

Simulation of Dispersion of Spruce Dust Particles by CFD Analysis for the Purpose of Explosion Protection

Simulácia rozptýlenia častíc smrekového prachu analýzou CFD pre účel ochrany pred výbuchom

Dominik Špilák¹, Eva Mračková^{*1}, Andrea Majlingová¹

¹ Department of Fire Protection, Faculty of Wood Sciences and Technology, Technical University in Zvolen, T. G. Masaryka 24, Zvolen, Slovak Republic; e-mail: xspilakd@is.tuzvo.sk, mrackova@tuzvo.sk, majlingova@tuzvo.sk

* Corresponding author: mrackova@tuzvo.sk

Original scientific paper

Received: November 23, 2020; Accepted: December 04, 2020; Published: December 31, 2020

Abstract

The article investigates the simulation of the dispersion of spruce dust particles by CFD (computational fluid dynamics) simulations for the purpose of explosion protection. Measurements of the maximum explosion parameters of Norway spruce wood dust were performed in the VA-20 autoclave device. The obtained explosion parameters depend on the quality of the homogeneous concentration of dispersed dust in the autoclave. To determine the quality of the homogeneous environment created in the autoclave, CFD analysis by Ansys software was used. The results of the simulations from CFD analysis showed the formation of eddy currents, which push the dust particles to the walls of the autoclave and to the point of initiation, where the concentration is approximately 2.5% higher than predicted by calculations for homogeneous environments and for which explosion parameters are determined. Based on the simulation it is possible to adjust the method of dust dispersion in the autoclave by changing the shape of the dust spreader or by delaying the initiation time which clarifies the obtained explosion parameters of explosive dusts.

Keywords: Norway spruce; dust particle size; maximum explosion parameters; Computational fluid dynamics (CFD) analysis

1. Introduction

Explosions of flammable dusts cause serious risks and losses in the production process. Detailed investigations of accidents and incidents are valuable sources of information for proposing measures to prevent them. The issue of explosion protection, the implementation of methods and tools to support effective management to ensure sustainable development in the field of explosion protection, therefore plays an important role.

Flammable dusts are a fuel for an exothermic reaction, often of an organic nature (wood dust, food dust, medicines). By mixing flammable dust particles in the air, a concentration is

1 Úvod

Výbuchy horľavých prachov spôsobujú vážne riziká a straty vo výrobnom procese. Podrobné vyšetrovania ich nehôd a havárií predstavujú cenné zdroje informácií pre návrhy opatrení na ich zamedzenie. Problematika ochrany pred výbuchom, implementácia metód a nástrojov podporujúcich efektívne riadenie s cieľom zabezpečiť trvalo udržateľný rozvoj v oblasti ochrany pred výbuchom, zohráva preto dôležitú úlohu.

Horľavé prachy sú palivom pre exotermickú reakciu, často organického charakteru (drevný prach, potravinárske prachy, liečivá). Premiešaním horľavých prachových častíc vo

created, which, upon initiation, leads to the rapid spread of the flame, the explosion. [1, 2] The dust-air mixture is a mechanical suspension, formed by a system of dispersed fine particles in the environment, it is not formed by molecular motion (colloidal suspension). In practice, this means that the particle flow is essentially turbulent. The dynamics of these turbulent structures create local concentration gradients. Most dust samples have a relatively wide particle size distribution, and particles of different sizes respond differently to changes in the flow field. The results of Siwek et al., Van Wingerden et al. Klippel et al. Show that the dispersibility of dust has a significant effect on the risk of explosion [3, 4, 5, 6].

Measurement of dust concentration during silo filling and CFD modeling of filling processes with respect to exceeding the lower explosion limit was investigated by a team of authors with Klippel et al. [7] The experiments were performed with corn starch. The measured concentrations were compared with those simulated using CFD simulation in ANSYS CFX R14 using the Euler/Lagrange approach. The following were modeled: tensile force, turbulent dispersion force, particle size distribution, particle surface area, and particle/particle interaction. General agreement of measurement and simulation was achieved. The stated measurement results could improve safety and explosion protection. Explosion protection is ensured by preventing the classification of an explosive atmosphere in zone 22 according to ATEX 99/92/EC [8] and equipment and protective systems will be in the category by the explosion zone according to ATEX 2014/34/EU [9] The effect of size distribution and concentration on wood dust explosion was published by Calle et al. [10], who showed that measurement and numerical simulation of local dust concentrations over time in a vessel can only be performed with some uncertainty due to the complexity of dust/air behavior. The dust concentration was measured in a 50 m³ vessel and compared with a CFD simulation.

The aim of the study is to simulate the dispersion of Norway spruce dust particles by CFD analysis based on the measurements of the maximum explosion parameters in the VA 20 autoclave.

vzduchu vzniká koncentrácia, ktorá iniciáciou vedie k rýchlemu šíreniu plameňa, výbuchu. [1, 2] Prachovzduchová zmes je mechanická suspenzia, vytvorená systémom rozptýlených jemných častíc v prostredí, nie je tvorená molekulárnym pohybom (koloidná suspenzia). V praxi to znamená, že tok častíc je vo svojej podstate turbulentný. Dynamika týchto turbulentných štruktúr vytvára miestne koncentračné gradienty. Väčšina vzoriek prachu má relatívne širokú distribúciu veľkosti častíc a častice rôznej veľkosti reagujú odlišne na zmeny v prietokovom poli. Výsledky autorov Siwek a kol., van Wingerden a kol. Klippel a kol., dokazujú, že dispergovateľnosť prachu má významný vplyv na nebezpečenstvo výbuchu [3, 4, 5, 6].

