

## Effect of Electrode Shape on Progress of Electric Discharge

### Vliv tvaru elektrod na průběh elektrického výboje

Vojtěch Jankůj<sup>1,2,\*</sup>, Aleš Bernatík<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> VSB – Technical University of Ostrava, Institut of Clean Technologies – 511, Faculty of Mining and Geology, VSB – Technical University of Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava – Poruba, Czech Republic; [vojtech.jankuj@vsb.cz](mailto:vojtech.jankuj@vsb.cz), [ales.bernatik@vsb.cz](mailto:ales.bernatik@vsb.cz)

<sup>2</sup> VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering, VSB – Technical University of Ostrava, Lumírova 13, 700 30 Ostrava – Výškovice, Czech Republic; [vojtech.jankuj@vsb.cz](mailto:vojtech.jankuj@vsb.cz), [ales.bernatik@vsb.cz](mailto:ales.bernatik@vsb.cz)

\* Corresponding author: [vojtech.jankuj@vsb.cz](mailto:vojtech.jankuj@vsb.cz)

*Original scientific paper*

*Received: November 15, 2019; Accepted: November 21, 2019; Published: December 31, 2019*

#### Abstract

Minimum ignition energy (MIE) is determined as a one of the parameters when assessing the hazards of a given dust sample. This value indicates the sensitivity of the given sample to electrostatic energy. The legislation determines the procedures and the requirements for the equipment used to determine the MIE. Among other things, it lists requirements for the electrode used such as its material, diameter and pointed spike shape. The ČSN EN ISO/IEC 80079-20-2 standard valid on the territory of the Czech Republic also provides the possibility of using a rounded electrode spike. This formulation leads us to the question of whether the shape of the electrode spike can affect the electric discharge progress and in what way. Within the sequence of measurements carried out, a detailed examination of the impact of the electrode shape on the formation of electric charge was provided, using the MIE-D 1.2 apparatus. Four different electrode spikes shape were used, together with a high-speed camera able to take 210,000 pictures per second. The results show that from the four types of the electrode spikes, the fastest electrical discharge is occurring when a standard pointed spike is used.

**Keywords:** minimum ignition energy; spark ignition; electrode geometry; dust clouds; dust explosion

#### 1 Introduction

Ignition energy is one of the important and essential parameters in the field of combustion and explosion. It completes the oxidizing agent and flammable substance into the so-called fire triangle. If these three components are in the correct ratios and sufficient concentrations, a combustion process may follow. Conversely, if at least one of these components is absent or restricted, no combustion or explosion may occur. In the context of dust burn, the conditions to dust dispersion in the air must also be met, the particle size must allow the propagation of the flame and the dust concentration must be within the explosion range.

#### 1 Úvod

Iniciační energie je jedním z důležitých a podstatných parametrů v oblasti hoření a výbuchu. Doplnuje oxidační prostředek a hořlavou látku do tzv. trojúhelníku hoření. Jsou-li tyto tři složky ve správném poměru a v dostatečných koncentracích, může následovat proces hoření. Je-li naopak alespoň jedna z těchto složek nepřítomna nebo omezena, nemůže dojít k hoření, případně ani k výbuchu. V souvislosti s hořením prachu musí být splněny také podmínky rozvření ve vzduchu, velikost částic umožňující šíření plamene a koncentrace prachu musí být v mezích výbušnosti.

In the context of dust explosions, we talk about the so-called explosive pentagon. This is an extension of the fire triangle, and in addition to the three parameters mentioned, conditions for the explosive dust dispersion within the range of explosion must be also met, and the dust must be dispersed in a closed space [1-3]. If an explosive mixture is ignited, the explosion can be characterized by parameters that are important indicators for the field of safety and explosion protection. Maximum explosion pressure and maximum pressure rise rates are basic indicators in this area. Another parameter is the limit oxygen concentration and explosion range. Practically, in connection with the dust explosion, we work only with the lower explosion limit, as the concentration can vary due to gravity, due to dust settling, but at the same time, its concentration is variable as it dispersion in a given space [2,4].

One of the last questions is then the possibility of ignition for the given mixture. The standard ČSN EN 1127-1 defines the possible sources of ignition to be considered. In total, there are 13 selected sources, including hot surfaces, mechanically generated sparks, electric devices or static electricity [5]. Concerning ignition, the ignition properties of the evaluated explosive atmosphere must be determined. Important data include the determination of the minimum ignition temperature of the dust layer and the explosive atmosphere, as well as the determination of the minimum ignition energy. The minimum ignition or initiation energy (hereinafter called MIE) is defined as the lowest electrical energy accumulated in a condenser, which is sufficient for the discharge to ignite the most readily flammable mixture under the specified test conditions. It can be said that the result indicates the sensitivity to electrostatic electricity (initiation) [6,7]. MIE lies between the highest energy ( $E_1$ ) in which the sample has not been ignited, and the lowest energy ( $E_2$ ), which on the contrary has ignited the sample (1).

