

Michał KUBICA

## MOŻLIWOŚCI ZAPŁONU METANU OD ŁADUNKÓW ELEKTROSTATYCZNYCH

Streszczenie. Wskutek tarcia podczas ruchu gazów, pyłów, kropeł wody, a także przemieszczenia się przedmiotów powstają ładunki elektrostatyczne. Wyladowania nagromadzonych ładunków, przy odpowiednim stężeniu metanu, mogą zainicjować wybuch. Opiszano warunki powstawania ładunków elektrostatycznych, wypadki jakie zostały przez nie wywołane oraz wskazówki jakie prowadzą do zapobiegania ich powstawaniu.

Wstęp

Jedną z przyczyn eksplozji mieszanek wybuchowych jest ładunek elektrostatyczny, a do inicjacji wybuchu metanu wystaroza znikoma ilość energii, bo już 0,065 mWs.

Rozpatrzmy więc, jak dochodzi do powstawania ładunków elektrostatycznych i jakie energie mogą one reprezentować.

Weźmy pod uwagę dwa ciała stykające się na powierzchni wspólnej  $S$ , o opornościach właściwych  $\varrho_1$  i  $\varrho_2$ . W tym pierwszym etapie zetknięcia występuje wędrówka elektronów, a kierunek ich wędrówki zależy od wielkości pracy wyjścia elektronu z danego materiału, dokładniej od różnicy tych prac. Praca wyjścia elektronu  $W$  jest to ilość energii potrzebna na wyzwolenie elektronu z danego materiału do otaczającej próżni. Z punktu widzenia modelu metalu z elektronami swobodnymi pracę wyjścia definiujemy jako pracę potrzebną do przeniesienia elektronu z poziomu Fermiego o energii  $E_F$  do nieskończoności. Jeśli przedmiot 1 ma pracę wyjścia  $W_1$  mniejszą od pracy wyjścia  $W_2$  materiału drugiego, to będzie się ładował dodatnio, a materiał drugi ujemnie. Krótko: materiały o wyższej pracy wyjścia ładują się ujemnie.

Za Alfredem Coehnem można to określić mniej ściśle, lecz praktyczniej: materiały o wyższej stałej dielektrycznej ładują się dodatnio. Określenie to pochodzi z roku 1898. Zjawiskiem tym zajmował się Hermann Helmholtz, który już w 1879 roku wykazał, że przy zetknięciu wyżej opisanych przedmiotów występuje polaryzacja na ich powierzchniach o napięciu wynoszącym ułamek  $V$ .

W drugim etapie rozpatrzmy oddalanie się powierzchni obu ciał. Powstająca podczas odsuwania pojemność zmniejsza się zgodnie ze znanym wyrażeniem:

$$C = \frac{S \cdot \epsilon}{d},$$

gdzie:

- S - powierzchnia tak powstającego kondensatora,  
 $\epsilon$  - stała dielektryczna dielektryka między powierzchniami,  
 d - odległość między powierzchniami.

Zmiana pojemności takiego kondensatora powoduje wzrost napięcia między rozpatrywanymi powierzchniami, zgodnie z zależnością

$$U = \frac{Q}{C},$$

Q - ładunek.

Podczas rozdzielania przedmiotów następuje powiększanie energii elektrycznej oczywiście kosztem pracy mechanicznej potrzebnej na ich rozdzielanie, bo należy pokonać siły wzajemnego przyciągania się okładek kondensatora.

W trzecim etapie, który zaczyna się właściwie wraz z etapem drugim, następuje zmniejszanie się wielkości ładunku z powodu upływności wywołanej skończoną wartością oporności dielektryka, ładowania otaczającego medium oraz efektu tunelowego, zwanego często w ten sposób zjawiska przenikania cząstek  $\alpha$  przez barierę energetyczną otaczającą jądro.

Z tych trzech przyczyn najznaczniejszy wpływ w normalnych warunkach posiada niedoskonałość izolacji. Zmiana ładunku z powodu niedoskonałej izolacji wynosi:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{\epsilon \cdot \varrho}},$$

gdzie:

- t - czas rozładowania,  
 $\epsilon \cdot \varrho$  - stała czasowa  $\tau$ , zależna od stałej dielektr.  $\epsilon$  i oporności wł.  $\varrho$

Przy przeciętnej wartości  $\epsilon = 4 \cdot 10^{-13}$  F/m

$$\varrho = 2,8 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$$

stała czasowa rozładowania wynosi  $\tau \approx 1$  s.