Meranie koncentrácie prachu pri plnení sila a CFD modelovanie procesov plnenia s ohľadom na prekročenie dolnej medze výbušnosti spracoval kolektív autorov s Klippelom a kol. [7] Experimenty uskutočňovali s kukuričným škrobom. Namerané koncentrácie sa porovnali so simulovanými pomocou simulácie CFD v programe ANSYS CFX R14 s použitím Euler/Lagrangeovho prístupu. Boli modelované: ťahová sila, turbulentná disperzná sila, distribúcia veľkosti častíc, povrchová plocha častíc a interakcia častica/častica. Dosiahla sa všeobecná zhoda merania a simulácie. Uvedené výsledky meraní by mohli zlepšiť bezpečnosť a ochranu pred výbuchom. Ochrana pred výbuchom zaistíme prevenciou, že výbušný priestor zaradíme do zóny 22 podľa ATEX 99/92/EC [8] a zariadenia a ochranné systémy budú v kategórii príslušnej v zóne výbušnosti podľa ATEX 2014/34/EÚ [9] Vplyv distribúcie veľkosti a koncentrácie na výbuch dreveného prachu publikoval autor Calle a kol. [10], ktorí dokázali, že meranie a numerickú simuláciu lokálnych koncentrácií prachu v čase v nádobe je možné vykonať iba s určitou neistotou z dôvodu zložitosti správania sa zmesi prach/vzduch. Koncentrácia prachu bola meraná v nádobe o objeme 50 m³ a porovnaná so simuláciou CFD.

Cieľom štúdie je simulácia rozptýlenia častíc smrekového prachu analýzou CFD na základe vykonaných meraní maximálnych výbuchových parametrov v autokláve VA 20.

2 Material and methods

Measurements of the maximum explosion parameters of wood dust were performed for the wood Norway spruce (*Picea abies*). In forests in Slovakia, the current proportion of spruce is 25.597%. It belongs to the basic tree species and therefore it is necessary to pay maximum attention for that. [11, 12, 13]

Norway spruce wood dust is created as a residual material in the technology of grinding in woodworking with specific properties. It forms a dispersion system, which is formed by the dispersion of spruce particles in a continuous phase of the dispersing medium. Spruce dust particles with a lower fraction react more brisantly with air after initiation than particles with a higher fraction. The properties of spruce wood dust determine the fire technical characteristics, which are indicators of the assessment of the risk of fire and explosion. All combustible organic dusts, including spruce wood dust, are heterogeneous materials, which differ significantly in processing in technology, depending on the production machine and the machining tool. Determination of maximum explosion parameters are included among the leading characteristics and properties of Norway spruce wood dust.

2.1 Methodologies for determining the maximum explosion parameters

Norway spruce dust samples were taken from wood sanding technology, directly from the source. The weight of the samples was determined with laboratory scales with a weight determination accuracy of ± 0.01 g. Moisture analyzer was used to determine the moisture content of the tested wood dust accordance to the methodology EN ISO 1666: 2000 Starch. Determination of the amount of moisture. [12] Using a sieve analysis the required fraction of wood dust was separated ($10 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$) for further analyzes performed in an explosive autoclave VA-20.

Determination of maximum explosion parameters was performed based on EN 14034-2 + A1: 2012 Determination of properties of swirling dust during explosion. Part 2: Determination of the maximum pressure rise rate $(dp/dt)_{\text{max}}$ in the explosion of vortex dust in an explosive autoclave VA 20. [13]

2 Materiál a metódy

Merania maximálnych výbuchových parametrov dreveného prachu boli vykonané pre drevinu Smrek obyčajný (*Picea abies*). V lesoch na Slovensku je súčasne zastúpenie smreka 25,597 %. Patrí k základným hospodárskym drevinám, a preto je potrebné venovať jej maximálnu pozornosť. [11, 12, 13]

Smrekový drevený prach vzniká ako zvyškový materiál v technológii brúsenia v drevárskej prevádzke so špecifickými vlastnosťami. Vytvára disperznú sústavu, ktorá vzniká rozptýlením smrekových častíc v súvislej fáze dispergujúceho prostredia. Častice smrekového prachu s nižšou frakciou reagujú so vzduchom po iniciovaní brizantnejšie ako častice s vyššou frakciou. Vlastnosti smrekového dreveného prachu určujú požiarotechnické charakteristiky, ktoré sú ukazovateľmi posudzovania rizika vzniku požiaru a výbuchu. Všetky horľavé organické prachy, ku ktorým patrí aj smrekový drevený prach, sú heterogénne materiály, ktoré sa významne líšia spracovaním v technológii, závisia od výrobného stroja a nástroja opracovania. Stanovenie maximálnych výbuchových parametrov patrí medzi popredné charakteristiky a vlastností smrekového dreveného prachu.

2.1 Metodiky stanovenia maximálnych výbuchových parametrov

Vzorky smrekového prachu boli odobraté z technológie brúsenia dreva, priamo zo zdroja vzniku. Hmotnosť vzoriek bola stanovovaná laboratórnymi váhami s presnosťou stanovenia hmotnosti $\pm 0,01$ g. Pre stanovenie vlhkosti testovaného dreveného prachu bol použitý analyzátor vlhkosti v zmysle metodiky EN ISO 1666: 2000 Škrob. Stanovenie množstva vlhkosti. [12] Pomocou sitovej analýzy bola separovaná požadovaná frakcia dreveného prachu ($10 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$) pre ďalšie analýzy vykonávané vo výbuchovom autokláve VA-20.

Stanovenie maximálnych výbuchových parametrov bolo vykonané na základe EN 14034-2+A1: 2012 Stanovenie vlastností zvířeného prachu pri výbuchu. Časť 2: Stanovenie maximálnej rýchlosti nárastu tlaku $(dp/dt)_{\text{max}}$ pri výbuchu zvířeného prachu vo výbuchovom autokláve VA 20. [13]

2.2 Methodologies of computer simulations

When investigating explosive concentrations in VA-20, the creation of a homogeneous environment of the dispersion system is an important prerequisite. This is achieved by using a source of compressed air, which agitates the test substance and delays initiation. The delay of initiation is intended to provide time to form a homogeneous system and it is different for substances. In our case, the delay between the start of dust agitation and the activation of the initiation source is 0.06 s. Whether this time is sufficient to form a homogeneous mixture can be provided by the simulation results. [14, 15]

2.2.1 Computer model

The software for creating a computer model is ANSYS 19.7. Each simulation in Ansys is performed using the Ansys Workbench software environment. The three-dimensional model was created in the SpaceClaim environment, which is part of Ansys and represents a simplified form of typical CAD systems.

2.2.2 Model geometry

The geometry of the proposed computer model is dimensionally identical to the VA-20. For simulating the turbulence of dust in the autoclave only internal space is important. Therefore, the resulting computer model does not include elements such as the outer walls of the autoclave, the stand, measuring devices, etc., which simplifies the simulation and speeds up the calculation (Fig. 1).

