

dr inż. SZYMON PTAK (ORCID: 0000-0002-8700-6805)

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

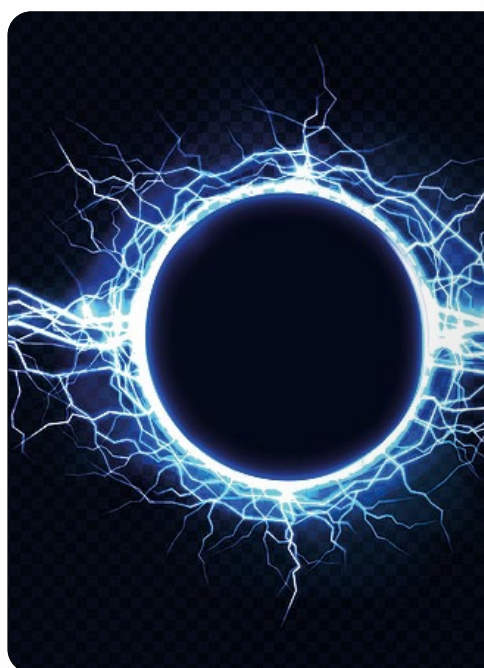
dr inż. PIOTR OSTROWSKI (ORCID: 0000-0002-2334-9788)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: sptak@sgsp.edu.pl; szpta@ciop.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0014.3882

Zjawiska elektrostatyczne w środowisku pracy – analiza zagrożeń i studium przypadku



Celem artykułu jest budowanie świadomości na temat zagrożeń spowodowanych przez wyładowania elektrostatyczne w środowisku pracy. Przedstawiono wytłumaczenie zjawiska, wskazując metody generowania ładunku elektrycznego na powierzchni obiektów fizycznych. Przybliżono podział wyładowań, a także omówiono wybrane typy: iskrowe, koronowe, snopiaste, snopiaste rozprzestrzeniające się. Przeprowadzono analizę rzeczywistych zdarzeń, w których doszło do powstania wyładowania elektrostatycznego w warunkach przemysłowych, wraz ze wskazaniem przyczyny zjawiska i środków ochronnych.

Zagrożenia, które towarzyszą zjawisku elektryczności statycznej wymuszają stosowanie określonych środków bezpieczeństwa. Jak pokazuje praktyka, zaniedbania w tym zakresie mogą powodować ogromne straty, zarówno z punktu widzenia zdrowia i życia pracowników, utraconego i zniszczonego mienia, jak i wpływu na środowisko naturalne.

Słowa kluczowe: elektrostatyka, zagrożenie pożarowe, zagrożenie wybuchem, bezpieczeństwo procesowe

Electrostatic phenomena in the work environment – hazards analysis and case study

The purpose of the article is to build awareness about the hazards caused by electrostatic discharge in the work environment. An explanation of the phenomenon was presented, indicating methods of generating electric charge on the surface of physical objects. The division of discharges is presented, and selected types are discussed: spark, corona, brush and propagating brush discharges. Further in the article, an analysis of real events in which electrostatic discharge occurred in industrial conditions was carried out, together with an indication of the cause of the phenomenon and protective measures. The threats that accompany the phenomenon of static electricity force the use of specific safety measures. As practice shows, negligence in this regard can cause huge losses, both from the point of view of the health and life of employees, lost and damaged property, and impact on the environment.

Keywords: electrostatics, fire hazard, explosion hazard, process safety

Wstęp

Wyładowania elektrostatyczne były przyczyną wielu wypadków przy pracy, przyczyną powstania groźnych pożarów i wybuchów, czy wreszcie przyczyną uszkodzeń urządzeń kontrolnych i pomiarowych na całym świecie. Niestety dokładne dane statystyczne nie są szeroko dostępne. W literaturze przedmiotu analizowano ten problem wielokrotnie, np. w artykule, w którym zbadano ponad 300 zdarzeń z udziałem elektryczności statycznej z poprzednich 50 lat, do których doszło na terenie Japonii [1]. Wyniki pokazują, że do 90% wyładowań elektrostatycznych związanych jest z czynnościami wykonywanymi przez pracowników (pozostałe 10% powstaje samorzutnie). Jednocześnie 70% zdarzeń to wyładowania iskrowe.