Na odpływ ładunku w całości potrzeba około 5 sekund.

Nasuwa się tu oczywisty wniosek, że dla przyspieszenia odpływu ładunków elektrostatycznych trzeba stosować materiały o możliwie małej oporności.

Tu trzeba zaznaczyć, że powyższe rozważania dotyczyły powierzchni czystych, bo inaczej należy to wziąć pod uwagę przy określaniu powyższych parametrów.

Pracę wyjścia dla niektórych materiałów podaje poniższa tabela.

Aluminium	$W_{Al} = 4,1 \text{ eV} = 6,73 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Miedź	$W_{Cu} = 4,45 \text{ eV} = 7,13 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Srebro	$W_{Ag} = 4,46 \text{ eV} = 7,14 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Żelazo	$W_{Fe} = 4,49 \text{ eV} = 7,19 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Nikiel	$W_{Ni} = 4,96 \text{ eV} = 7,85 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Sód	$W_{Na} = 1,9 \text{ eV} = 3,06 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

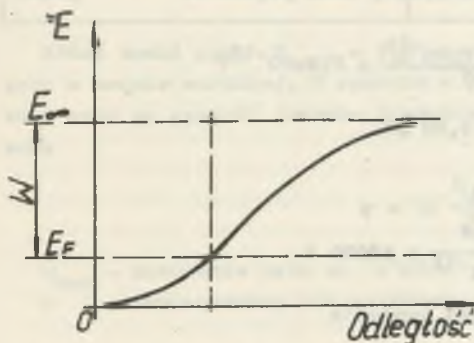
## Dielektryki

Nylon	$W_{nyl} = 4,08 \text{ eV} = 6,54 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Polistyren	$W_{pst} = 4,22 \text{ eV} = 6,76 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Poliamid	$W_{pam} = 4,36 \text{ eV} = 6,98 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Polichlorek winylu PCV	$W_{pov} = 4,85 \text{ eV} = 7,77 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Dane te należy traktować jako orientacyjne, ponieważ w literaturze na ten temat są pewne rozbieżności.

Pracę wyjścia oblicza się jako pracę potrzebną do przeniesienia elektronu z poziomu Fermiego o energii  $E_F$  do nieskończoności. Jeśli zatem pracę przeniesienia do nieskończoności elektronu z najniższego stanu energetycznego oznaczymy  $E_\infty$ , to praca wyjścia  $W$  jest określona zależnością

$$W = E_\infty - E_F$$



Graficznie wygląda to tak, jak na rys. 1.

Gęstość powierzchniowa ładunku dla pary stykających się materiałów wynosi

Rys. 1

$$\sigma = 1,6 \cdot 10^{-9} (W_1 - W_2) \text{ C/cm}^2 = 1,6 (W_1 - W_2) \text{ nC/cm}^2,$$

Materiały z polichlorku winylu (PCV) są często spotykane jako izolacja elektryczna, przewody rurowe dla wody itp. W zetknięciu z metalami powstaje ładunek o gęstości powierzchniowej jak niżej

z żelazem

$$\sigma_{Fe-pcv} = 1,6 \cdot 4,49 - 4,85 = -0,576 \text{ nC/cm}^2$$

z miedzią

$$\sigma_{Cu-pcv} = 1,6 \cdot 4,45 - 4,85 = -0,64 \text{ nC/cm}^2$$

z aluminium

$$\sigma_{Al-pcv} = 1,6 \cdot 4,2 - 4,85 = -1,04 \text{ nC/cm}^2$$



Natomiast nylon z żelazem

$$\tilde{G}_{\text{Fe-nyl}} = 1,6 \cdot 4,49 \cdot 10^8 = 0,66 \text{ nC/cm}^2$$

Nylon z niklem

$$\tilde{G}_{\text{Ni-nyl}} = 1,6 \cdot 4,96 \cdot 10^8 = 1,41 \text{ nC/cm}^2$$

Dla pary metal - tworzywo sztuczne można przyjąć szacunkowo

$$\tilde{G}_{\text{me-twszt}} = \text{ok. } 1 \text{ nC/cm}^2,$$

Jeśli zetknięcie nastąpi na powierzchni ok.  $50 \text{ cm}^2$ , co odpowiada kwadratowi o boku ok.  $7 \text{ cm}$ , powstanie ładunek kontaktowy o wielkości rzędu  $50 \text{ nC}$ . Gdy następnie materiały te zostaną odsunięte od siebie na odległość ok.  $5 \text{ cm}$ , powstały w ten sposób kondensator z dielektrykiem powietrznym o stałej dielektrycznej  $\tilde{\epsilon} = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  będzie miał pojemność

