

doc. dr inż. Krzysztof CYBULSKI

dr inż. Bronisław M. WIECHUŁA

Tel. : 32 3246 563

e-mail: wiechula@gig.katowice.pl

## Wyładowania elektrostatyczne, jako efektywne źródło zapłonu w atmosferach potencjalnie wybuchowych.

### Streszczenie

**Streszczenie.** Wyładowania elektrostatyczne z naelektryzowanych nieprzewodzących materiałów niemetalowych mogą stwarzać zagrożenie wybuchem. W artykule opisano model iskiernika jako przyrządu do oceny energii wyładowań elektrostatycznych służącej szacowaniu zdolności zapalającej.

Przedstawiono teoretyczne wartości energii rozładowania, jaka może towarzyszyć różnym rodzajom wyładowań elektrostatycznych. Na fotografiach pokazano etapy spalania we wnętrzu komory iskiernika testowej metanowej mieszaniny wybuchowej, w wyniku wyładowania elektrostatycznego towarzyszącego rozładowaniu naelektryzowanego nieprzewodzącego materiału niemetalowego..

### Teoretyczna ocena energii - Zapalność

W dowolnym wyładowaniu elektrostatycznym może uwalniać się energia rozładowania [W<sub>o</sub>] zdolna do wywołania zapłonu niemal wszystkich gazowych atmosfer wybuchowych.

### Wyładowanie elektrostatyczne

Wyładowanie elektrostatyczne może wystąpić na skutek naelektryzowania elektrycznie izolowanego ciała człowieka. W większości przypadków, właściwie cała zgromadzona energia na ciele człowieka jest rozpraszana w wyładowaniu elektrostatycznym. Wyładowanie elektrostatyczne jest bardzo szybkie i z reguły wytwarza słyszalne "trzaski". W najbardziej praktycznych przypadkach, rozprasza niemal całą dostępną energię naelektryzowania [W<sub>o</sub>], która jest wyrażana jednym alternatywnych wzorów:

$$W_o = \frac{1}{2}QU \quad \text{lub} \quad W_o = \frac{1}{2}CU^2 \quad \text{lub} \quad W_o = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

gdzie :

W<sub>o</sub> (J) - energia naelektryzowania,

Q (C) - ilość ładunku na przewodniku,

U (V) - potencjał na przewodniku,

C (F) - pojemność do ziemi.

Wielkość energii naelektryzowania  $[W_o]$  na płytce (o grubości  $d = 10^{-3}$  m i powierzchni  $A = 4,0 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>) naelektryzowanego poliwęglanu przezroczystego o względnej przenikalności elektrycznej  $\epsilon = 3$ , (przenikalność względna powietrza  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m) i gęstości powierzchniowej ładunku  $\sigma = 1,0 \times 10^{-5}$  Cm<sup>-2</sup>, wynosi:

$$W_o = \frac{CU^2}{2} = \frac{Ad\sigma^2}{2\epsilon\epsilon_0} = 0,36 \text{ mJ}$$

Równoważna „pojemność”  $[C_e]$ , płytki, (o wartościach  $d$ ,  $A$  oraz  $\epsilon$  jak powyżej) wynosi:

$$C_e = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d} = 222 \text{ pF}$$

Energia rozładowania  $[W_r]$  naelektryzowanej płytki, na której zgromadził się ładunek  $Q = 400$ nC zachowanie gęstość ładunku powierzchniowego  $[\sigma]$ :

$$W_r = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_e} = 0,36 \text{ mJ}$$

Przy pojemności człowieka  $C_c = 300$  pF i zmierzonej wartości potencjału  $U = 8$  kV po naelektryzowaniu płytki metodą kontaktowo-tarciową (pocieranie tkaniną poliamidową) i równoważna wartość energii rozładowania człowieka naelektryzowanego przez indukcję  $[W_r]$  w postaci wyładowania elektrostatycznego może wynieść:

$$W_r = \frac{1}{2} C_c U^2 = W_r = 9,6 \text{ mJ}$$

Typowe wartości pojemności przewodników podane są w Tabelicy.

