2.1 Výbuchové parametre popisujúce priebeh výbuchu

Maximálne výbuchové parametre sú meradlom energie, resp. výkonu danej výbušnej zmesi.

Priebeh výbuchu sa dá opísať na základe niekoľkých ukazovateľov výbušnosti – výbuchových parametrov [3]:

- tlak pri výbuchu p_{vyb} ,
- maximálny tlak pri výbuchu p_{max} ,
- maximálna rýchlosť narastania výbuchového tlaku $(dp/dt)_{max}$,
- kubická konštanta K_{St} .

Maximálna rýchlosť narastania výbuchového tlaku $(dp/dt)_{max}$ je maximálnou hodnotou nárastu tlaku za jednotku času počas výbuchov všetkých výbušných atmosfér v rozsahu výbušnosti horľavej látky v uzatvorenej nádobe

za stanovených skúšobných podmienok [9].

Maximálny tlak pri výbuchu p_{max} predstavuje maximálnu hodnotu zvýšeného tlaku vznikajúceho v uzatvorenej nádobe pri výbuchu výbušnej atmosféry za stanovených podmienok skúšky a pri bežných atmosférických podmienkach. Je to vlastne maximálna hodnota tlaku pri výbuchu p_{max} stanovená skúškami v rozsahu výbušnosti koncentrácie prachu [7].

Podľa hodnôt kubickej konštanty u prachovzdušných zmesí, sa horľavé prachy zaraďujú do troch tried [2]:

- St 1 má hodnoty K_{St} 0 – 200 bar.m.s⁻¹,
- St 2 má hodnoty K_{St} 200 – 300 bar.m.s⁻¹,
- St 3 má hodnoty K_{St} nad 300 bar.m.s⁻¹.

Medzná koncentrácia kyslíka (LOC) predstavuje najvyššiu koncentráciu kyslíku v zmesi horľavej látky, vzduchu a inertného plynu, pri ktorej nemôže dôjsť k výbuchu, za určitých stanovených podmienok skúšky [3, 8].

3. PODMIENKY OVPLYVŇUJÚCE VÝBUCHOVÉ PARAMETRE

Prvou a základnou podmienkou pre vznik výbuchu prachu je prítomnosť výbušnej zmesi s vlastnosťami prítomných látok. Zohľadňovať sa musia aj prevádzkové podmienky zariadenia [3, 6].

Medzi podmienky ovplyvňujúce výbuchové parametre, ktoré majú vplyv na priebeh výbuchu, jeho silu a rýchlosť patrí:

- veľkosť častíc, stupeň jemnosti materiálu,
- koncentrácia výbušnej zmesi,
- počiatkový tlak,
- počiatková teplota,
- iniciačná energia,
- umiestnenie iniciačného zdroja,
- turbulencia,
- objem, tvar a usporiadanie nádob,
- obsah kyslíka,
- obsah horľavého plynu alebo pary.

Maximálne výbuchové parametre sa znižujú s rastúcou veľkosťou častíc, teda s klesajúcou veľkosťou merného povrchu [3]. Sila a rýchlosť výbuchu sa zvyšuje so zvyšujúcim stupňom jemnosti materiálu [1].

S klesajúcou veľkosťou častíc:

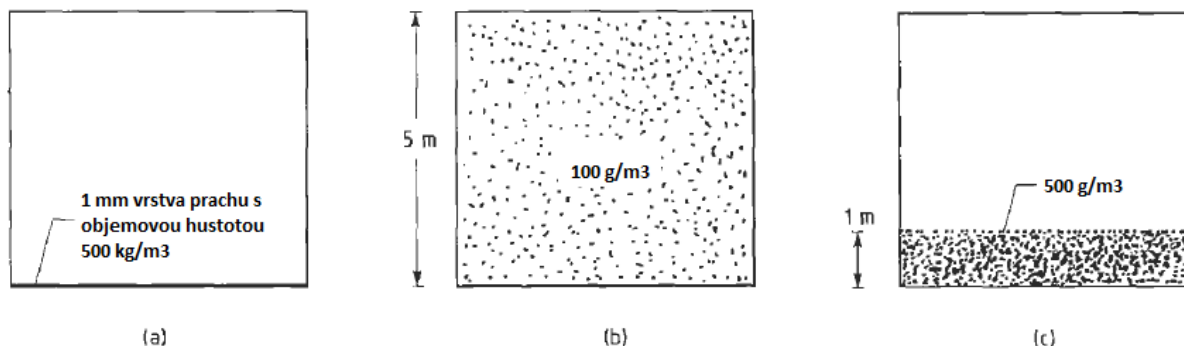
- narastá maximálny tlak pri výbuchu [7],
- klesá medzná koncentrácia kyslíka [8], sa zvyšuje maximálna rýchlosť nárastu tlaku pri výbuchu [9].