$$C = \frac{S \cdot \tilde{\epsilon}}{d} = \frac{50 \cdot 10^{-4} \cdot 8,9 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 10^{-2}} = 8,9 \cdot 10^{-13} \text{ F}$$

$$C = 0,89 \text{ pF.}$$

Napięcie na jego okładkach wyniesie

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{50 \cdot 10^{-9}}{0,89 \cdot 10^{-12}} = 56000 \text{ V.}$$

Energia tak naładowanego kondensatora wyniesie

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{50^2 \cdot 10^{-18}}{2 \cdot 0,89 \cdot 10^{-12}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 1,4 \text{ mJ}$$

Przykład ten dowodzi, jak należy być ostrożnym z tego typu materiałami w kopalniach gazowych. Torebka śniadaniowa z popularnych materiałów foliowych uniesiona prądem powietrza lub podmuchem fukacza może być groźnym inicjatorem wybuchu. Jako wskazówkę dla doboru materiałów należy przyjąć zasadę możliwie jednakowej wartości ich pracy wyjścia elektronu, bo napięcie kontaktowe będzie wtedy bliskie zeru.

#### Elektryzacja rozpylonej wody

Niebezpieczeństwo związane z elektryzacją rozpylonej wody stwierdzono przy myciu tankowców. W 1969 r. zdarzyły się trzy wypadki eksplozji tankowców. Zwołana na ten temat konferencja do San-Diego w 1970 r. wysłuchała sprawozdań z badań, które przeprowadził E.T. Pierce, a mianowicie badał elektryzowanie się wody w łazience wypływającej z prysznica i uzyskano da-

ne porównywał z wielkościami występującymi przy myciu tankowców. Otrzymał następujące wyniki:

	Łazienka	Tankowiec
Wydajność	1 dm/s	100 dm/s
Czas wypływu	5 minut	45 minut
Woda	pitna	morska
Przestrzeń	15 m <sup>3</sup>	25.500 m <sup>3</sup>
długość	3 m	46 m
szerokość	2 m	23 m
wysokość	2,5 m	26 m
Ekwiwalentny bok sześciangu	2,46 m	30,18 m
Zmierzone natężenie pola elektrycznego E <sub>max</sub>	-0,60 kV/m	+ 20,0 kV/m
Gęstość ładunku przestrzennego ρ	- 7,77 nC/m <sup>3</sup>	+ 21,16 nC/m <sup>3</sup>

Różne znaki przy E<sub>max</sub>, a tym samym i na ρ, tłumaczy się zawartością soli w wodzie morskiej. W oparciu o powyższe wyniki Pierce podał przybliżony wzór na gęstość ładunku przestrzennego w pomieszczeniu z rozpyloną wodą

$$\rho = 32 \frac{E_{\max}}{b} \text{ nC/m}^3$$

E<sub>max</sub> - natężenie pola el. w kV/m

b - ekwiwalentny bok sześciangu w m.

Późniejsze badania, ogłoszone przez J.M. van de Weerda w 1971 r. na londyńskiej konferencji, potwierdziły wyniki Pierce'a i zgodność wyżej podanego wzoru, czyli że, natężenie pola el. w takich warunkach rośnie z wielkością pomieszczenia.

Należy więc przyjąć, że przy zraszaniu wyrobisk górniczych również powstaje pole elektryczne o natężeniu według wyżej podanej zależności. Pole takie może także powstać przy wydmuchu gazów do mokrego wyrobiska, a jeśli warunki będą odpowiednie to może nastąpić samozapłon metanu. Fakt ten potwierdza obserwacja tzw. błędnych ogni na bagnach. Jest to nic innego jak samozapalający się gaz błotny, czyli metan a jego płomyk straszyl ludzi poprzez wieki. Przelatując poprzez warstwę wody bagniska metan porywa i rozpyla krople cieczy, które elektryzują się, przy odpowiedniej wielkości pola elektrycznego przeskok iskry zapala go.

Przekształcając wzór Pierce'a odpowiednio obliczmy natężenie pola el. w zraszonym wyrobisku górniczym o objętość 8000 m<sup>3</sup>.