2.2 Metodiky počítačových simulácií

Pri skúmaní výbuchovej koncentrácie vo VA-20 je dôležitým predpokladom vytvorenie homogénneho prostredia disperznej sústavy. Dosahuje sa to pomocou zdroja stlačeného vzduchu, ktorý rozvíri skúmanú látku a oddialením iniciácie. Oddialenie iniciácie má poskytnúť čas pre vznik homogénnej sústavy a je rozdielny pre rôzne látky. V našom prípade oneskorenie medzi začiatkom rozvírovania prachu a aktiváciou iniciáčného zdroja je 60 ms. Či je tento čas dostatočný pre vytvorenie homogénnej zmesi nám vedia poskytnúť výsledky simulácie. [14, 15]

2.2.1 Počítačový model

Software na vytvorenie počítačového modelu je ANSYS 19.7. Každá simulácia v Ansys je vykonaná pomocou programového prostredia Ansys Workbench. Trojrozmerný model bol vytvorený v prostredí SpaceClaim, ktorý je súčasťou Ansysu a predstavuje zjednodušenú formu typických CAD systémov.

2.2.2 Geometria modelu

Geometria navrhnutého počítačového modelu je po rozmerovej stránke totožná s VA-20. Pre potreby simulovania rozvírenia prachu v autokláve je dôležitý len jej vnútorný priestor. Preto výsledný počítačový model nezahŕňa prvky ako sú vonkajšie steny autoklávu, stojan, meracia zariadenia a.i., čo zjednodušuje simuláciu a zrýchľuje výpočet (Obr. 1).

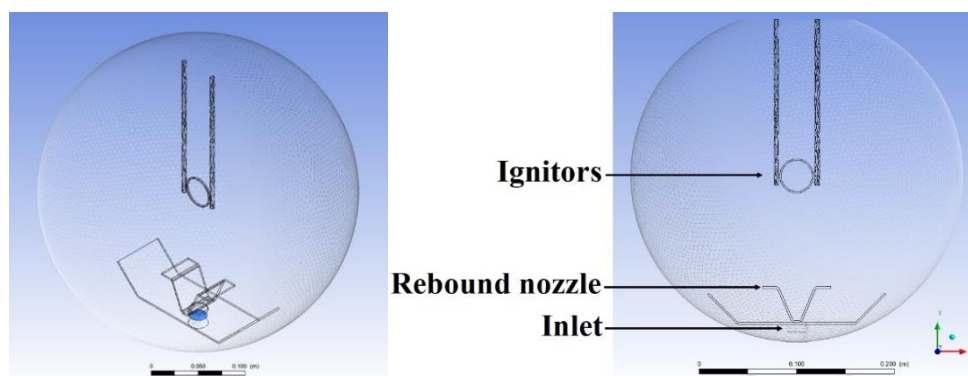


Fig. 1 Computer model of VA-20

Obr. 1 Počítačový model VA-20

All simulations consist of a basic Fluid Flow (Fluent) analysis for investigate fluid movement

Všetky simulácie pozostávajú zo základnej analýzy tekutín umožňujúcej skúmanie pohybu a

and behavior. This type of analysis is one of the typical CFD analysis. The model consists of time-averaged Navier-Stokes equations (Euler's approach) written in polar coordinates. These equations are used to define the physical properties of fluids.

2.2.3 Discretization of the model

After creating the model in the SpaceClaim workbench with the specified properties, the model is meshed to the finite element model (Fig. 2). Due to the irregular shapes, the tetrahedron method is used for meshing. With the help of the Body Sizing and Face Sizing functions a denser mesh is purposefully created in the vicinity of the initiating device. In these places the diameter of the elements is 1 mm.

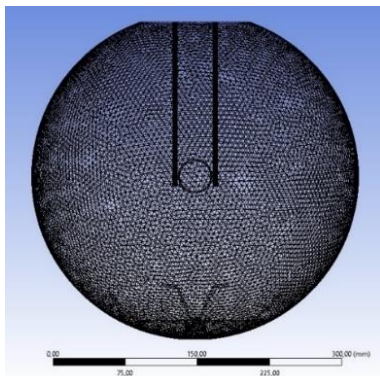
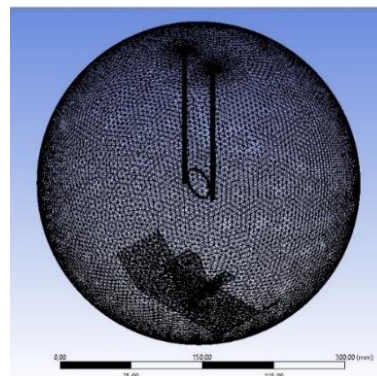


Fig. 2 Finite elements mesh

správania sa tekutín. Tento typ analýzy sa radí medzi typické CFD analýzy. Model pozostáva z časovo spriemerovaných Navier-Stokesových rovníc (Eulerov prístup) napísaných v polárnych súradniciach. Tieto rovnice sa používajú na definovanie fyzikálnych vlastností tekutín.

2.2.3 Diskretizácia modelu

Po vytvorení modelu v prostredí SpaceClaim so zadanými vlastnosťami je model nasiet'ovaný na model konečných prvkoch (Obr. 2). V dôsledku nepravidelných tvarov je na nasiet'ovanie využitá metóda štvorstena. Pomocou funkcie Body Sizing a Face Sizing je cielene vytvorená hustejšia sieť v okolí iniciačného zariadenia. Veľkosť elementov je v týchto miestach 1 mm.



Obr. 2 Sieť konečných prvkov

The final number of nodes is 213,427 and the number of elements is 1,212,553.

2.2.4 Simulation solution method

Numerical simulation of turbulence is performed using a standard k- ϵ model [16] enhanced by improved particle-wall interaction. The motion of the solid phase (wood dust) in the air is solved by the Lagrang approach using the discrete phase model. The input of the discrete phase is solved as a surface type. It is assumed that the dust particles do not react with the air. The particle size distribution of wood dust is solved by Rosin-Rammler [17], because in the real test the particle size was in the range from 10 μm to 500 μm . The interaction between the gas phase and the solid particles is assumed to be bidirectional because, according to Elghobashi's [18] classification, the operating conditions (particle volume fraction, particle density and

Finálny počet uzlov predstavuje 213 427 a počet elementov 1 212 553.