Horľavé látky môžu vytvárať výbušné zmesi, ak sú dostatočne dispergované.

Aby sa mohla vytvoriť výbušná zmes horľavého prachu so vzduchom, musí byť k dispozícii dostatočné množstvo prachových častíc, teda skutočná koncentrácia prachu c_{SKUT} musí byť vyššia ako nebezpečná koncentrácia c_{NEB} [3].

Skutočná koncentrácia môže byť významne ovplyvnená pomerom rozvieteného a usadeného podielu prachu.

Všeobecne platí, že rozptýlené vrstvy prachu v technologických zariadeniach predstavujú potenciálne nebezpečenstvo rozsiahlych sekundárnych explózií prachu.

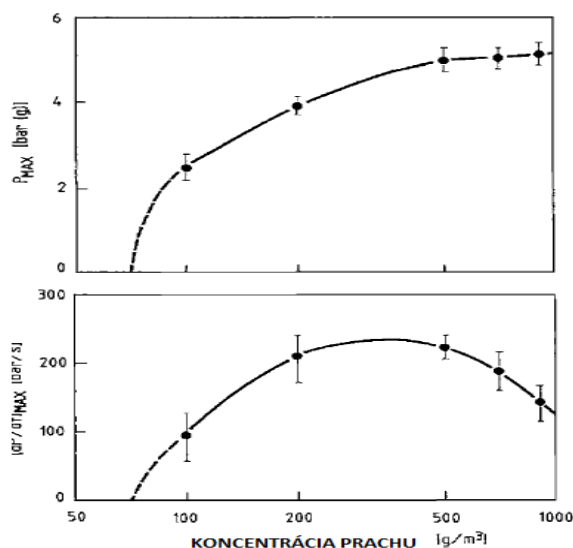


Obrázok 1 (a) Potencionálne nebezpečenstvo vyplývajúce z 1 mm vrstvy prachu s objemovou hustotou 500 kg/m^3 vytvorí priemernú koncentráciu rozvieteného prachu 100 g/m^3 v priestore s výškou 5 m (b). Čiastočné rozptýlenie do výšky 1 m dá prach s koncentráciou 500 g/m^3 (c) [2]

Koncentrácia výbušnej zmesi ovplyvňuje hodnoty $p_{výb}$ a $(dp/dt)_{výb}$. Najvyššie hodnoty výbuchového tlaku a rýchlosti narastania výbuchového tlaku sa dosahujú pri optimálnej koncentrácii, tieto hodnoty potom nazývame maximálny výbuchový tlak a maximálna

rýchlosť narastania výbuchového tlaku [3].

So zvyšujúcou koncentráciou sa zvyšuje maximálny výbuchový tlak a maximálna rýchlosť nárastu tlaku [2].



Obrázok 2 Vplyv koncentrácie prachu na výbuchové parametre [2]

Horľavý prach je schopný výbuchu iba v obmedzenom rozsahu, čo je dané dolnou (LEL) a hornou (UEL) medzou výbušnosti.