V kontextu s výbuchy prachů se hovoří o tzv. výbuchovém pentagonu. Ten je rozšířením hořlavého trojúhelníku, a kromě tří zmíněných parametrů musí být splněny ještě podmínky rozvíření výbušného prachu v mezích výbušnosti a uzavření v prostoru [1-3]. Dojde-li k iniciaci výbušné směsi, výbuch lze charakterizovat parametry, které jsou důležitými ukazateli v oblasti bezpečnosti a ochrany před výbuchem. Mezi základní ukazatele patří znalost maxima výbuchového tlaku a maximální rychlosti jeho narůstání. Dalšími jsou poté limitní obsah kyslíku a meze výbušnosti. Prakticky se v souvislosti s výbuchy prachů pracuje jen s dolní mezí výbušnosti, jelikož koncentrace může být proměnlivá v důsledku působení gravitace, a tedy usazování prachu, ale zároveň i jeho rozvířování v prostoru [2,4].

Jednou z posledních otázek je poté možnost iniciace posuzované směsi. Norma ČSN EN 1127-1 definuje možné zdroje iniciace, které je nutno brát v úvahu. Celkem se jedná o 13 vybraných zdrojů, mezi něž patří například horké povrchy, mechanicky vznikající jiskry, elektrická zařízení nebo statická elektřina [5]. Co se týká iniciace, musí být stanoveny zápalné vlastnosti posuzované výbušné atmosféry. Mezi důležité údaje patří stanovení minimální teploty vznícení vrstvy prachu a výbušné atmosféry, a také stanovení minimální zápalné energie. Minimální zápalná neboli iniciační energie, dále jen MIE, je definována jako nejnižší elektrická energie, nahromaděná na kondenzátoru, která je při výboji právě dostatečná pro způsobení vznícení nejsnadněji zápalné směsi za stanovených zkušebních podmínek. Lze říci, že ve výsledku udává citlivost na elektrostatickou elektřinu (iniciaci) [6,7]. MIE leží mezi nejvyšší energií ( $E_1$ ), u které nedošlo ke vznícení vzorku, a nejnižší energií ( $E_2$ ), u které naopak došlo ke vznícení vzorku (1).

$$E_1 < MIE < E_2 \quad (1)$$

Its determination is subject to current standard methods [8,9]. In the future, a new standard test method could be issued to

Její stanovení je podmíněno současnými standardními metodami [8,9]. V budoucnosti by mohla být vydána nová standardní zkušební

determine MIE for dust clouds. This would define the design of the equipment, the conditions of the explosion vessel, the dust-dispersion system, the synchronization method and other areas. Regardless of the equipment selected, it would have to meet several requirements for the inductance of a discharge circuit, ohmic resistance, electrode material, its diameter, the gap between the electrodes, and other conditions concerning the capacitor [10]. European standard EN 13821 [8] defining equipment and specifying the procedure for determining the MIE for the air-dust mixture. The determination of MIE is based on dispersion a specified amount of dust in the testing chamber. The energy spark is then created between the two electrodes. A visual assessment of the ignition inside the transparent chamber follows – the propagation or, conversely, non-propagation of flame. The main factors influencing the recorded values of MIE are:

- The delay between dust dispersion and igniting the spark
- The way of the dust dispersion– nozzle size and shape
- Spark properties – duration, energy
- The amount of the dust tested and its dispersion from the bottom of the device [11].

It is possible to use several available devices to determine the MIE. Usually, it is a device with a Hartmann glass tube and a volume of 1.2 litres. In the lower part of the tube, there is a system for the dust dispersion of a "mushroom type", around which the sample is placed freely. Dust development follows standard, done with a compressed air pressure of 7 bar, and this dispersed dust is then ignited after a set time delay, using a spark between two electrodes. During the measurement, there are changes in the test sample concentration, delay time and the changes in the ignition energy [8].

Several devices compiled for the determination of MIE comply with the applicable standards. The results between the devices may differ in some cases. This is demonstrated, for example, by a study carried out by Janes et al. [11], who assessed the differences between the devices MIKE 3

metoda pro stanovení MIE oblaku prachů. V té by byla definována konstrukce zařízení, podmínky výbuchové nádoby, systém rozvířování prachu, synchronizační metoda a jiné. Bez ohledu na to, jaké zařízení by bylo vybráno, muselo by splňovat několik požadavků na indukčnost vybíjecího obvodu, ohmický odpor, materiál elektrody, její průměr, mezera mezi elektrodami a další podmínky týkající se kapacitoru [10]. Na území České republiky je implementována Evropská norma EN 13821 [8] definující zařízení a uvádějící postup pro stanovení minimální zápalné energie směsi prachu se vzduchem. Stanovení MIE spočívá v rozvíření stanoveného množství prachu ve zkušební komoře. Mezi dvěma elektrodami je poté vytvořena energetická jiskra. Následuje vizuální posouzení iniciace uvnitř průhledné komory – šíření nebo naopak nešíření plamene. Hlavními faktory, jež ovlivňují zaznamenávané hodnoty MIE, jsou:

- Zpoždění mezi rozptýlením prachu a vyvinutou jiskrou
- Způsob rozvíření – velikost trysky, tvar
- Vlastnosti jisker – doba trvání, energie
- Množství zkoušeného prachu a jeho rozvíření ze dna zařízení [11].

Pro stanovení MIE je možné použít několika dostupných zařízení. Z pravidla se jedná o zařízení s Hartmannovou skleněnou trubicí s objemem 1,2 litrů. V dolní části trubice je umístěn systém „hřibovitého typu“ pro rozvířování prachu, kolem něhož je vzorek volně uložen. Rozvíření prachu je dle normy provedena náparem stlačeného vzduchu o hodnotě tlaku 7 bar a tento rozvířený prach je poté iniciován, po stanovené době zpoždění, jiskrou mezi dvěma elektrodami. V samotných sériích měření dochází ke koncentračním změnám zkoušeného vzorku, doby zpoždění a změnám iniciační energie [8].