Tabelica: Wartości pojemności dla typowych przewodników

Obiekt	Pojemność C (pF)
Małe wyroby metalowe (czerpak, końcówka wylotowa węża)	10 do 20
Małe pojemniki (wiadro, bęben 50 litrowy)	10 do 100
Średnie pojemniki (250 litrów do 500 litrów)	50 do 300
Większe elementy instalacji przemysłowej bezpośrednio otoczone przez uziemioną konstrukcję	100 do 1 000
Ciało ludzkie	100 do 300

Przykład obliczenia energii rozładowania:

Nieziemiony kontener metalowy jest napełniany proszkiem z urządzenia mielącego. W takiej sytuacji; prąd ładowania  $I$ ,  $I \approx 10^{-7}$  A; rezystancja upływu kontenera do ziemi  $R = 10^{10}$   $\Omega$ ; a jego pojemność  $C = 100$  pF. Maksymalne napięcie na kontenerze:

$$V_{\max} = IR = 1 \text{ kV},$$

a maksymalna energia uwalniana w wyładowaniu elektrostatycznym:

$$W_r = 1/2 CV^2_{\max} = 2,5 \text{ mJ}$$

Zdolność zapalania od wyładowań elektrostatycznych może zazwyczaj być oceniona poprzez porównanie zmagazynowanej energii, z minimalną energią zapłonu substancji palnej. Wyładowania elektrostatycznego można uniknąć poprzez uziemienia wszystkich elementów przewodzących prąd np. sprzętu, przewodzących produktów, a także człowieka.

### **Wyładowania snopiaste.**

Wyładowania snopiaste mogą zapalać większość palnych gazów i par. Obecny stan wiedzy wskazuje jednak, że niezależnie od ich minimalnej energii zapłonu pyły palne nie mogą być zapalone przez wyładowania snopiaste pod warunkiem, że w sąsiedztwie brak palnych gazów lub par. Wyładowania snopiaste mogą mieć energię do 4 mJ. Ta równoważna energia została określona przez przekształcenie ich w wyładowania elektrostatyczne w gazach. W warunkach przemieszczania dużych ilości pyłu o elektrostatycznych właściwościach rozpraszających lub nieprzewodzących, wyładowań snopiastych nie można uniknąć.

### **Rozprzestrzeniające wyładowania snopiaste.**

Wartość energii rozładowania uwalnianej w rozprzestrzeniającym wyładowaniu snopiastym można obliczyć i typowe jej wartości są większe lub równe 1 J. Wartość ta zależy od pola powierzchni, grubości i gęstości powierzchniowej ładunku na naelektryzowanym nieprzewodzącym materiale niemetalowym. Rozprzestrzeniające wyładowania snopiaste mogą zapalać gazowe i pyłowe atmosfery wybuchowe.

### **Wyładowania stożkowe.**

Warunki konieczne dla wystąpienia wyładowań stożkowych są złożone. Czynnikiem, które mają wpływ na wyładowania stożkowe są rezystywność masy pyłu, prąd ładowania, objętość i geometria masy pyłu oraz rozmiar cząstek. W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzających, że atmosfery palnych gazów i par jak również atmosfery wrażliwych palnych pyłów mogą być zapalone przez tego typu wyładowania.

Do oszacowania energii rozładowania  $[W_r]$  w wyładowaniu stożkowym występującego np. w silosach o średnicach w zakresie 0,5 m do 3,0 m i w trakcie ładowania pyłami o średnim rozmiarze w zakresie 0,1 mm do 3,0 mm, może być użyty poniższy wzór numeryczny:

$$W_r = 5.22 \times D^{3,36} \times d^{1,46}$$

gdzie:

$W_r$  (mJ) – energia rozładowania w trakcie wyładowania stożkowego;

$D$  (m) - średnica uziemionego przewodzącego silosu;

$d$  (mm) - średni rozkład rozmiaru cząstek pyłu tworzącego stożek.