Medze výbušnosti ako prvé upozorňujú na hroziace nebezpečenstvo. Medze výbušnosti sú ovplyvnené mnohými faktormi [3]:

- LEL zvráteného prachu klesá so znižujúcou sa veľkosťou častice.
- Iniciačnou energiou - s jej nárastom sa rozširuje rozsah výbušnosti.
- Počiatočnou teplotou - so zvyšujúcou sa počiatočnou teplotou sa rozsah výbušnosti lineárne rozširuje.
- Počiatočným tlakom - s rastúcim počiatočným tlakom sa zvyšuje UEL. LEL sa znižuje iba minimálne. S klesajúcim počiatočným tlakom sa rozsah výbušnosti zužuje.
- Obsahom vlhkosti prachu - s rastúcim obsahom vlhkosti sa zvyšuje LEL.
- Obsahom kyslíka - s rastúcim obsahom kyslíka sa UEL posúva k vyšším hodnotám. Zvýšený obsah kyslíka neovplyvní LEL.
- Pridaním horľavého plynu - ak sa pridá aj minimálne množstvo horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny, LEL sa výrazne zníži.

S rastúcim počiatočným tlakom sa maximálne výbuchové parametre zvyšujú a to preto, lebo sa zväčšuje množstvo zmesi s optimálnou koncentráciou. Zníženie tlaku zase maximálne výbuchové parametre znižujú. [3, 1].

Reakčná rýchlosť rastie s teplotou. Maximálna rýchlosť nárastu výbuchového tlaku sa zvyšuje s rastúcou teplotou. V priemyselnej praxi sa horľavý prach často vyrába a prepravuje pri zvýšených teplotách; preto je dôležité poznať vplyv teploty na priebeh výbuchových charakteristík.

S rastúcou iniciačnou energiou sa zvyšuje aj maximálna rýchlosť narastania výbuchového tlaku [3].

Turbulencia zmesi prachu a vzduchu v momente zapálenia má významný vplyv na charakteristiky výbuchu [1].

S rastúcou turbulentiou zmesi v okamžiku iniciácie sa zvyšujú maximálne výbuchové parametre [3].

K zvýšeniu maximálnych výbuchových parametrov dochádza aj vplyvom predkomprimácie a turbulencie výbušnej zmesi

v nádobách spojených potrubím, ktorým sa výbuch prenáša z jednej nádoby do druhej [3].

Vo väčších nádržiach (zariadeniach) s prachom sa vytvárajú väčšie turbulencie pre zmesi, v porovnaní s menšími nádobami. Hodnota $(dp/dt)_{max}$ je viac ovplyvniteľná ako p_{max} [1].

S rastúcim objemom nádoby [3]:

- sa nemení maximálny výbuchový tlak,
- klesá rýchlosť narastania výbuchového tlaku.

Tento zákon však platí pre prachovzdušné zmesi od 40 litrov. U podlhovastých nádob a u potrubí tento zákon neplatí.

Maximálny výbuchový tlak v uzavretých, takmer sférických nádobách dostatočnej veľkosti ($V \geq 20$ l) je nezávislý od objemu. Maximálny nárast tlaku však závisí od objemu. Klesá so zvyšujúcim sa objemom v súlade s kubickým zákonom. Hodnota K_{St} vyplývajúca z tohto zákona je špecifická pre prach a skúšobnú metódu, ale je nezávislá od veľkosti nádoby pre objemy $V \geq 20$ l [1].

K zvýšeniu výbuchových parametrov dochádza aj zvýšeným obsahom kyslíku. Spôsobuje to väčšie množstvo reagujúcej látky, teplota plameňa je vyššia. LEL sa týmto neovplyvňuje, UEL sa výrazne zvyšuje [3].

Maximálne výbuchové parametre sa zvyšujú pridaním malého množstva horľavého plynu alebo pary horľavej kvapaliny [3].

4. VÝBUCHOVÉ PARAMETRE PLASTOVÉHO PRACHU

Za účelom posúdenia nebezpečenstva výbuchu plastového prachu bola vybraná časť technológie, v ktorej sa dopravuje a skladuje plastový granulát spolu s prachom. Predmetom skúmania bol prach, ktorý je vedľajším produktom výroby a skladovania granulátu. Vybraná výroba z chemického priemyslu je zameraná na dva hlavné druhy granulátu a to polyetylénový a polypropylénový.

Dôležitým bodom bolo otestovať vzorky polyetylénového a polypropylénového prachu odobraté z rôznych častí technologických zariadení a získať tak výbuchové parametre prachov, ich príslušné vlastnosti.