Obecny stan wiedzy pozwala w zasadzie w pełni zrozumieć zjawiska elektrostatyczne, co umożliwia projektowanie skutecznych środków bezpieczeństwa. Mimo tego ciągle dochodzi do poważnych zdarzeń, w których główną rolę odgrywają wyładowania z powierzchni naelektryzowanych obiektów. Jak dowodzą analizy i wnioski wynikające z tychże zda-

rzeń, często przyczyną jest niewłaściwa konstrukcja urządzenia, nieprzestrzeganie czasookresów przeglądów i konserwacji, wykraczanie poza dopuszczalne parametry procesów technologicznych czy warunki znamionowe pracy urządzeń, a nawet (być może w głównej mierze) zwyczajny brak świadomości zagrożeń pośród pracowników. Artykuł ma na celu przybliżenie tematyki zagrożeń elektrostatycznych w środowisku pracy, wraz ze wskazaniem przykładów rzeczywistych zdarzeń, do których doszło w ostatnich latach.

Iskota zjawiska

Wyjaśnienie podstaw zjawiska elektryczności statycznej można rozpocząć od powszechnie znanego, choć niebanalnego stwierdzenia, że przyroda nieustannie dąży do stanu równowagi. Różnica energii potencjalnych pomiędzy góskimi potokami a poziomem morza sprawia, że obserwowany jest przepływ w rzekach. Co więcej, każdy stan statycznej równowagi w przyrodzie będzie posiadał najniższą energię z możliwych dla danych warunków.

W kontekście zjawisk elektrycznych, powstanie różnicy potencjałów pomiędzy dwoma obiektami fizycznymi, np. ciałem człowieka a uziemionym elementem przewodzącym, będzie skutkowało dążeniem do stanu równowagi, czyli wyrównania potencjałów elektrycznych. Jeżeli warunki zewnętrzne tego nie umożliwiają, będzie dochodzić do narastania ładunku elektrostatycznego na danym obiekcie fizycznym, co po przekroczeniu warunków krytycznych, np. wytrzymałości dielektrycznej stosowanych materiałów izolacyjnych, poskutkuje wyładowaniem elektrostatycznym.

W piśmiennictwie zwykle podaje się dwa mechanizmy elektryzacji materiałów:

Elektryzacja poprzez wpływ

W obecności pola elektrycznego będzie dochodzić do przemieszczania się ładunków elektrycznych w obiektach eksponowanych na to pole (np. przybliżanie innego naelektryzowanego obiektu). Od takich parametrów jak rezystywność powierzchniowa i skrośna czy przenikalność elektryczna zależeć będzie skuteczność elektryzacji.

Elektryzacja poprzez kontakt

Poprawne zrozumienie tego mechanizmu nie jest oczywiste. Niejednokrotnie jest ono błędnie przyrównywane do zjawiska tarcia, wzorem doświadczenia z laboratorium fizyki, gdzie po potarciu laski ebonitowej materiałem tekstylnym zaczynała ona przyciągać np. rozdrobniony papier. W istocie sam mechanizm elektryzacji w tym wypadku wiąże się z fizycznym rozdzielaniem materiału, a nie zjawiskiem tarcia samym w sobie. Ilustruje to rys. 1.

W obrębie materiału, za warunki początkowe można przyjąć sytuację, w której na jego powierzchni występuje równowaga ładunków elektrostatycznych (rys. 1a). Po powstaniu tzw. interfejsu pomiędzy dwoma obiektami, ładunki będą przemieszczać się na jego drugą stronę (rys. 1b). Zjawisko to jest tym intensywniejsze, im dalej od siebie w tzw. szeregu tryboelektrycznym¹ będą się znajdować, znaczenie ma także rezystywność. Po ponownym rozłączeniu materiałów (rys. 1c), ładunki nie będą miały odpowiednio dużo czasu, aby migrować z powrotem i tym samym zapewnić lokalną równowagę. W ten sposób na jednym z materiałów powstawać będzie ładunek dodatni, na drugim ujemny.

Mimo że tutaj zwykle kończy się podział mechanizmów elektryzacji opisywany w piśmiennictwie specjalistycznym, warto przedstawić jeszcze jeden, nieco odmienny sposób generacji ładunków na powierzchni materiałów. Jest to:

Elektryzacja poprzez zjonizowane powietrze

Wiąże się to ze stosowaną powszechnie metodą zabezpieczania procesów technologicznych. W urządzeniu zwanym jonizatorem powietrza stosuje się wysokie napięcie, aby wywołać wyładowanie koronowe wokół elektrod ostrzowych (czyli o bardzo małym promieniu krzywizny). W ten sposób przepływające powietrze ulega jonizacji, zależnie od polaryzacji przyłożonego w jonizatorze napięcia. Tym sposobem strumień zjonizowanego powietrza, docierając do pobliskiego obiektu, przekazuje posiadany ładunek elektryczny, powodując elektryzację tego obiektu.