Ekwiwalentny bok sześcianu wynosi

$$b = \sqrt[3]{8000} = 20 \text{ m.}$$

Gęstość ładunku przestrzennego

$$\rho = - 7,77 \text{ nC/cm}^3,$$

Natężenie pola el. wyniesie

$$E_{\text{max}} = \frac{b \cdot \rho}{32} \text{ kV/m} = \frac{-20 \cdot 7,77}{32} \approx 5 \text{ kV/m}$$

a to już nie jest mało.

#### Elektryzacja mieszanki pyłowo-powietrznej

Przy zawartości pyłu w powietrzu ok.  $0,1 \div 4 \text{ kg/m}^3$  o wielkości oształtów rzędu mikrometrów oraz prędkości przepływu rzędu  $10 \div 20 \text{ m/s}$  tworzą się ładunki przestrzenne dochodzące do  $1 \text{ nC/m}^3$ . Układ doświadczalny dla potwierdzenia tego faktu podaje [8]. Dwa zbiorniki, dobrze odizolowane, połączone rurami z plexi, tworząc zamknięty obieg mieszanki pyłowo-powietrznej. Dla przedmuchiwania mieszanki w jednej z rur zabudowano starannie odizolowany wentylator. Stosowano ze względów bezpieczeństwa pył niepalny. Po 10 do 15 sekundach napięcie między zbiornikami osiągało wielkość 100kV i rosło aż do przeskoku iskry, po czym na nowo narastało. W warunkach kopalnianych mogą się zdarzyć podobne przypadki. Autor niniejszego opracowania nie natrafił w literaturze fachowej na odpowiedź, jak wpływa na to zjawisko wilgotność powietrza.

#### Elektryzacja wypływającego pod ciśnieniem gazu

Jak podawała kiedyś prasa, w 1954 r. wydarzyła się w Bitburgu (RFN) tragiczna w skutkach katastrofa, w której zginęło 29 osób a 9 zostało ciężko rannych. Wybudowano tam nowoczesnym zbiornik na paliwa płynne, zlokalizowany w podziemiach, o pojemności  $5000 \text{ m}^3$ . Został wyposażony w urządzenia gaśnicze ze 120 butlami  $\text{CO}_2$ . Dla zademonstrowania działania urządzenia gaśniczego zaproszonym gościom, zebrano ich na płycie betonowej nad zbiornikiem. Zbiornik był napełniony w  $1/4$  materiałem pędnym. Otwarto zawory kilkunastu butli  $\text{CO}_2$ . Po około jednej minucie nastąpił powrotny wybuch, który podrzucił do góry betonową płytę z ludźmi, a następnie wszystko się zawałiło. Komisja badająca ten wypadek doszła do wniosku, że przyczyną wybuchu było naelektryzowanie się wypływającego z butli  $\text{CO}_2$ , bo właś-



nie po pierwszej minucie po otwarciu butli następuje maksymalna elektryzacja tego gazu. Po serii doświadczeń stwierdzono, że wypływający  $\text{CO}_2$  ładuje się elektrostatycznie rzędu od 0,01 do 30  $\mu\text{C}/\text{kg}$ .

Biorąc pod uwagę, że wyrzuty  $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$  osiągają nieraz wielkości kilkuset tysięcy  $\text{m}^3$ , to całkowita wielkość ładunku elektrycznego wynieść może rząd kilkudziesięciu C. Z drugiej strony duży wypływ gazów daje takie stężenie, że przekroczona zostaje górna granica wybuchowości.

W 1781 r. dwaj wybitni uczeni, Antoine-Laurent Lavoisier i Pierre Simon de Laplace wykazali, że przy wyparowywaniu wody tworzy się elektryczność, ale o tym wkrótce zapomniano. Dopiero po 60 latach adwokat i zarazem inżynier artylerii William George Armstrong zajął się tym problemem. Stwierdził, wszystkie pary i gazy elektryzują się przy wypływie z naczyń ciśnieniowych. Pary elektryzują się również przy samym procesie odparowywania. Armstrong usiłował nawet skonstruować urządzenie do wytwarzania elektryczności oparte na tej zasadzie, ale rozwój maszyn magnetoelektrycznych spowodował zarzucenie tej idei.