Několik zařízení sestavených pro stanovení MIE je v souladu se zmíněnými platnými normami. Výsledky mezi danými přístroji se mohou v některých případech lišit. To dokazuje například studie, kterou provedl Janes a kol. [11], kteří hodnotili rozdíly mezi přístrojem MIKE 3 (Kühner) a HARTMANNOVOU sestavou (Cerchar). Na přístrojích testovali různé druhy prachů o různých iniciačních energiích. Z výsledků měření vyplynulo, že

(Kühner) and HARTMANN (Cerchar). They tested different types of dust on the devices monitoring different ignition energies. The measurement results showed that the MIKE 3 was able to determine lower values than the HARTMANN apparatus. The differences in the determination of MIE by various instruments were also researched by Lepik et al. [12]. In their study, they even worked with and compared three different devices. As in the previous case, the MIKE 3 device was used, and then MIE III (Chilworth Technology Limited). The third device used to determine MIE was MINOR 1 (ANKO Company). On these devices, five types of dust have been tested, under the conditions laid down in the standard [8]. Similarly, as for the study [11], the MIKE 3 showed lower results than the two remaining assemblies in the measurement of the yeast *Torula* and powder paint. With MINOR 1 and MIE III devices, comparable results were reached. For samples of toner and black coal, the results were identical for all devices. The lowest values were measured by the MIE III in potato starch, where the remaining two devices had a higher but comparable value.

For comparing the results between different devices, the recalculation from the given range of the MIE specified in the formula (1) is used, to a uniform value called static minimum ignition energy with the indication  $E_s$ , which is stated in the following equation (2).

$$E_s = 10^{\log E_2 - \frac{I[E_2] \cdot (\log E_2 - \log E_1)}{(NI+I) \cdot [E_2] + 1}} \quad (\text{mJ}) \quad (2)$$

Where:

- I – positive test
- NI – negative test
- I  $[E_2]$  – the number of dust concentrations with ignition
- (NI + I) ·  $[E_2]$  – a total number of dust concentrations tested [8].

Another of the devices that can be used to determine the minimum ignition energy is MIE-D 1.2, a Czech company OZM Research, which complies with the stated standards [8]. As already mentioned above, in general, the instruments used must meet the parameters related to inductance and discharge. Other requirements are related to the electrodes that

přístroj MIKE 3 dokázal stanovit nižší hodnoty, než HARTMANNOVA sestava. Odlišnosti ve stanovení MIE různými přístroji sledovali také Lepík a kol. [12]. V jejich studii pracovali a porovnávali dokonce tři rozdílné přístroje. Stejně jako v předchozím případě byl použit přístroj MIKE 3, dále MIE III (Chilworth Technology Limited) a posledním přístrojem pro stanovení MIE byla sestava MINOR 1 (ANKO Company). Na těchto přístrojích bylo testováno pět druhů prachů za podmínek stanovených normou [8]. Podobně, jako u studie [11] vykazovalo zařízení MIKE 3 nižší výsledky, než dvě zbylé sestavy u měření prachu kvasnice *torula* a práškové barvy. Přístroje MINOR 1 a MIE III měli v těchto měřeních srovnatelné výsledky. U vzorků toneru a černého uhlí byly výsledky totožné pro všechna zařízení. Nejnižší hodnoty naměřil přístroj MIE III u bramborového škrobu, kde zbylá dvě zařízení měla vyšší, ale zároveň mezi sebou srovnatelné hodnoty.

Pro srovnávání výsledků mezi různými zařízeními se používá přepočítání z daného rozmezí MIE uvedené ve vzorci (1) na jednotnou hodnotu nazývanou statická minimální iniciační energie s označením  $E_s$ , uvedená v následující rovnici (2).

Kde:

- I – pozitivní zkouška
- NI – negativní zkoušku
- I  $[E_2]$  – počet koncentrací prachu s iniciací
- (NI + I) ·  $[E_2]$  – celkový počet zkoušených koncentrací prachu [8].

Dalším z přístrojů, který lze využít pro stanovení minimální iniciační energie je MIE-D 1.2 české firmy OZM Research, jenž je v souladu s uvedenými normami [8]. Jak již bylo zmíněno výše, obecně musí používané přístroje splňovat parametry související s indukčností a s vybíjecím obvodem. Další požadavky souvisejí s elektrodami, které jsou

are the source of the ignition of the dispersed dust. The electrodes should be of stainless steel, tungsten, copper or brass with a cylindrical electrode diameter of 2.0 mm ( $\pm 0.5$  mm). The air gap can be adjusted smoothly between the electrodes, which must be at least 6 mm. The electrode should be of a pointed shape.

During MIE determination, the values that affect the results are changed. These values include the change in the ignition delay, the ignition energy and the tested sample concentration. These changes will affect the results, whether the ignition of the mixture inside the cylindrical tube will take place or not, and thus, in the final phase, it is possible to find the lowest energy that can ignite the mixture [8-10]. As was already stated, the standard [8] indicate the use of a pointed shape for the electrode spike. However, the ČSN EN ISO 80079-20-2 standard [13], valid on the territory of the Czech Republic, also offers the possibility of using electrodes with rounded spikes. It is this very option that brings us to the question of whether the shape of the electrode can affect of an electric discharge progress, in what way, or even how the results in determining the MIE can be affected.