Jak wynika z powyższego wzoru, wyładowanie stożkowe uformowane przez gruby pył mają dużo większą energię niż te od drobnego pyłu. Z sytuacją największego zagrożenia ma się do czynienia wówczas, kiedy manipuluje się nieprzewodzącymi cząstkami razem z drobnym pyłem (przesiew) tworzącym chmurę pyłu o niskiej wartości minimalnej energii zapłonu.

Teoretycznie możliwe są też wyładowania-błyskawice, ale nie były one obserwowane w działalności przemysłowej.

## Ocena zdolności zapalającej

Zdolność zapalająca wyładowania elektrostatycznego jest szacowana przez porównywanie energii rozładowania  $[W_r]$ , z energią zapłonu  $[E_z]$  substancji palnej. Zdolność zapalająca jest zależna od szeregu parametrów a w szczególności od rodzaju elektryzowanego materiału. Wyładowanie elektrostatyczne w gazie ma charakter początkowego wyładowania niesamoistnego przechodzącego w wyładowanie samoistne. W wyładowaniu elektrostatycznym następuje rozdział ładunku przestrzennego, w jego czołowej warstwie gromadzą się elektrony, a jony dodatnie pozostają w dalszych warstwach. Warunkiem wystarczającym do dalszego rozwoju wyładowania jest ciągle pojawianie się nowych elektronów wtórnych na skutek bombardowania kolejnych warstw powietrza jonami dodatnimi, fotojonizacji powierzchni uziemionego przewodzącego materiału i cząstek otaczającego powietrza. Efektywność jonizacyjna tych zjawisk zależy od ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza, promienia ostrza, odległości i kształtu elementu elektryzowanego, jak również od prawidłowego uziemienia przewodzącego elementu.

Napięcie początkowe  $[U_0]$  wyładowań samoistnych opisuje prawo Paschena, które stwierdza, że napięcie początkowe  $[U_0]$  wyładowania elektrostatycznego w stałej temperaturze jest wyłącznie funkcją iloczynu ciśnienia gazu  $[p]$  i odstępu między elektrodami  $[L]$  przy stałej temperaturze.

W warunkach, gdy w atmosferze potencjalnie wybuchowej między elektrodami 1 - 2 spełniony jest warunek:

$$pL > U_0$$

gdzie:

$p$  [Pa] – ciśnienie gazu,

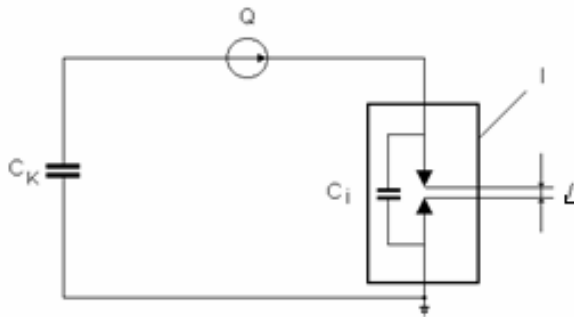
$L$  [mm] – odstęp między elektrodami,

$U_0$  [V] – napięcie początkowe.

Minimalna wartość napięcia początkowego [ $U_0$ ] jest zależna od ilości elektronów i jonów wybijanych z elektrody, czyli wystąpienia efektu tzw. lawiny elektronowej. Właściwościami fizycznymi układu gazowego wpływającymi w niewielkim stopniu na wytrzymałość gazów są, zmieniające się gęstość i wilgotność. Z upływem czasu w warunkach utrzymującego się wyładowania niezupełnego, przy wzroście napięcia następuje efekt nasycenia w transporcie jonów między elektrodami aż do momentu rozwoju wyładowania samoistnego, kończącego się przeskokiem wyładowania elektrostatycznego.