2.2.4 Spôsob riešenia simulácie

Numerická simulácia turbulencie je uskutočnená použitím štandardného modelu k- ϵ [16] vylepšenej o zdokonalenú interakciu častíc so stenami. Pohyb tuhej fázy (dreveného prachu) vo vzduchu je vyriešený Lagrangovským prístupom pomocou modelu diskkrétnej fázy. Vstup diskkrétnej fázy je riešený ako typ povrch. Predpokladá sa, že častice prachu so vzduchom nereagujú. Distribúcia veľkosti častíc dreveného prachu je riešená podľa Rosin-Rammlera [17], pretože v reálnom teste bola veľkosť častíc v rozmedzí od 10 μm do 500 μm . Interakcia medzi plynnou fázou a pevnými časticami je predpokladaná ako obojsmerná, pretože podľa klasifikácie Elghobashiho [18], prevádzkové podmienky (frakcia objemu častíc, hustota častíc

particle concentration) indicate that fluid flow affects particle motion and vice versa.

The calculation is standard initialized. The size of the time steps is set to a constant value of 5 ms. The total number of steps is set to 12, which allows us to display the dispersion of particles in the autoclave up to the time of explosion at 60 ms. To ensure the best possible ratio of the accuracy of the calculations with respect to the time of the calculations, the number of iterations per time step is set to 50.

2.2.5 Computer model validation

The proposed computer model is validated using a verified model according to Di Benedetto et al. [14]. The model simulated the dispersion of dust particles in an explosive autoclave and was validated according to standard measurements of the pressure increase in the autoclave by the data obtained from the experiments. Di Sarlia et al. [15] used this model to investigate the effect of dust particle size on their dispersion in autoclave. The results confirmed the correctness of the created model. The difference compared to the model of Di Benedetto et al. [14] is the improved of the finite element mesh by increase the number of elements.

3 Results and discussion

The humidity of the analyzed wood dust was in the range of $8.42 \pm 0.45\%$. The required fraction of wood dust was separated by the analytical sieve AS 200. j. $10 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$, for further analyzes aimed at determining the maximum explosion parameters, carried out in an explosive autoclave VA-20. Using an explosive autoclave VA-20, we found the maximum explosion parameters of Norway spruce wood dust (Tab. 1).

Tab. 1 Maximum explosion parameters of Norway spruce dust [19]

Tab. 1 Maximálne výbuchové parametre dreveného prachu smreka obyčajného [19]

Maximum explosion pressure/Maximálny výbuchový tlak	p_{max}	0,7 MPa	$\pm 10 \%$
Maximum pressure increase/Maximálny nárast tlaku	$(dp/dt)_{\text{max}}$	19,9 MPa.s ⁻¹	$\pm 20 \%$
Cubic constant/Kubická konštanta	K_{max}	5,4 m.MPa.s ⁻¹	$\pm 20 \%$
Low explosion limit/Dolná medza výbušnosti	LEL	70 g.m ⁻³	$\pm 10 \%$

The outputs from the simulation are processed using directional vectors of dust

a koncentrácia častíc) naznačujú, že tok tekutiny ovplyvňuje pohyb častíc a naopak.

Výpočet je štandardne inicializovaný. Veľkosť časových krokov je nastavená na konštantnú hodnotu 5 ms. Celkový počet krokov je nastavený na 12, čo nám umožní zobrazit' rozptýlenie častíc v autokláve až do času výbuchu v čase 60 ms. Pre zabezpečenie čo najlepšieho pomeru presnosti výpočtov s ohľadom na čas výpočtov je nastavený počet iterácií na jeden časový krok na 50.

2.2.5 Validácia počítačového modelu

Navrhnutý počítačový model je validovaný pomocou overeného modelu podľa Di Benedetto a kol. [14]. Model simuloval rozvírenie prachových častíc vo výbuchovej autokláve a bol validovaný podľa štandardných meraní nárastu tlaku v autokláve na základe získaných údajov z experimentov. Di Sarlia a kol. [15] použili tento model na skúmanie vplyvu veľkosti častíc prachu na ich rozptyl v autokláve. Výsledky potvrdili správnosť vytvoreného modelu. Odlišnosťou oproti modelu Di Benedetto a kol. [14] je skvalitnenie siete konečných prvkov vďaka zvýšeniu počtu elementov.

3 Výsledky a diskusia

Vlhkosť analyzovaného dreveného prachu sa pohybovala v rozmedzí $8,42 \pm 0,45 \%$. Analytickým sitovacím prístrojom AS 200 bola separovaná požadovaná frakcia dreveného prachu t. j. $10 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$, pre ďalšie analýzy zamerané na stanovenie maximálnych výbuchových parametrov, realizované vo výbuchovom autokláve VA-20. Za pomoci výbuchového autoklávu VA-20 sme zistili maximálne výbuchové parametre dreveného prachu smreka (Tab. 1).

Výstupy zo simulácie sú spracované pomocou smerových vektorov častíc prachu

particles coloured according to their velocity (Fig. 3-5). The simulation is performed for three different concentrations of dust in the air, namely 80, 1000 and 2000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The particle dimensions were 10 μm to 500 μm .

zafarbených podľa ich rýchlosti (Obr. 3-5). Simulácia je prevedená pre tri rozdielne koncentrácie prachu vo vzduchu, konkrétne 80, 1000 a 2000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Rozmery častíc boli 10 μm až 500 μm .