## 2 Material and methods

As part of the experimental measurement, carried out at the Faculty of Safety Engineering at VŠB – Technical University of Ostrava, the determination of MIE was done, using different electrode spikes [14]. During the measurement, a basic characteristic of the test dust sample was first determined. This dust was Lycopodium, used as a standard for calibrating the device for the determination of MIE. For the sample, a grain size analysis was done, and humidity was determined. MIE measurement itself took place using the already mentioned apparatus MIE – D 1.2, which is available at the Faculty of Safety Engineering. To ignite the mixture, three types of electrode spikes were used:

- Pointed
- Flat – a perpendicular area to the electrode axis
- Oblique – under a  $45^\circ$  angle.

The basis for comparison was the determination of MIE using commonly used electrodes with pointed spikes according to the

iniciačním zdrojem rozvířeného prachu. Elektrody mohou být z korozivzdorné oceli, wolframu, mědi nebo mosazi s průměrem válcové elektrody 2,0 mm ( $\pm 0,5$  mm). Mezi elektrodami je možné plynule nastavit vzduchovou mezeru, která musí být minimálně 6 mm. Elektroda by měla být špičatého tvaru.

Během stanovování MIE jsou měněny hodnoty, které ovlivňují výsledky. Mezi tyto hodnoty patří změna doby zpoždění iniciace, iniciační energie a koncentrace vzorku, která je zkoušena. Tyto změny ovlivní výsledky, kdy dojde a kdy naopak nedojde k iniciaci směsi uvnitř válcové trubice a v konečné fázi díky tomu nalezneme nejmenší energii, která je schopna směr již iniciovat. [8-10]. Jak bylo zmíněno, norma [8] udává použití špičatého tvaru jako hrotu elektrody, avšak norma ČSN EN ISO 80079-20-2 [13] platná na území České republiky uvádí také možnost použití elektrody se zaoblenými hroty. Právě tato možnost nás zavádí k otázce, zda a jak ovlivní tvar elektrody průběh elektrického výboje, popřípadě i výsledky při stanovování MIE.

## 2 Materiál a metody

V rámci experimentálního měření na Fakultě bezpečnostního inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava bylo provedeno stanovení MIE za použití odlišných hrotů elektrod [14]. Během měření byla nejprve provedena základní charakteristika zkoušeného vzorku prachu. Tímto prachem bylo Lycopodium, které je používáno jako standard pro kalibraci zařízení právě pro stanovení MIE. U vzorku byla provedena síťová analýza a stanovena vlhkost. Samotné měření MIE proběhlo na již zmíněném přístroji MIE – D 1.2, kterým Fakulta bezpečnostního inženýrství disponuje. Pro iniciaci směsi bylo použito tři různých hrotů elektrod:

- Špičaté
- Ploché – kolmá plocha k ose elektrod
- Šikmé – zešikmení pod úhlem  $45^\circ$ .

Základem pro samotné srovnání bylo stanovení MIE za použití běžně používaných elektrod se špičatými hroty dle normy [8]. Během sérií měření byla použita navážka prachu v rozmezí  $150 - 3\,600$  g / m<sup>3</sup> a zpoždění iniciace 60, 90 a 120 ms. Pro ploché a šikmé elektrody již bylo použito zpoždění iniciace

standard [8]. During the measurements, the dust batch was used ranging from 150 to 3600 g / m<sup>3</sup> and ignition delays of 60, 90 and 120 ms. For flat and oblique electrodes, the ignition delay of only 90 ms was used, as with this delay of MIE was determined for pointed electrode spikes. The results obtained showed that the lowest MIE was determined for electrodes with a pointed spike. To compare the results, the recalculation from the equation (2) was applied, where the resulting value is  $E_s = 8.03$  mJ. For the two remaining electrode shapes, the determined energy exceeds the value of 10 mJ. For a flat electrode spike, the value is 13.5 mJ, for a oblique design it is 11.05 mJ. If we include these results into the sensitivity analysis concerning the electrostatic ignition [11], we conclude that the sample is very sensitive to electrostatic initiation. The energy obtained within the range  $3 \text{ mJ} < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$  and, at the same time,  $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$  falls into this category.

Three different electrode shapes were used in this experimental measurement [14] – pointed, flat and oblique. The standard [13] states that electrodes with rounded spikes can also be used. Rounded spikes are recommended to reduce the impact of the corona, which can occur on pointed electrode spikes, influencing the values of the energy spark. Following this premise, the rounded electrode spike was added to the measuring set. Since this spherical spike is not defined, the electrodes with pointed spikes have been rounded using sandpaper. Material and Methods should be described with sufficient details to allow others to replicate and build on published results. You can see all types of electrodes used in the following Fig 1.

pouze 90 ms, jelikož při tomto zpoždění byla u špičatých elektrod stanovena MIE. Ze zjištěných výsledků vyplývá, že nejnižší MIE byla stanovena u elektrod se špičatým hrotem. Pro možnost porovnání byl použit přepoččet ze vzorce (2), kde je tedy výsledná hodnota  $E_s = 8.03$  mJ. U dvou zbylých tvarů elektrod převyšovala zjištěná energie hodnotu 10 mJ. U plochého hrotu elektrody odpovídala hodnota 13,5 mJ, u šikmého provedení poté 11,05 mJ. Zatřídíme-li tyto výsledky do hodnocení citlivosti na elektrostatickou iniciaci [11], dojdeme k závěru, že vzorek je velmi citlivý k elektrostatické iniciaci. Jelikož získaná energie v rozmezích  $3 \text{ mJ} < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$  a zároveň  $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$  spadá právě do této kategorie.