Jak wspomniano, w części piśmiennictwa mechanizm ten nie jest uznawany jako oddzielny w stosunku do *wpływu kontaktu*, jednak ze względu na specyfikę zjawiska, wydaje się rozsądne, dla lepszego zrozumienia, traktować strumień zjonizowanego powietrza (niezależnie od przyczyny tej jonizacji) jako oddzielny mechanizm.

Poniżej przybliżono podział wyładowań elektrostatycznych oraz warunki ich powstawania.

Rodzaje wyładowań elektrostatycznych

Istnieje wiele kryteriów podziału wyładowań elektrostatycznych. Poniżej przedstawiono klasyfikację najlepiej ilustrującą naturę poszczególnych rodzajów wyładowań:

1) Wyładowania zupełne, czyli takie, podczas których cały zgromadzony ładunek elektrostatyczny ulega neutralizacji. Innymi słowy, naładowany obiekt, po wyładowaniu, osiąga zerowy potencjał elektryczny.

2) Wyładowania niezupełne, czyli pozostałe sytuacje, w których część ładunku pozostanie na naelektryzowanym obiekcie mimo wystąpienia wyładowania.

¹ Zestawienie materiałów pod względem biegunowości i wielkości ładunku gromadzonego przez ciało podczas zetknięcia i rozdzielania dwóch ciał, wynikające z różnic prac wyjścia elektronów w tych materiałach.

Na rys. 2. zaznaczono schematycznie wybrane, najważniejsze rodzaje wyładowań elektrostatycznych.

Abi wyładowanie mogło doprowadzić do neutralizacji całego ładunku zgromadzonego na ciełe, konieczne jest, aby oba obiekty były przewodnikami. Typowo, wyładowanie nastąpi, jeżeli przewodzący, naelektryzowany obiekt będzie zbliżał się do obiektu uziemionego (rys. 2a). Tego typu wyładowanie zwane jest *iskrowym*.

Powietrze jest izolatorem o skończonej wartości wytrzymałości dielektrycznej, wynoszącej ok. 3,2 kV/mm. Oznacza to, że aby doszło do przepływu prądu przez powietrze pomiędzy obiektami odsuniętymi od siebie o 1 mm, różnica potencjału musi wynieść minimum 3200 V.

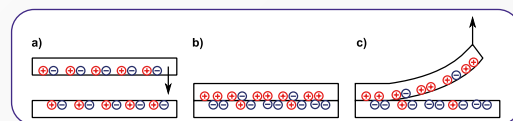
Jeżeli potencjał elektryczny elektrody ostrzowej uzyska odpowiednio dużą wartość, co stosowane jest m.in. w jonizatorach powietrza, w okolicy elektrody dojdzie do tzw. świetlenia. Elektroda w tym przypadku musi być ostrzowa, tj. o odpowiednio małym promieniu krzywizny, gdyż właśnie w tym miejscu dochodzi do powstania znacznego gradientu pola elektrycznego. Powoduje to jonizację powietrza i obserwowane świetlenie. Tego typu wyładowanie (rys. 2b) nazywane jest *koronowym*. Warto zauważyć, że do zajścia zjawiska potrzebna jest jedna elektroda, a samo jego wystąpienie nie powoduje całkowitego rozładowania obiektu. Wyładowanie koronowe przekazuje co prawda ładunek do otaczającego powietrza, ale przy spadku potencjału gradient pola elektrycznego stanie się zbyt niski, aby potrzymać jonizację powietrza. Pozostałą część ładunku można rozładować jedynie poprzez uziemienie obiektu. Stąd wyładowanie klasyfikowane jest jako niezupełne.

Wraz z dalszym zwiększaniem napięcia przyłożonego do elektrody, region świetlenia będzie się rozszerzał. Wyładowanie przejdzie w tzw. wyładowanie snopiaste (rys. 2c). Różnica potencjałów pomiędzy elektrodą a uziemionym obiektem jest ciągle zbyt mała, aby spowodować wyładowanie do tegoż obiektu, choć zjawisko obserwowane jest typowo powyżej 40-50 kV. Warto dodać, że w obszarze zjonizowanego powietrza wytwarzać się będzie toksyczny ozon. Także i to wyładowanie określane jest jako jednoelektrodowe i niezupełne.