### Stanowisko do badań zapalności

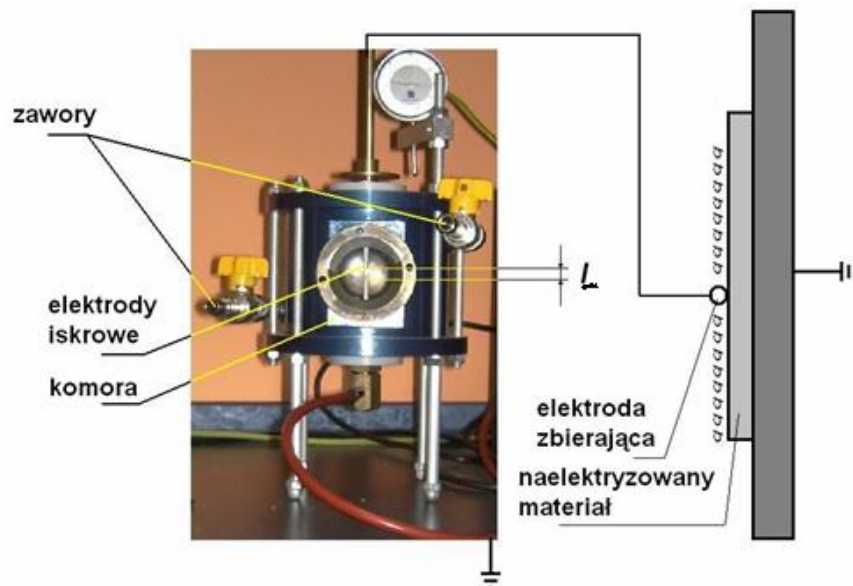
Ważnym elementem odpowiedzialnym za naelektryzowanie jest pole elektryczne. Ekstremalne warunki elektryzowania elementów niemetalowych wytypowano na podstawie wieloletnich doświadczeń, które w badaniach laboratoryjnych były wykorzystywane do oceny bezpieczeństwa przeciwybuchowego w atmosferach potencjalnie wybuchowych. Badania zdolności zapalającej gazowej testowej mieszanki wybuchowej wykonywano w komorze iskiernika o stałej objętości. Iskiernik traktowany jest, jako kontrolny przyrząd pomiarowy, którego schemat przedstawiono na [rys. 1].



rys. 1: Schemat układu z wykorzystaniem iskiernika do oceny zdolności zapalającej. Oznaczenie:  $C_K$  (pF) - pojemność własna źródła energii;  $C_i$  (pF) - pojemność własna „iskiernika”;  $Q$  - źródło energii;  $I$  - „iskiernik”.

Iskiernik jest to przyrząd do oceny energii wyładowań elektrostatycznych dla potrzeb oszacowania zdolności zapalającej. Przedstawiony na [rys. 1] schemat iskiernika ma znaną charakterystykę napięcia początkowego  $[U_0]$  i pojemność własną  $[C_i]$ . Włączony jest w obwód ze źródłem energii  $[Q]$  pojemności  $[C_K]$ . Istotą oceny zagrożenia wybuchem jest zaistnienie we wnętrzu komory wybuchu lub jego brak.

Wystąpienie wybuchu we wnętrzu komory dla ustalonego odstępów  $[L]$  między elektrodami iskrowymi oznacza, że energia rozładowania  $[W_r]$  jest większa od energii zapłonu  $[E_z]$  otaczającej testowej gazowej atmosfery wybuchowej.



Fot. 1: Stanowisko do oceny energii rozładowania  $[W_r]$ .