Z odprašovacích zariadení pripojených na skladovacie silá boli odobraté tri vzorky polyetylénového prachu a z odprašovacieho zariadenia skladovacieho sila bola na

testovanie odobratá jedna vzorka polypropylénového prachu. Od vlastností prachu, ako aj od spôsobu technológie, závisí nebezpečenstvo výbuchu a jeho veľkosť.

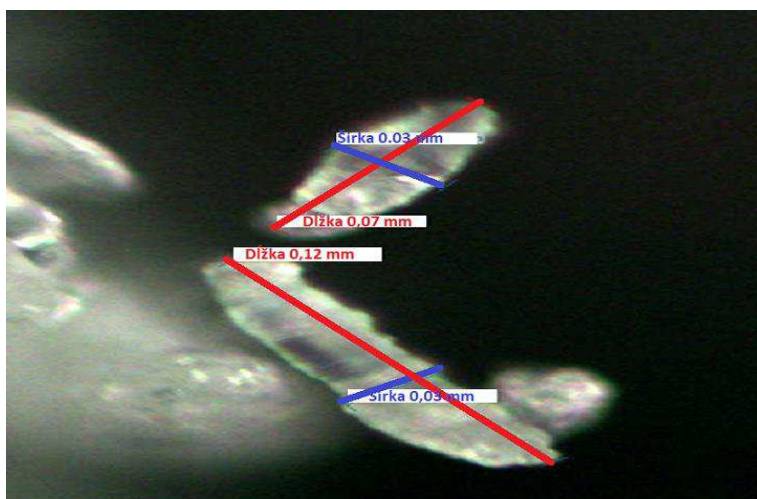
Skúmaním sme sa dopracovali ku konkrétnym vlastnostiam a správaniu sa polyetylénového a polypropylénového prachu nielen v laboratórnych podmienkach, ale aj vo veľkorozmerových testoch. Veľkorozmerové testy simulovali reálne konštrukčné prevedenie daných technologických zariadení, v ktorých sa vybrané vzorky prachu nachádzajú. Pri nich sa skúmali vybrané podmienky na priebeh výbuchu, ako je objem, tvar, usporiadanie nádob, turbulencia.

Realizovali sa výbuchové testy a skúšky za rôznych počiatočných podmienok.

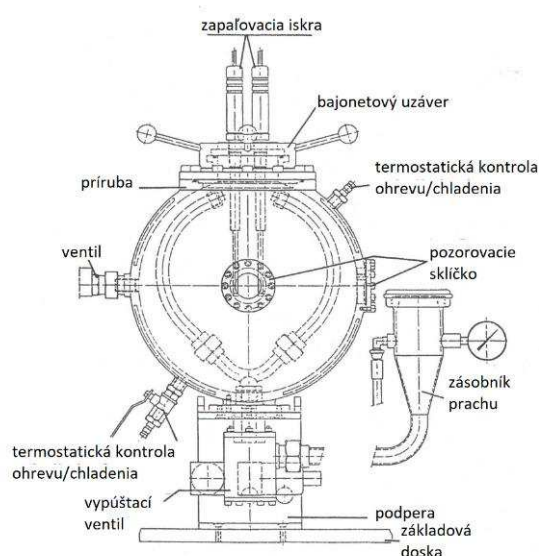
Prostredníctvom sitovej analýzy boli častice prachu roztriedené podľa rozmerov. Najmenšie častice vzoriek prachu predstavujú najvyššie riziko výbuchu prachu v technologických zariadeniach. Bola stanovená zrnitosť vzoriek prachu v rozmedzí 0,04 mm až 6,3 mm.

Na výbuchovom autokláve VA 20 boli stanovené tieto výbuchové parametre:

- dolná medza výbušnosti LEL,
- maximálny výbuchový tlak $p_{\max}$,
- maximálna rýchlosť nárastu, tlaku $(dp/dt)_{\max}$ a konštanta K_{St} .