Ostatni przedstawiony rodzaj (rys. 2d) to wyładowanie *snopiaste rozprzestrzeniające się*. Jeżeli nieprzewodzący materiał (np. tworzywo sztuczne) umieszczony jest na obiekcie przewodzącym i uziemionym, może nastąpić generowanie ładunku elektrostatycznego na jego zewnętrznej powierzchni. Jest to typowe dla materiałów o grubości nie większej niż 8 mm. Jeżeli do takiego układu ciał zbliżał się będzie uziemiona elektroda, w zależności od potencjału powierzchni nieprzewodzącej, w pewnej odległości nastąpi wyładowanie. Wytworzone zostaną kanały zjonizowanego powietrza, rozładowujące powierzchnię dielektryka. Wyładowanie wydziela znaczną energię, jednak nie rozładowuje w pełni powierzchni materiału. Wynika to z jego wysokiej rezystywności.

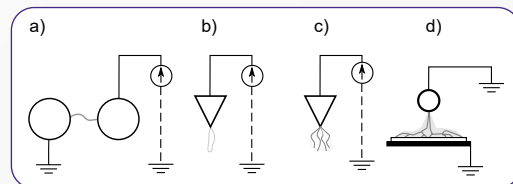
Warto dodać, że wyładowanie może powstać także do przewodzącego, uziemionego obiektu, na którym znajduje się dielektryk, jeżeli potencjał na jego powierzchni wzrośnie powyżej wytrzymałości dielektrycznej tworzywa sztucznego.

W dalszej części artykułu wyjaśniona zostanie natura zagrożenia związanego z elektrycznością statyczną.



Rys. 1. Ilustracja mechanizmu elektryzacji poprzez kontakt
Źródło: oprac. własne

Fig. 1. Illustration of contact electrification



Rys. 2. Ilustracja wybranych rodzajów wyładowań elektrostatycznych: a) spark discharge; b) corona discharge; c) brush discharge; d) expanding brush discharge [2]

Fig. 2. Illustration of selected types of electrostatic discharges: a) spark discharge; b) corona discharge; c) brush discharge; d) expanding brush discharge [2]

Istota zagrożenia

Do celów modelowania zagrożeń wykorzystuje się wartość średniej pojemności elektrycznej ciała człowieka wynoszącą $C_{c,śr} = 200 \text{ pF} = 0,2 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ [3]. Energia E_c zgromadzona w pojemności elektrycznej $C_{c,śr}$ człowieka jest zależna od kwadratu napięcia U_c , do jakiego naładowany został człowiek i wynosi:

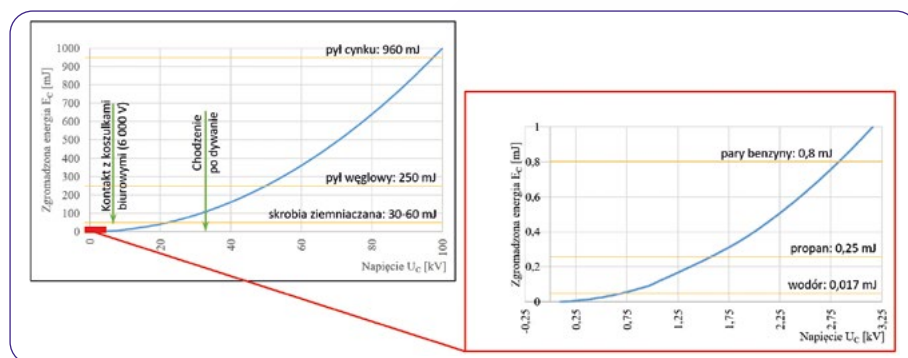
$$E_c = \frac{1}{2} C_{c,śr} \cdot U_c^2$$

Istota zagrożenia została zilustrowana na rys. 3. Wykres pokazuje zależność energii zgromadzonej na ciełe człowieka od napięcia elektrostatycznego, do jakiego człowiek został naładowany podczas wykonywania typowych czynności.