V tomto experimentálním měření [14] byly použity tři rozdílné tvary hrotů elektrod – špičaté, ploché a šikmé. Norma [13] říká, že mohou být použity také elektrody se zaoblenými hroty. Zaoblené hroty jsou doporučeny z důvodu snížení vlivu koróny, která by mohla vznikat na špičatých hrotech elektrod, a která by mohla ovlivnit hodnoty energie jiskry. V závislosti na tomto sdělení bylo provedeno doplnění této sady měření právě o tento zaoblený tvar elektrody. Jelikož není tento hrot kulovitého tvaru definovaný, bylo u elektrod se špičatými hroty provedeno jejich zaoblení smirkovými papíry. Všechny typy použitých elektrod můžete vidět na následujícím Obr 1.



**Fig 1.** Electrode spikes

**Obr. 1** Jednotlivé hroty elektrod

Energy is evaluated in relation to the spark, but also its duration. To evaluate the duration of the electric discharge spark for these four different electrode spikes, a high-speed camera FASTCAM SA-Z was used. With its help, it is possible to capture the course of electrical discharge, its duration, and also its extinction. During the measurement, the electrodes were placed into the MIE-D 1.2 device and tested. A high-speed camera recorded an electric discharge at 210,000 frames per second and thanks to this, it was possible to analyse the flashed over was monitored, as the device used movable and static electrodes. The energy of sparks in detail. The distance between the electrodes in which a spark-electric discharge electrical discharges of 1000 mJ, 300 mJ, 100 mJ and 30 mJ were tested, and these energies were recorded in the number of ten repetitions for each shape of the electrode spike. Subsequently, the data were compared, evaluated and conclusions drawn from them.

### 3 Results and discussions

Depending on the specified energy, an electrical discharge flashed over, which could be captured using a high-speed camera. Thanks to its high scanning frequency, it was possible to monitor how pulsation occurs during the lifetime of the spark electric discharge. These discharges were always of a different shape, which is due to the gaseous environment through which the discharge passes. Some examples of the passage of electrical discharges by the environment are shown in Fig 2.

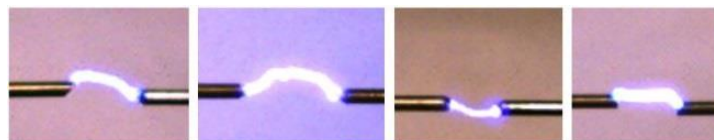


Fig 2. Typical electrical discharges progress

Obr. 2 Typické projevy elektrických výbojů

In the case of higher energy, a plasma effect was observed, into which a strong electrical discharge gradually passed. With higher energy, the duration of the electric discharge was also

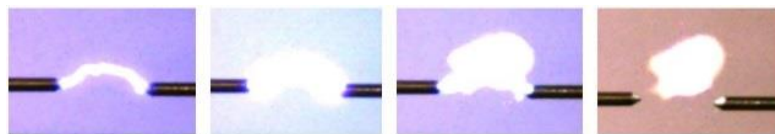
V souvislosti s jiskrou je hodnocena její energie, ale také doba trvání. Pro možnost hodnocení doby trvání jiskry elektrického výboje u těchto čtyř odlišných zakončení elektrod bylo použito vysokorychlostní kamery FASTCAM SA-Z. Díky ní je možné zachytit průběh vzniku elektrického výboje, dobu jejího trvání, a také její zánik. Během provedené sady měření byly elektrody umístěny do zařízení MIE-D 1.2 a bylo provedeno jejich testování. Vysokorychlostní kamera zaznamenávala elektrický výboj s rychlostí 210000 snímků za sekundu a díky tomu bylo možné vzniklé jiskry detailně hodnotit. Byla pozorována vzdálenost mezi elektrodami, při které vznikne jiskrový elektrický výboj a následně doba jeho trvání. Vzdálenost, při které dojde k přeskočení elektrického výboje, byla sledována, protože použitý přístroj používá pohyblivé a statické elektrody. Testovány byly energie elektrických výbojů 1000 mJ, 300 mJ, 100 mJ a 30 mJ, kdy byly zaznamenány tyto energie v počtu deseti opakování pro jednotlivý tvar elektrodového hrotu a následně mezi sebou porovnávány, hodnoceny a učiněny závěry.

### 3 Výsledky a diskuse

V závislosti na stanovené energii docházelo k přeskočení elektrického výboje, který bylo možné zachytit pomocí vysokorychlostní kamery. Díky její vysoké frekvenci snímání bylo možné sledovat, jak dochází k pulsování během životnosti jiskrového elektrického výboje. Tyto výboje byly vždy různého tvaru, což je způsobeno plynným prostředím, kterým výboj prochází. Některé příklady průchodu elektrického výboje prostředím jsou zobrazeny na Obr. 2.