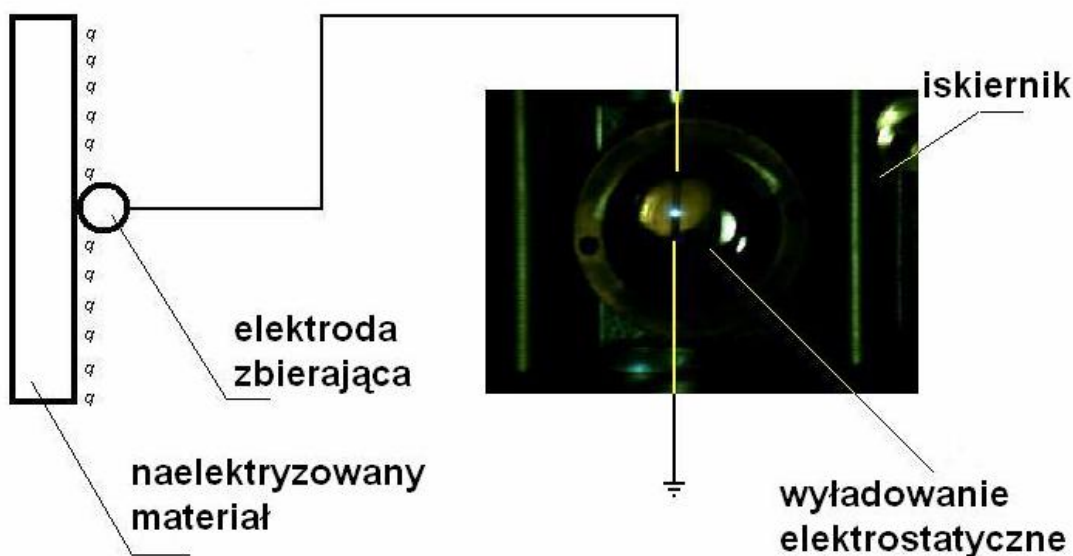
Badania zdolności zapalającej testowej metanowej mieszaniny wybuchowej wykonywano w komorze iskiernika o stałej objętości [fot. 1]. Iskiernik składa się z elementu zapłonowego tj. pary

elektrod iskrowych umieszczonych we wnętrzu komory o objętości wolnej przestrzeni około 1 dm<sup>3</sup>. Jedną z elektrod elementu zapłonowego jest połączona z elektrodą kulistą służącą do zbierania ładunku z naelektryzowanej powierzchni nieprzewodzącego materiału niemetalowego. Druga elektroda iskrowa jest połączona z zaciskiem uziemienia. Dla zapewnienia jednorodnej atmosfery wybuchowej komorę wyposażono w dwa zawory umożliwiające jej wypełnianie testową gazową mieszaniną wybuchową. Do badań zdolności zapalającej stosowano testową metanową mieszaninę wybuchową, o znanej wartości energii zapłonu [ $E_z$ ]. Odległość [L] między elektrodami iskrowymi zależy od składu testowej metanowej mieszaniny wybuchowej.

Źródłem wyładowań elektrostatycznych był naelektryzowany przez indukcję niemetalowy materiał nieprzewodzący. Najbardziej niebezpiecznych dla atmosfer wybuchowych tj. rozprzestrzeniających wyładowań snopiastych można uniknąć przez używanie tylko przewodzących albo rozpraszających materiałów niemetalowych wykorzystywanych do produkcji elementów przeznaczonych do użytkowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem.

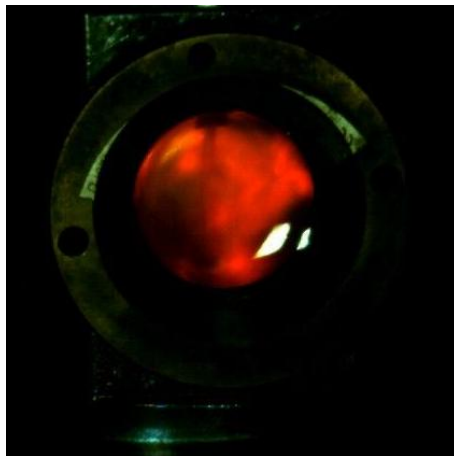
## Wynik badania

Wyładowanie elektrostatyczne jest zewnętrznym źródłem energii rozładowania [ $W_r$ ], które wprowadzone w potencjalne ognisko reakcji termo-chemicznej wywołuje utworzenie wyładowania elektrostatycznego [fot. 2].



Fot. 2: Wyładowanie elektrostatyczne, jako efektywne źródło zapłonu.