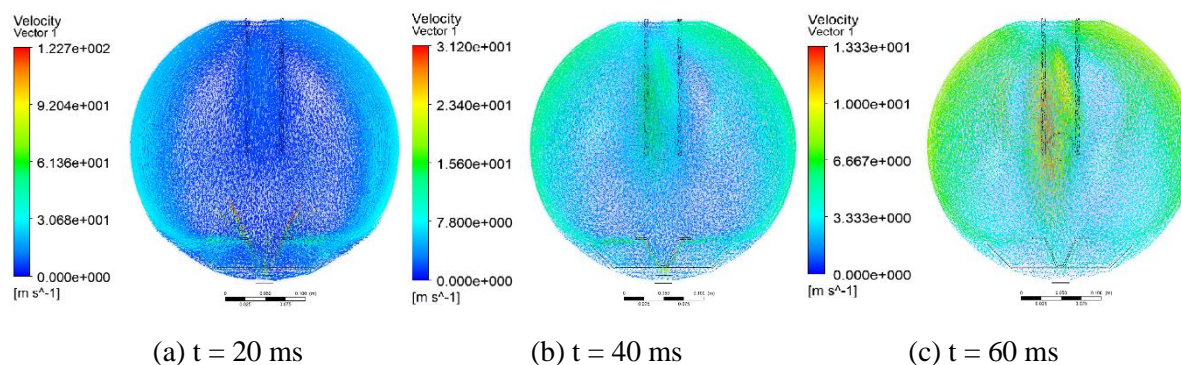


Fig. 3 Time sequence of directional vectors of dust particles coloured by their velocity at a concentration of 80 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Obr. 3 Časová sekvencia smerových vektorov častíc prachu zafarbených podľa ich rýchlosti pri koncentrácii 80 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

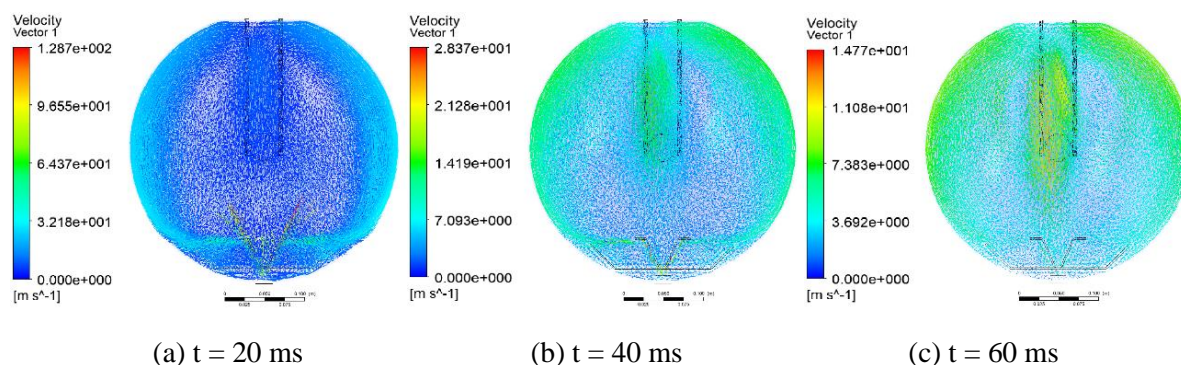


Fig. 4 Time sequence of directional vectors of dust particles coloured by their velocity at a concentration of 1000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Obr. 4 Časová sekvencia smerových vektorov častíc prachu zafarbených podľa ich rýchlosti pri koncentrácii 1000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

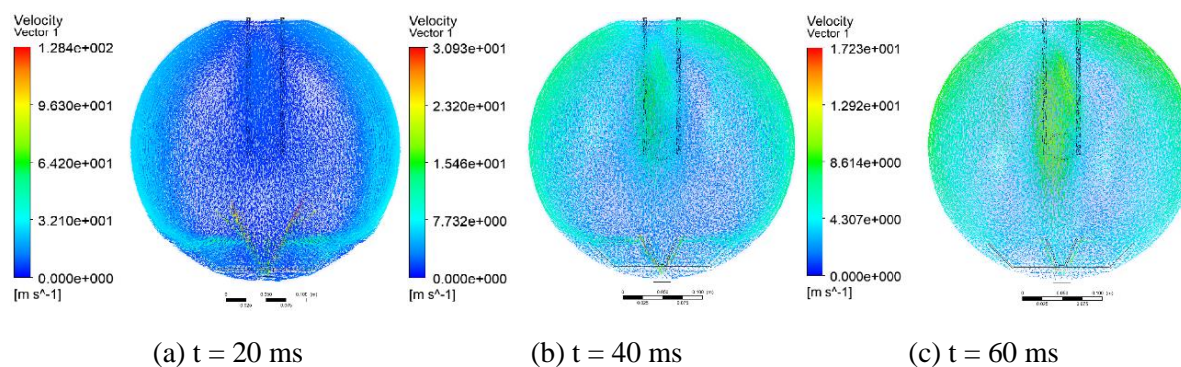


Fig. 5 Time sequence of directional vectors of dust particles coloured by their velocity at a concentration of 2000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Obr. 5 Časová sekvencia smerových vektorov častíc prachu zafarbených podľa ich rýchlosti pri koncentrácii 2000 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

When comparing the results from different concentrations of wood dust particles, no significant difference is visible. In all three cases, the distribution of particles is almost identical, differing only in the density and number of particle vectors in each space. There are also slight differences in the results of the maximum particle velocity, for better clarity they are given in table 2.

Pri porovnaní výsledkov z rozdielnych koncentrácií častíc dreveného prachu, nie je viditeľný signifikantný rozdiel. Vo všetkých troch prípadoch je rozloženie častíc takmer totožné, líši sa len v hustote a počte vektorov častíc v danom priestore. Mierne rozdiely sú aj vo výsledkoch maximálnej rýchlosti častíc, pre lepšiu názornosť sú uvedené v tabuľke 2.

Tab. 2 Maximum velocity of wood dust particles in the explosive autoclave

Tab. 2 Maximálna rýchlosť častíc dreveného prachu vo výbuchovej autokláve

Time/Čas (ms)	Max. velocity of particles at a concentration of 80 g.m^{-3} / Max. rýchlosť častíc pri koncentrácii 80 g.m^{-3} (m.s^{-1})	Max. velocity of particles at a concentration 1000 g.m^{-3} / Max. rýchlosť častíc pri koncentrácii 1000 g.m^{-3} (m.s^{-1})	Max. velocity of particles at a concentration 2000 g.m^{-3} / Max. rýchlosť častíc pri koncentrácii 2000 g.m^{-3} (m.s^{-1})
	20	122,7	128,7
40	31,2	28,3	30,9
60	13,3	14,7	17,2

Based on the above, the amount of wood dust in the autoclave does not have a significant effect on the distribution of particles in space. In all cases, eddy currents have occurred which push the dust particles toward the walls of the autoclave, preventing the homogeneous environment required for explosive concentration tests. The position of the eddy currents at a given moment is clearly visible by displaying the streamlines of the dust particles colored by velocity (Fig. 6-8).