U vyšších energií byl pozorován vznik plazmatického efektu, ve který postupně přešel silný elektrický výboj. S vyšší energií byla

evident in addition to the light effect. It was possible to determine the length using the recordings. In the following sequence of illustrations, Fig 3, the course of the formation and subsequent termination of the electric discharge at the pointed electrode spike was displayed, with an energy 1000 mJ. As has already been stated, after the first occurrence of the electrical discharge, there was a more intense course recorded, and at the same time, there was flickering observed. Then, the electric discharge ceased while the plasma effect occurred.



**Fig 3.** Electrical discharges, 1000 mJ

**Obr. 3** Elektrický výboj, 1000 mJ

For lower energies, the plasma effect was no longer at such a scale or was not frequently observed at all. In these cases, the spark was less energetic at first sight, its duration was considerably shorter. However, there have been several cases when the energy of 1000 mJ showed rapid electric discharge. It was possible to monitor the length of the electrical discharge. This parameter has been evaluated for the given energy and various types of electrode spikes. The duration of the discharge was calculated from the first appearance of the spark electric discharge to its extinction, or eventually, to the occurrence of the plasma effect. From this point of view, this was a purely subjective evaluation based on the visual observation and the estimation of the interruption of the electrical bond between the two electrodes. The following Tab. 1 summarizes the average values of these two parameters, which resulted in an electrical discharge occurrence. The minimum requirement for the electrode gap size is 6 mm. The movable electrode moves towards the static electrode and at some point, the electric spark flashes over. This starting point was used to measure the size of the gap between the electrodes.

krom světelného efektu patrná také doba trvání elektrického výboje. Bylo možné z pořízených záznamů tuto délku stanovit. Na následujícím sledu obrázků, Obr. 3, je zobrazen průběh vzniku a následného zániku elektrického výboje u špičatého hrotu elektrod s energií 1000 mJ. Jak již bylo řečeno, po prvním objevení elektrického výboje došlo k zintenzívnění jeho průběhu a zároveň docházelo k problikávání a následně elektrický výboj zaniká za vzniku plazmatického efektu.

U nižších energií již nebyl vznik plazmatického efektu v takovém měřítku, nebo nebyl mnohdy ani pozorován. Jiskra byla v těchto případech na první pohled méně energická, doba trvání byla o poznání kratší. Avšak bylo zaznamenáno několik případů, kdy i u energie 1000 mJ došlo k rychlému průběhu elektrického výboje. Délka vzniklého elektrického výboje byla hodnocena jako další parametr pro dané energie a různé typy hrotů elektrod. Délka trvání výboje byla počítána od prvního objevení jiskrového elektrického výboje až po jeho zánik, popřípadě, kdy vznikl plazmatický efekt. Z tohoto hlediska se jednalo o čistě subjektivní vyhodnocení na základě vizuálního pozorování a odhadu přerušení elektrické vazby mezi dvěma elektrodami. Následující Tab. 1 shrnuje průměrné hodnoty těchto dvou parametrů, při kterých docházelo ke vzniku elektrického výboje. Minimální požadavek na velikost mezery mezi elektrodami je 6 mm. Pohyblivá elektroda provádí pohyb směrem ke statické elektrodě a v určitém okamžiku dojde přeskočení elektrické jiskry. Tento výchozí bod byl použit pro měření velikosti mezery mezi elektrodami.



**Tab. 1** Average values of gap length between electrodes and duration of electrical discharges

**Tab. 1** Průměrné hodnoty velikosti mezery mezi elektrodami a doby trvání elektrického výboje

Energy/Energie [mJ]	Pointed Spike/Špičatý hrot		Oblique Spike/Šikmý hrot		Flat Spike/Kolmý hrot		Rounded Spike/Zaoblený hrot	
	Gap Length/ Velikost mezery [mm]	Duration/Čas [ms]	Gap Length/ Velikost mezery [mm]	Duration/Čas [ms]	Gap Length/ Velikost mezery [mm]	Duration/Čas [ms]	Gap Length/ Velikost mezery [mm]	Duration/Čas [ms]
1000	10,37	0,484	9,26	0,504	10,17	0,505	6,87	0,362
300	9,70	0,298	8,42	0,279	7,59	0,319	6,92	0,331
100	11,29	0,114	10,51	0,113	8,52	0,113	6,33	0,144
30	8,23	0,047	6,92	0,069	6,87	0,043	6,48	0,045

As can be seen in Tab. 1, the pointed spike electrode showed much larger gaps for the spark flashes than the other shapes types. Conversely, the smallest distance between the electrodes showed a rounded spike electrode, when the spark flashed over almost after the movable electrode was fully ejected. The largest distance between the electrodes in which the electrical discharge occurred, was recorded for the electrode with the oblique spike. This was a gap of size 13.20 mm when the energy 1000 mJ was used. By contrast, the smallest distance between the electrodes was recorded when the electrode was fully ejected, in this case, the electrode with rounded spikes. Comparing the length of the electric discharge, we can see almost identical results in the case of 100 mJ energy. For pointed, oblique and flat spikes, the average duration of the electric discharge was recorded 0.114 ms or 0.113 ms. In the case of a rounded electrode spike, there was a short extension of the discharge to the 0.144 ms. The shortest duration of electrical discharge during this energy was detected at the flat electrode spike with a time of 0.024 ms. This was the shortest recorded time of the electric charge duration from all used energies. If we compare the size of gaps for the given energies, we find out that in all cases there was an electric discharge in the longest distance between the electrodes with a pointed spike. By contrast, the shortest distance between electrodes at the time of the electrical discharge was recorded on the rounded electrode type. The duration of the discharge itself had already differed depending on the size of the energy as seen from the Tab. 1. When using the largest energy 1000 mJ, the longest discharges were recorded in the flat electrode spike and the smallest for the rounded spike.