W trakcie zapłonu temperatura powierzchni utworzonego wyładowania elektrostatycznego przewyższa temperaturę zapłonu warstwy otaczającej testowej metanowej atmosfery wybuchowej, formując warstwę płomienia. Następuje wymiana ciepła między nagrzanym wyładowaniem elektrostatycznym a otaczającą go warstwą gazu. Wynikiem nagrzania jest wzrost temperatury cząstek, odparowanie z nich pojedynczych cząsteczek wody i wydzielanie części lotnych. Emitowane części lotne stykając się w otaczającym środowisku z tlenem spalają się. Podczas wykonywania badań zdolności zapalającej wykonywano ocenę zagrożenia wybuchem od naelektryzowanego materiału niemetalowego. Kolejne etapy rozprzestrzeniania się płomienia w niespaloną testową metanową mieszaninę wybuchową na przedstawiono na [fot. 3].



a) początek spalania testowej metanowej mieszaniny wybuchowej,

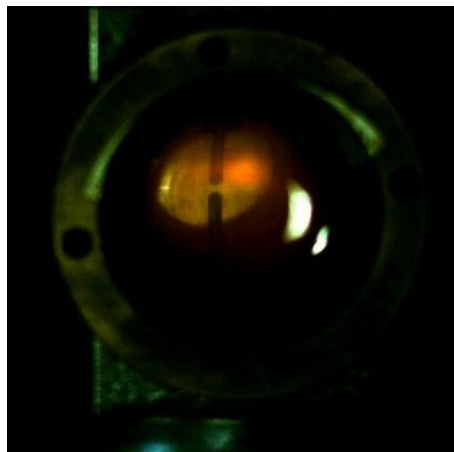


b) płomień wypenający wnętrze komory iskiernika

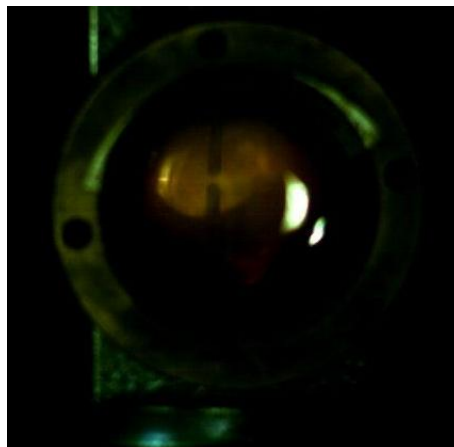
*Fot. 3: Spalanie testowej metanowej atmosfery wybuchowej.*



Kolejne etapy zaniku płomienia we wnętrzu komory w postaci miejscowych faz wypalania testowej metanowej atmosfery wybuchowej we wnętrzu komory przedstawiono na [fot. 4].



a) wtórne świecenie resztek gazowej testowej atmosfery wybuchowej,



b) produkty spalania

*fot. 4: Fazy zaniku płomienia wybuchu we wnętrzu komory.*

Badania zdolności zapalającej od wyładowań elektrostatycznych prowadzą do określenia krytycznych parametrów i pozwalają opisać sposób wywoływania naelektryzowania, które powoduje zapalenie testowej metanowej mieszaniny wybuchowej. Wynikiem tych prób było ustalenie granicznych warunków:

- „brak zapalenia” testowej metanowej mieszaniny wybuchowej oznacza, że energia wyładowania elektrostatycznego nie przekracza energii zapłonu [ $E_z$ ] otaczającej testowej gazowej mieszaniny wybuchowej,

- „zapalenie” testowej gazowej mieszaniny wybuchowej oznacza, że energia rozładowania [W<sub>z</sub>] przekracza energię zapłonu [E<sub>z</sub>] otaczającej testowej metanowej mieszaniny wybuchowej.

Próby te jednak nie rozstrzygają wszystkich wątpliwości, które pojawiają się w fazie projektowania instalacji z wykorzystaniem nieprzewodzących elementów niemetalowych. Jeżeli nieprzewodzący element niemetalowy, wyposażony jest w elementy przewodzące, to próby oceny zdolności zapalającej są wykonywane zarówno przy odizolowanych jak również uziemionych przewodzących elementach.

**Literatura:**

IEC TR 60079-32: 2010 „Explosive atmospheres – Part 32: Electrostatics”

B. Wiechuła: Rozprawa doktorska Zagrożenie wybuchem od elektryczności statycznej w lakierniach proszkowych BIAŁYSTOK 2007