Obrázok 3 Znáznornenie vzorky polyetylénového prachu pod mikroskopom



Obrázok 4 Zariadenie s objemom 20 litrov na stanovenie výbuchových charakteristík [1]

Pre vzorky určeného plastového prachu boli stanovené aj hodnoty minimálnej iniciačnej energie prostredníctvom Hartmanovej trubice s objemom 1,2 l.

Pre vybrané vzorky prachu boli podľa stanovených skúšobných postupov laboratórne stanovené aj hodnoty teploty vznietenia

a limitný obsah kyslíku. Minimálna teplota vznietenia rozvíreného prachu bola dosiahnutá 450°C.

Hodnoty získané testovaním polyetylénového a polypropylénového prachu sú zhrnuté v nasledovnej tabuľke.

Tabuľka 1 **Prehľad výbuchových parametrov polyetylénového a polypropylénového prachu získaných vlastným testovaním**

Vzorka prachu	Stredná veľkosť zrna mm	LEL $\pm 10\%$ g/m ³	p _{max} $\pm 10\%$ bar	Kst $\pm 20\%$ bar.m.s ⁻¹	dp/dt $\pm 20\%$ bar/s	MIE mJ	E _s mJ	Elektrostatická citlivosť	LOC ± 1 obj.% obj.%
PE vzorka 1	0,3	10	6,2	75	278	30 < 100	60	veľmi citlivý	pod 14,0
PE vzorka 2	> 1	60	5,6	40	147	30 < 100	80	veľmi citlivý	pod 14,0
PE vzorka 3	> 1	20	6,4	68	251	30 < 100	80	veľmi citlivý	pod 14,0
PP	0,148	10	6,1	70	260	10 < 30	23	veľmi citlivý	14,0

U veľkorozmerných skúšok boli stanovené tieto typy skúšok:

- maximálny výbuchový tlak a maximálna rýchlosť nárastu tlaku v uzavretom objeme
- redukovaný výbuchový tlak a redukovaná rýchlosť nárastu tlaku
- výbuchové testy s napojením potrubnej trasy. Výbuchové testy s prenosom explózie potrubím za účelom monitorovania rýchlosti šírenia výbuchu v potrubí a tlakových hodnôt.

Maximálny výbuchový tlak a redukovaný

výbuchový tlak polyetylénového prachu bol meraný v laboratórnych podmienkach na výbuchovom autokláve s objemom 20 l a pri veľkorozmerových testoch prevádzaných na nádobách s objemom 1,35 m³ a 5,45 m³. Redukovaný výbuchový tlak bol meraný na nádobe s objemom 1,35 m³, na vrchu ktorej bol nainštalovaný uvoľňovací otvor DN 250, na nádobe s objemom 5,45 m³, na vrchu ktorej bol nainštalovaný uvoľňovací otvor DN 585 aj väčší otvor DN 775, pri ktorom bol dosiahnutý ešte nižší tlak.

Z ich porovnania hodnôt vyplývajú nasledovné rozdiely uvedené v nasledovnej tabuľke.

Tabuľka 2 Výbuchové parametre polyetylénového prachu merané na nádobách rôznych objemov získané vlastným testovaním

Výbuchové parametre	Autokláv 20 l = 0,02 m ³	Nádoba 1,35m ³	Nádoba 5,45 m ³
p_{max} bar uzatvorená nádobá	6,4	7,17	7,14
p_{pred} bar nádobá s odľahčením	-	0,44 (DN 250)	0,19 (DN 775) 0,66 (DN 585)

Možný prenos explózie za účelom monitorovania rýchlosti šírenia výbuchu v potrubí a tlakových hodnôt výbuchu bol testovaný na nádobách objemu 1,35 m³ a 5,45 m³ opatrených odľahčovacím otvorom, vzájomne prepojenými potrubím s dĺžkou 3, 6 a 10 m. Najprv bola vykonaná iniciácia na nádobe objemu 1,35 m³ a výbuchu sa cez

potrubie preniesol do nádoby s objemom 5,45 m³, kde bolo pozorované zníženie tlaku. Následne sa testovala opačná možnosť, pri ktorej bola iniciácia vykonaná na nádobe objemu 5,45 m³ a výbuch sa cez potrubie preniesol do nádoby s objemom 1,35 m³, kde bolo pozorované zvýšenie tlaku.