#### Elektryzacja metali przez przepływający gaz

Zgodnie z podanymi we wstępnej części wywodami o elektryzacji stykających się materiałów, musi zachodzić podobne zjawisko także przy omywaniu metalu przepływającym gazem. Dla przekonania się o tym wykonałem następujące pomiary. Dobrze odizolowaną płytkę metalową elektryzowano strumieniem  $\text{CO}_2$ . Ładunek, jaki otrzymywała płytka, mierzono oszłym elektrometrem. Zgodnie z przewidywaniami wielkość ładunku zależała przede wszystkim od materiału płytki, natężenia strugi gazu i ustawienia próbki względem kierunku przepływającego gazu. Przebadano typowe materiały, powszechnie stosowane jak: aluminium, stal i miedź.

Ponieważ warunki badań były dosyć prymitywne, więc nie można było otrzymać ścisłych wyników ilościowych, ale wyraźnie wystąpiła zależność elektryzacji od pracy wyjścia elektronu z danego materiału. Najmocniej elektryzowało się aluminium, mające pracę wyjścia  $W_{A1} = 4,2 \text{ eV}$ .

Równie ciekawe zagadnienia występują przy ścisłaniu pewnych materiałów. Występuje przy tym zjawisko piezoelektryczne, zmiana oporności właściwej i stałej dielektrycznej. Efekty te dają wyzwalamie energii rzędu znacznie większego niż to jest potrzebne do inicjacji wybuchu metanu, a więc mogące być równie groźne w skutkach jak poprzednio opisane.

#### Wnioski

- Dobór materiałów dla urządzeń górniczych mających pracować w warunkach zagrożenia metanowego winien być również określany pod kątem widzenia pracy wyjścia elektronu, tak, aby gęstość powierzchniowa ładunku elektrycznego, powstająca przy ich stykaniu się, była możliwie bliska zeru.

- Dla szybkiego odprowadzenia ładunków elektrycznych stosować materiały przewodzące, unikać materiałów z tworzyw sztucznych mających tendencję do intensywnej elektryzacji.
- Dbać o jeszcze lepszy porządek w pracy, bo porzucone byle jak i byle gdzie przedmioty metalowe mogą być naelektryzowane w strugach powietrza wentylacyjnego lub podczas wydmuchu metanu.
- Podjąć badania nad celowością stosowania powietrza zjonizowanego, które może zlikwidować elektryzację.

## LITERATURA

- [1] Kariakin N.J. i inni; Poradnik fizyczny. WNT, Warszawa 1965.
- [2] Skorco M.; Fizyka. PWN, Warszawa 1973.
- [3] Budryk W.; Sposób zwalczania nagłych wyrzutów węgla i gazów. Wyd. Geologiczne. Warszawa 1965.
- [4] Cybulski W.; Zagadnienia nagromadzeń metanu. Przegląd Górniczy. Wyd. Śląsk. Katowice 1967.
- [5] Cybulski W.; Badania nad ograniczeniem lokalnych wybuchów metanu za pomocą dysz wodnych. Zeszyty problemowe Górnictwa z. 2. PWN. Kraków 1970.
- [6] Cis J.; Wyrzuty gazów i skał w dolnośląskim zagłębiu węgla kamiennego. Wyd. Śląsk. Katowice 1971.
- [7] Kozłowski B., Sobala J.; Walka z pyłem węglowym w kopalniach węgla. Wyd. Śląsk. Katowice 1966.
- [8] Schön G.; Ergebnisse der Untersuchungen zur Aufklärung der Explosionskatastrophe bei Bitburg in der Eifel am 23.09.1954. Arbeitsschutz 1956.
- [9] Pierce E.T. Waterfalls, bathroom and - perhaps - supertanker explosions. Lightning and Static Electricity Conference. San Diego 1970. p. 89...96.

## ВОЗМОЖНОСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МЕТАНА ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

## Р е з ю м е

В результате трения во время движения газов, пыли, капель воды, а также перемещения предметов создаются электростатические заряды. Разгрузка нагромождённых зарядов при соответствующей насыщенности метана может быть началом взрыва. Рассматриваются условия возникновения электростатических зарядов, случаи какие они создают, а также указания для предотвращения их возникновения.



POSSIBILITIES OF METHANE FIRES DUE TO STATIC CHARGES

Summary

Because of gas, dust, water particles friction as well as displacement of objects static charges come into being. Discharges at adequate methane concentrations may lead to explosion hazards. Conditions for static charging have been described along with accidents ensuing because of and preventive means have been stated.