Taking into account that MIE uses different concentrations and energies to find the lowest energy, it is possible that the electrode spike

Jak je možné vidět v Tab. 1, u špičatého hrotu elektrody docházelo k přeskočení elektrické jiskry ve větších mezerách, než u ostatních. Naopak nejmenší vzdálenosti mezi elektrodami vykazovala elektroda se zaobleným hrotem, kdy docházelo k přeskočení elektrické jiskry téměř až po úplném vysunutí pohyblivé elektrody. Největší vzdálenost mezi elektrodami, při které došlo ke vzniku elektrického výboje, byla zaznamenána u elektrody se šikmým hrotem. Jednalo se o mezeru o velikosti 13,20 mm, kdy byla použita energie 1000 mJ. Naopak nejmenší vzdálenost mezi elektrodami byla zaznamenána při úplném vysunutí elektrody, v tomto případě se zaoblenými hroty. Srovnáme-li délku elektrického výboje, můžeme si všimnout téměř shodných výsledků v případě energie 100 mJ. U špičatého, šikmého a plochého hrotu byla zaznamenána průměrná délka trvání elektrického výboje 0,114 ms, respektive 0,113 ms. V případě zaobleného hrotu elektrod došlo ke krátkému prodloužení délky výboje na hodnotu 0,144 ms. Nejkratší délka trvání elektrického výboje při této energii byla zjištěna u kolmého hrotu elektrody s časem 0,024 ms. Jednalo se celkově o nejkratší zaznamenanou dobu trvání elektrického výboje ze všech použitých energií. Srovnáme-li velikosti mezer pro dané energie, zjistíme, že ve všech případech docházelo ke vzniku elektrického výboje v nejdělsí vzdálenosti mezi elektrodami se špičatým hrotem. Naopak u zaobleného typu elektrod byla zaznamenána nejkratší vzdálenost mezi elektrodami v době vzniku elektrického výboje. Délka trvání samotného výboje se již lišila v závislosti na velikosti energie, jak je patrné z Tab. 1. Při použití největší energie 1000 mJ byly zaznamenány nejdělsí výboje u plochého hrotu elektrody a nejmenší pro zaoblený hrot.

Vezmeme-li v potaz, že MIE používá různých koncentrací a energií, aby byla

shape itself will affect the result as well as the various devices and assemblies by which this energy value is monitored. The results show that electrical discharges are the fastest and most likely the easiest when using a pointed electrode spike. This shape is commonly used and is designed for the determination of MIE. If a rounded spike is used, the results may be distorted due to a delay in the initiation of the time as determined by the duration of the electrical discharge.

#### 4 Conclusion

The article summarizes the results of the experimental measurement, during which the various shapes of the electrodes used to ignite the dust mixture were examined in detail during the determination of the MIE. In the experiment, electrodes with rounded, oblique, flat and pointed spikes were manufactured. These were compared to each other thanks to high-speed camera recordings. Since the used MIE determination device uses a static and movable electrode, the gap size parameter was monitored, which is flashed out by an electrical discharge. The easiest way, hence, the greatest distance between the electrodes, showed the spark occurrence in the case of a pointed spike electrode. Conversely, the worst results were achieved when using a rounded electrode spike, when the electric discharge occurred only after the electrode was completely ejected. Another parameter observed in the measurement was the duration of the electrical discharge. In this case, different values were recorded depending on the amount of energy used. From the records, it is possible to conclude that the use of different spikes of electrodes would cause divergent results, as well as in the case of the use of various instruments for the determination of MIE. During the determination of MIE, there are concentration changes in the sample and the delay of ignition from the beginning of the sample distribution. In this case, the size of the gap in which the electrical discharge occurs is likely to play a role. At the same time, a different spark duration was observed. Of the ten repetitions, there were several cases where the duration of the electrical discharge was decreased. The smallest value fluctuations were achieved with lower energy sizes, such as 30 mJ, but also 100 mJ. Following these results, it would be advisable to make MIE determination

nalezena opravdu nejnížší energie, je možné, že právě tvar hrotu elektrody ovlivní výsledek stejně tak, jako různé zařízení a sestavy, kterými je tato hodnota energie vyhledávána. Výsledky ukazují, že nejrychleji a pravděpodobně i nejsnadněji dochází ke vzniku elektrického výboje v případě použití špičatého hrotu elektrody. Tento tvar je běžně využíván v zařízeních pro stanovení MIE. V případě použití zaobleného hrotu by mohlo docházet ke zkreslování výsledků způsobené zpožděním doby, kdy dojde k iniciaci i, jak bylo zjištěno dobou trvání elektrického výboje.