Tabuľka 3 Prenos výbuchu prostredníctvom potrubia

Dĺžka potrubia m	p_{pred} bar nádobá 1,35m ³ s odľahčením miesto iniciácie	p_{pred} bar nádobá 5,45 m ³ s odľahčením	vex m/s v potrubí
3	0,985	0,459	35,5
6	0,528	0,281	38,0
10	0,300	0,239	36,0

Dĺžka potrubia m	p_{pred} bar nádobá 1,35m ³ s odľahčením	p_{pred} bar nádobá 5,45 m ³ s odľahčením miesto iniciácie	vex m/s v potrubí
3	0,865	0,225	43,5
6	1,002	0,205	44,5
10	0,888	0,218	63,0

ZÁVER

Riziko výbuchu sa vyskytuje všade tam, kde sa nedá celkom vylúčiť. Preto je dôležité poznať látky s ich vlastnosťami, ktoré sa v technológii nachádzajú, technologické procesy, ktoré v technológii prebiehajú a prevádzkové podmienky, za ktorých sa proces uskutočňuje. Tieto poznatky sú dôležitými faktormi na vykonanie podrobnej analýzy.

Požiarno-technické charakteristiky látok, ktoré

predstavujú ich vlastnosti, možno čerpať z odbornej literatúry, ale tieto hodnoty sú zväčša orientačné, pretože závisia od viacerých podmienok ako je napríklad obsah vlhkosti, veľkosť, tvar prachových častíc, ale výskumom sa presvedčíme aj o tom, ako sa ich správanie mení v závislosti od prevádzkových podmienok. Podcenenie tohto kroku môže viesť k nesprávnemu stanoveniu nebezpečenstva výbuchu a tak aj k podceneniu protivýbuchových opatrení.

LITERATÚRA

- [1] BARTKNECHT, W. *Dust explosions, Course, Prevention, Protection*. 1st. edition. Springer – Verlag, 1989, 270 s.
- [2] ECKHOFF, Rolf K. *Dust Explosions in the Process Industries*. Third Edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier Science, (USA), 2003, 754 s.
- [3] DAMEC, J. *Protivýbuchová prevence*. Ostrava, SPBI 2005, 170 s.
- [4] BARTLOVÁ, I., DAMEC, J. *Prevence technologických zařízení*. 1.vyd. Ostrava, SPBI 2002, 231 s.
- [5] STN EN 60079-10-2 (33 2320): 2015 *Výbušné atmosféry. Časť 10-2: Určovanie priestorov. Výbušné prachové atmosféry*.
- [6] STN EN 13237 (38 9612):2013 *Potenciálne výbušné atmosféry. Termíny a definície pre zariadenia a ochranné systémy používané v potenciálne výbušných atmosférach*.
- [7] STN EN 14034-1+A1 (38 9684):2011 *Stanovenie vlastností zvířeného prachu pri výbuchu. Časť 1: Stanovenie maximálneho tlaku p_{max} pri výbuchu zvířeného prachu (Konsolidovaný text)*.
- [8] STN EN 14034-4+A1 (38 9684) *Stanovenie vlastností zvířeného prachu pri výbuchu. Časť 4: Stanovenie medznej koncentrácie kyslíka (MKK) vo zvírenom prachu (Konsolidovaný text)*.
- [9] STN EN 14034-2+A1 (38 9684) *Stanovenie vlastností zvířeného prachu pri výbuchu. Časť 2: Stanovenie maximálnej rýchlosti nárastu tlaku $(dp/dt)_{max}$ pri výbuchu zvířeného prachu (Konsolidovaný text)*.
- [10] STN EN 14034-3 (38 9684) *Stanovenie vlastností zvířeného prachu pri výbuchu. Časť 3: Stanovenie dolnej medze výbušnosti DMV zvířeného prachu (Konsolidovaný text)*.
- [11] ORLÍKOVÁ, K., ŠTROCH, P. *Chemie procesů hoření*. 1.vyd. Ostrava, SPBI 1999, 85 s.