Na základe vyššie uvedeného, množstvo dreveného prachu v autokláve nemá významný vplyv na rozloženie častíc v priestore. Vo všetkých prípadoch došlo k vzniku vírivých prúdov, ktoré tlačia prachové častice k stenám autoklávy, čo bráni vzniku homogénneho prostredia požadovaného pre testy výbušných koncentrácií. Poloha vírivých prúdov v danom okamihu je dobre viditeľná pomocou zobrazenia trás prachových častíc zafarbených podľa ich rýchlosti (Obr. 6-8).

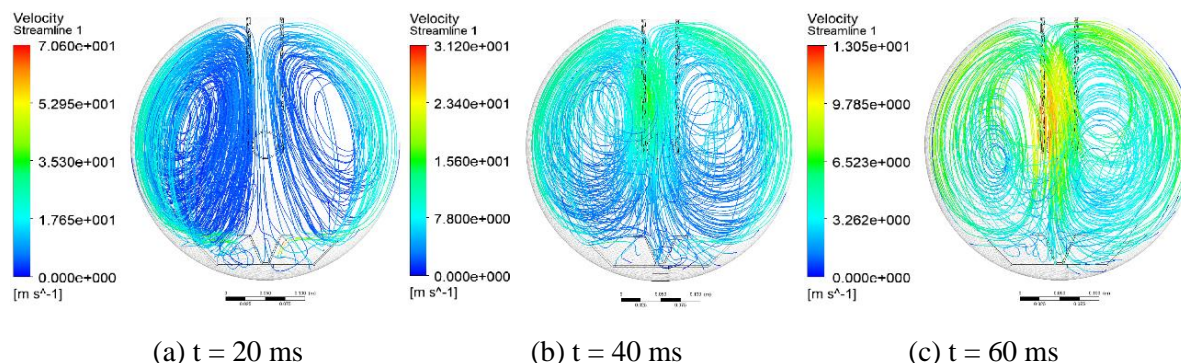


Fig. 6 Time sequence of dust particle streamlines coloured by velocity at a concentration of 80 g.m^{-3}

Obr. 6 Časová sekvencia trás častíc prachu zafarbených podľa rýchlosti pri koncentrácii 80 g.m^{-3}

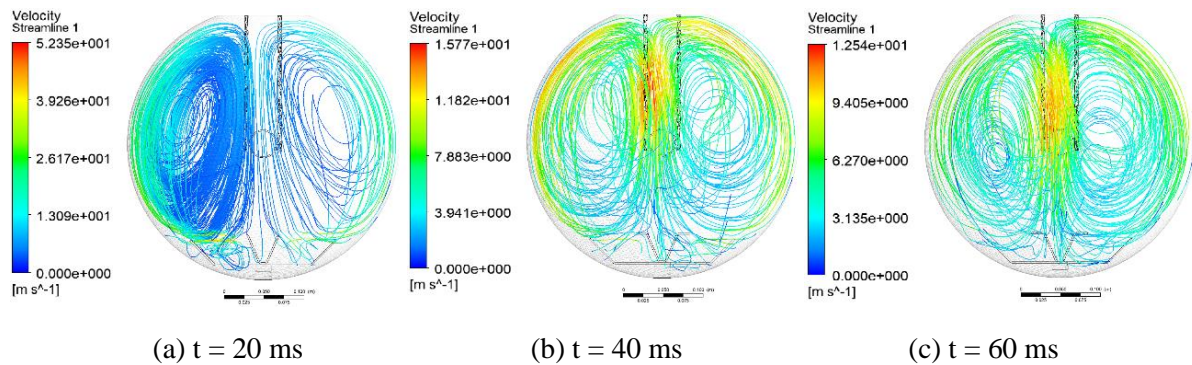


Fig. 7 Time sequence of dust particle streamlines by velocity at a concentration of 1000 g.m^{-3}

Obr. 7 Časová sekvencia trás častíc prachu zafarbených podľa rýchlosti pri koncentrácii 1000 g.m^{-3}

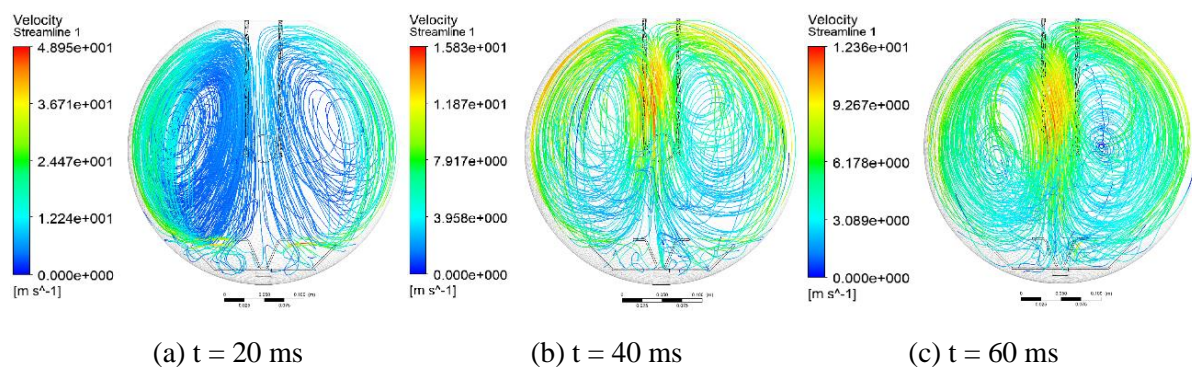


Fig. 8 Time sequence of dust particle streamlines coloured by velocity at a concentration of 2000 g.m^{-3}

Obr. 8 Časová sekvencia trás častíc prachu zafarbených podľa rýchlosti pri koncentrácii 2000 g.m^{-3}