#### 4 Závěr

Článek sumarizuje výsledky experimentálního měření, během kterého byly detailně zkoumány různé tvary hrotů elektrod používaných pro iniciaci prachovzdušné směsi během stanovování MIE. V rámci pokusu byly vyhotoveny elektrody se zaoblenými, šikmými, plochými a špičatými hroty. Ty byly mezi sebou díky záznamům z vysokorychlostní kamery porovnávány. Vzhledem k tomu, že použitý přístroj pro stanovení MIE využívá statickou a pohyblivou elektrodu, byl sledován parametr velikosti mezery, při které dojde k přeskočení elektrického výboje. Nejsnadněji, tedy v největší vzdálenosti mezi elektrodami, docházelo ke vzniku jiskry v případě špičatého hrotu. Naopak, nejhorších výsledků bylo dosaženo v případě použití zaobleného hrotu elektrod, kdy vznikl elektrický výboj až po kompletním vysunutí elektrody. Dalším parametrem pozorovaným v realizovaném měření byla doba trvání elektrického výboje. V tomto případě docházelo k zaznamenání různých hodnot v závislosti na velikosti použité energie. Ze záznamů je možné soudit, že by použití odlišných hrotů elektrod zapříčinilo odlišné výsledky, stejně tak jako v případě použití různých aparatur pro stanovení MIE. Během stanovování MIE dochází ke koncentračním změnám vzorku a době zpoždění iniciace od počátku rozvíření vzorku. V tomto případě by mohla hrát roli právě velikost mezery, při které dojde ke vzniku elektrického výboje. Zároveň byla pozorována rozdílná doba trvání jiskry. Z deseti opakování došlo k několika případům, kdy byla snížena doba trvání elektrického výboje. Nejmenších výkyvů hodnot bylo dosaženo u nižších velikostí energií, jako u energie 30 mJ, ale také

using different spikes of electrodes to compare the actual effect of MIE with the type of electrode spike. Predominantly, rounded spike electrodes should be used, as stated in the standard ČSN EN ISO/IEC 80079-20-2.

### Acknowledgement

This article was written in connection with project Institute of clean technologies for mining and utilization of raw materials for energy use - Sustainability program. Identification code: LO1406. Project is supported by the National Programme for Sustainability I (2013-2020) financed by the state budget of the Czech Republic.

### References / Literatura

- [1] Bisel A., Kubainsky C., Steiner D., Bordeaux D., Benabdillah J., 2016, The minimum ignition energy of powder mixtures, *Chemical Engineering Transactions*, 48, 433-438 DOI: 10.3303/CET1648073
- [2] Amyotte Paul R., Eckhoff Rolf E., 2010, Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview, *Journal of Chemical Health & Safety*, 17, 15-28 DOI:10.1016/j.chas.2009.05.002
- [3] Chaudhari P., Mashuga V. Ch., 2017, Partial inerting of dust clouds using a modified standard minimum ignition energy device, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 48, 145-150 DOI: 10.1016/j.jlp.2017.04.022
- [4] CSN EN 13237 Potentially explosive atmospheres – Terms and definitions for equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres, 2013 Czech Office for Standards, Metrology and Testing
- [5] CSN EN 1127-1 ed. 2 Explosive atmospheres – Explosion prevention and protection – Part 1: Basic concepts and methodology, 2012 Czech Office for Standards, Metrology and Testing
- [6] Hosseinzadeh S., Berghmans J., Degreve J., Verplaetsen F., 2019, A model for the minimum ignition energy of dust clouds, *Process Safety and Environmental Protection*, 121, 43-49 DOI 10.1016/j.psep.2018.10.004
- [7] Eckhoff Rolf E., 2005, Current status and expected future trends in dust explosion research, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 225-237 DOI: 10.1016/j.jlp.2005.06.012
- [8] European Standard EN 13821:2002 Potentially explosive atmospheres – Explosion prevention and protection – Determination of minimum ignition energy of dust-air mixture, Comite Europeen de normalisation
- [9] CSN EN 13821 Potentially explosive atmospheres – Explosion prevention and protection – Determination of minimum ignition energy of dust-air mixture, 2005 Czech Office for Standards, Metrology and Testing
- [10] Eckhof Rolf K., 2019, Measurement of minimum ignition energies (MIEs) of dust clouds – History, present, future, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 61, 147-159 DOI: 10.1016/j.jlp.2019.05.001
- [11] Janes A., Chaineaux J., Carson D., Le Lore P. A., 2008, MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: comparison of measured minimum ignition energy (MIE), *Journal of Hazardous Materials*, 152, 32-39 DOI 10.1016/j.jhazmat.2007.06.066

u 100 mJ. V návaznosti na tyto výsledky by bylo vhodné provést stanovení MIE s použitím odlišných hrotů elektrod a porovnat tak skutečné ovlivnění MIE s daným typem hrotu elektrod. Převážně poté použití zaoblených hrotů elektrod, jak umožňuje norma ČSN EN ISO/IEC 80079-20-2.

### Poděkování

Tento článek vznikl v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin – Projekt udržitelnosti. Identifikační kód: LO1406. Projekt je podporován Národním programem udržitelnosti financovaném ze státního rozpočtu ČR.

[12] Lepik P., Gabel D., Adamus W., Mokos L., Mynarz M., Serafin J., 2015, Determination of the minimum ignition energy on different devices, Transactions of the VŠB – Technical university of Ostrava, Safety Engineering Series, 10, 8-14 DOI 10.1515/tvsbses-2015-0002

[13] CSN EN ISO/IEC 80079-20-2 Explosive atmospheres – Part 20-2: Material characteristics – Combustible dusts test methods, Czech Office for Standards, Metrology and Testing

[14] Bajer L., 2018, Effect of electrode shape on minimum ignition energy of dust, VSB – Technical university of Ostrava, Faculty of Safety engineering.