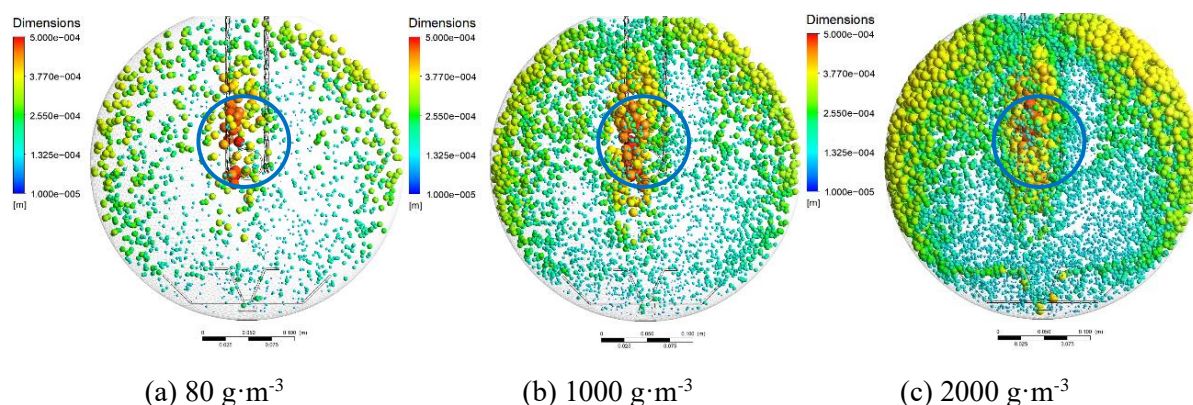
According to the time sequences, there are two eddy currents inside the autoclave, which cause a higher concentration of dust on the walls of the vessel and in the vicinity of the initiation device and the initiation electrodes. The influence of particle size on the formation of crops was shown by the results of the research of Di Benedetto et al. [14] and Di Sarli et al. [15]. They proved that at low values of dust diameter ($d = 10 \mu\text{m}$) the dust is partly entrained by the air, which fills the outer area and partly also the inner zones. As the diameter of the dust particles increases ($d = 100 \mu\text{m}$ and $d = 250 \mu\text{m}$), the flow of dust and air is independent, the dust concentrating mainly on the walls of the vessel. Ray et al. [20] in their work showed that a time of 60 ms is a suitable time to ignite a coal dust, because the turbulence is uniform throughout this volume. It is therefore advisable to check the initiation time for other types of dust as well. Di Benedetto et al. [14] and Di Sarli et al. [15] presented the necessary to develop another way of dispersing dust. The obtained results are relevant to the practice of dust explosion testing and the interpretation of test results and, then,

Podľa časových sekvencií sa vo vnútri autoklávy vyskytujú dva vírivé prúdy, ktoré spôsobujú vznik vyššej koncentrácie prachu na stenách nádoby a v blízkosti iniciačného zariadenia a elektród iniciácie. Vplyv veľkosti častíc na vznik výrov ukázali výsledky výskumu Di Benedetto a kol. [14] a Di Sarli a kol. [15]. Dokázali, že pri nízkych hodnotách priemeru prachu ($d = 10 \mu\text{m}$) je prach čiastočne strhávaný vzduchom, ktorý naplna vonkajšiu oblasť a čiastočne aj vnútorné zóny. Pri zvyšovaní priemeru častíček prachu ($d = 100 \mu\text{m}$ a $d = 250 \mu\text{m}$) sú tok prachu a vzduchu nezávislé pričom sa prach koncentruje hlavne na stenách nádoby. Ray a kol. [20] vo svojej práci ukázali, že čas 60 ms je vhodný čas na zapálenie uholného prachu, pretože turbulencia je v tomto čase rovnomerná v celom objeme. Čas iniciácie je preto vhodné preveriť aj na ďalšie typy prachov. Di Benedetto a kol. [14] a Di Sarli a kol. [15] poukázali na potrebu vyvinúť iný spôsob rozptyľovania prachu. Získané výsledky sú relevantné pre prax skúšania výbuchu prachu a interpretáciu výsledkov skúšok, pričom by sa mali brať ako referencia na zlepšenie podmienok pre štandardné skúšky.

they should be taken as reference to improve the conditions for standard tests.

The distribution of dust particles of different diameters is clearly visible by means of a particle display, where the particles are colored according to their size (Fig. 9). For better clarity, the particle size of the particles is increased. It is also clear from the figures that particles with a larger diameter are concentrated on the walls of the vessel and at the site of initiation.

Rozdielnosť koncentrácií a rozmiestnenie častíc prachu s rozdielnym priemerom je dobre viditeľný pomocou zobrazenia častíc, kde sú častice zafarbené podľa ich veľkosti (Obr. 9). Pre lepšiu názornosť je veľkosť zobrazenia častíc zväčšená. Z obrázkov je zrejmé aj to, že častice s väčším priemerom sa koncentrujú na stenách nádoby a v mieste iniciácie.



(a) $80 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (b) $1000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (c) $2000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$

Fig. 9 Position of dust particles at 60 ms coloured according to their size

Obr. 9 Poloha častíc prachu v čase 60 ms zafarbených podľa ich veľkosti

By creating a volume register in the shape of a sphere with a diameter of 100 mm (in the picture shown in blue) in the vicinity of the initiation device, we can determine the partial concentrations using the mass imbalance function (Tab. 3).

Pomocou vytvorenia objemového registra v tvare gule o priemere 100 mm (na obrázku znázornený modrou farbou) v okolí iniciačného zariadenia vieme s využitím funkcie objemovej nerovnováhy (mass disbalance) stanoviť čiastkové koncentrácie (Tab. 3).

Tab. 3 Comparison of concentrations of dispersed dust in the autoclave

Tab. 3 Porovnanie koncentrácií rozptýleného prachu v autokláve

Concentration at the initiation site assuming a homogeneous environment/ Koncentrácia v mieste iniciácie za predpokladu homogénneho prostredia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	80	1000	2000
Concentration at the initiation site according to the results of the CFD simulation/ Koncentrácia v mieste iniciácie podľa výsledkov simulácie CFD ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	82,5	1027	2042
Percentage difference of values/ Percentuálny rozdiel hodnôt (%)	3,125	2,7	2,1

From the simulation results, we state that the maximum explosion parameters obtained from the experiments in the V-20 autoclave correspond to the concentrations of dispersed dust in the autoclave approximately 2.5% higher than expected from the calculations. This

Z výsledkov simulácie konštatujeme, že maximálne výbuchové parametre uvedené v tabuľke 1 získané z experimentov v autokláve V-20, zodpovedajú koncentrácií rozptýleného prachu v autokláve približne o 2,5% vyššej, než s akou predpokladáme na základe výpočtov.

deviation was found by comparing the concentrations at the initiation site in Table 3.

In the future, it is appropriate to process the simulation of a dispersion of beech wood dust because beech wood classified as deciduous trees is the most processed in Slovakia and the subsequent comparison of deciduous trees with conifers trees.

4 Conclusion

Based on the previous results, we can state the following conclusions:

- we confirmed the need to reconsider the method of scattering dust of Norway spruce wood dust to measure the explosive concentration. Changes in the shape of the dust agitator or delays in the initiation time may be considered.
- the parameters obtained from the tests in the V-20 autoclave correspond to the concentrations of dispersed dust in the autoclave approximately 2.5% higher than what we expect from the calculations.

Acknowledgments

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-17-0005 (80%) and VEGA, project 1/0717/19 (20%).

References / Literatúra

- [1] Skjold T., Eckhoff R., 2016, Výbuchy prachu v priemyselných odvetviach: výskum v 21. storočí, *Chemické látky Engineering Transactions*, 48, 337-342 DOI: 10,3303 / CET1648057.
- [2] Eckhoff, R.K., 2015, Scaling of dust explosion violence from laboratory scale to full industrial scale – A challenging case history from the past, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, 273-282, Doi: 10.1016/j.jlp.2014.12.020
- [3] Siwek, R., van Wingerden, K., Hansen, O.R., Sutter, G., Schwartzbach, Chr., Ginger, G., Meili, R. 2004. Dusa explosion venting and suppression of sonvention spray diers. Eleventh International Symposium on Loss Prevention. Prague, 31. May – 3 June 2004
- [4] van Wingerden, K., Skjold, T., Siwek, R. 2009. Simulation von Staubexplosionen in Sprühtrocken, *Technische Überwachung*, 50. 18-22
- [5] Klippel, A., Scheid, M., Krause, U. 2013a. Investigations into the influence of dustiness on dust explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 26 1616-1626. Doi: 10.1016/j.jlp.2013.07.016
- [6] Klippel, A., Scheid, M., Koperski, J., Wappler, M., Krause, U. 2013b. Infuance od dustiness on small-scale vented dust explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 26 1433-1441. Doi: 10.1016/j.jlp.2013.09.006

Uvedená odchýlka bola zistená z porovnania koncentrácií v mieste iniciácie z tabuľky 3.

Do budúcnosti je vhodné spracovanie simulácii rozvírenia bukového drevného prachu z dôvodu, že bukové drevo zaradené medzi listnaté dreviny, je najviac spracovávané na Slovensku a následné porovnanie listnatých drevín s ihličnatými drevinami.

4 Záver

Na základe predchádzajúcich výsledkov, môžeme vyvodiť nasledovné závery:

- potvrdili sme potrebu prehodnotiť metódu rozptyľovania prachu smrekového drevného prachu na meranie výbušnej koncentrácie. Do úvahy pripadajú zmeny tvaru rozvírovača prachu, poprípade oddialenie času iniciácie;
- parametre získané zo skúšok v autokláve V-20, zodpovedajú koncentrácií rozptýleného prachu v autokláve približne o 2,5% vyššej, než s akou predpokladáme na základe výpočtov.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-17-0005 (80%) a agentúrou VEGA, projekt 1/0717/19 (20%).

- [7] Klippel, A., Schmidt, M., Muecke, O., Krause, U., 2014, Dust concentration measurements during filling of a silo and CFD modeling of filling processes regarding exceeding the lower explosion limit, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 29, 122-137, Doi: 10.1016/j.jlp.2014.02.006
- [8] Directive ATEX 99/92/EC - risks from explosive atmospheres on the minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres)
- [9] Directive ATEX 2014/34/EU - atmosphere to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres.
- [10] Calle, S., Klabá, L., Thomas, D., Perrin, L., Dufaud, O.: Influence of the size distribution and concentration on wood dust explosion: Experiments and reaction modelling, *Powder Technology*, 2005, Volume: 157 Issue: 1-3 Pages: 144-148 DOI: 10.1016/j.powtec.2005.05.021
- [11] Sarvaš, M., Bruchánik, R., Hoffman, J., Chválová, K., Ježovič, V. 2015 Základné charakteristiky lesných drevín. Národné lesnícke centrum. 82 s. ISBN 978-80-8093-112-4
- [12] EN ISO 1666: 2000 Starch. Determination of moisture content. Oven-drying method.
- [13] EN 14034-2+A1: 2012 Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 2: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dp/dt) max of dust clouds
- [14] Di Benedetto A., Russo P., Sanchirico R., Di Sarli V. CFD simulations of turbulent fluid flow and dust dispersion in the 20 liter explosion vessel 2012 *AIChE J*, in press.
- [15] Di Sarlia, V., Russob, P., Sanchiricoa, R., Di Benedetto, A. 2013. CFD Simulations of the Effect of Dust Diameter on the Dispersion in the 20 L Bomb 2013 *Chemical engineering transactions*.
- [16] Launder, B.,E, Spalding, D., B. 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, United Kindom.
- [17] Vesilind P. Aarne 1980 The Rosin-Rammler particle size distribution In: *Resource Recovery and Conservation 1980*
- [18] Elghobashi S. On predicting particle-laden turbulent flows. *Applied Scientific Research*. 1994; 52: 309- 329
- [19] Mračková E., Palugová, M. 2019. Dependency between the Dust Particle Size of Norway SpruceWood and Its Maximum Explosion Parameters. *DELTA, Fire Protection & Safety, Scientific Journal*, 2019, Vol. 13, Iss.2, pp. 56-65 ISSN (print) 1337-0863. ISSN (online) 2585-9730
- [20] Ray, S.K., Mohalik, N.K., Khan, A.M., Mishra, D., Varma, N.K., Pandey, J.K., Singh, P.K. CFD modeling to study the effect of particle size on dispersion in 20l explosion chamber: An overview *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 30, Issue 3, May 2020