Pojawia się pytanie, do jakiej wartości napięcia może zostać naładowany człowiek? Według danych eksperymentalnych, samo chodzenie po dywanie, przy wilgotności względnej powietrza w zakresie 20-30%, może spowodować elektryzację do poziomu 35 000 V [4]. Na rys. 3. zaznaczono to zieloną strzałką. Kolejny poziom odniesienia stanowi praca biurowa, polegająca na umieszczaniu dokumentów w foliowych koszulkach. Na ciełe pracownika zgromadzi się ładunek elektrostatyczny, podnoszący jego potencjał względem ziemi o 6000 V.

Jednym z zagrożeń związanych z powstaniem wyładowania elektrostatycznego w środowisku pracy jest możliwość zainicjowania wybuchu mieszaniny substancji palnej z powietrzem. W warunkach przemysłowych mówi się o trzech rodzajach substancji palnych, co wynika z ich stanu skupienia: 1) gaz palny, 2) pary cieczy palnej oraz 3) pyły palne. Dla każdej z tych mieszanin oznacza się parametr zwany *minimalną energią zapłonu* (MEZ). W tym celu, w warunkach laboratoryjnych, poszukuje się najniższej energii, która zdolna jest do spowodowania wybuchu. Pomijając wpływ takich czynników, jak wilgotność względna powietrza (a także pyłu), stopień rozdrobnienia pyłu itp., wartość MEZ stanowi punkt odniesienia dla konkretnego procesu technologicznego. Znając tę wartość, należy dążyć, aby uwolniona do otoczenia energia (np. w trakcie wyładowania elektrostatycznego) nigdy nie przewyższała wartości wystarczającej do powstania wybuchu.

Bazując na danych literaturowych, na wykresy przedstawione na rys. 3. naniesiono wartości MEZ dla kilku substancji palnych: wodoru, propanu, par



Rys. 3. Zależność energii zgromadzonej na ciele człowieka od napięcia, do jakiego został naładowany podczas wykonywania typowych czynności oraz wartości MEZ mieszanin wybuchowych wybranych substancji
Źródło: oprac. własne

Fig. 3. The dependence of energy accumulated on the human body from the voltage to which it was charged during typical activities as well as MEZ values of explosive mixtures of selected substances

benzyny, skrobi ziemniaczanej, pyłu węglowego (Pittsburgh) oraz pyłu cynku [2]. Wyrażna jest rozpiętość tychże wartości, sięgająca 4-5 rzędów wielkości. Z wykresu można zatem odczytać orientacyjne wartości napięcia elektrostatycznego zgromadzonego na ciele człowieka, które będą wystarczające, aby ewentualne wyładowanie (np. ciało człowieka – uziemiony, przewodzący obiekt) było już w stanie dokonać zapłonu mieszaniny wybuchowej. Należy zauważyć, że dla optymalnej mieszaniny wybuchowej wodorowo-powietrznej, wartość zaledwie kilkuset woltów jest napięciem stwarzającym zagrożenie.

Charakter wyładowania elektrostatycznego jest niezwykle dynamiczny. Typowe wartości czasu trwania wyładowania mieszczą się w zakresie $0,5 \div 0,75 \mu s$ (dla wyładowań iskrowych) czy $0,75 \div 1,5 \mu s$ (dla wyładowań snopiastych rozprzestrzeniających się), [5]. To znaczy, że podczas zjawiska osiągane są ogromne moce. Dla energii wyładowania rzędu 100 mJ oraz czasu jego trwania rzędu 3/4 mikrosekundy, osiągane moce wyniosą rząd wielkości obliczony ze znanej zależności:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{100 \cdot 10^{-3} J}{0,75 \cdot 10^{-6} s} = 0,13 MW$$

Ten prosty przykład obliczeniowy ilustruje istotę zagrożenia. Z jednej strony, w typowych warunkach pracy czy warunkach domowych, na ciele pracownika gromadzić się będzie ładunek elektrostatyczny wytwarzający różnicę potencjałów względem ziemi rzędu tysięcy czy dziesiątek tysięcy woltów. Wpływa to na energię ewentualnego wyładowania elektrostatycznego, co wobec krótkiego czasu trwania zjawiska, determinuje jego ogromną moc.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły warunków, w których ładunek elektrostatyczny gromadzi się na ludzkim ciele i stamtąd jest transferowany poprzez uziemiony (zwykle przewodzący) obiekt do ziemi. Wyładowanie może następować także z obiektu nieprzewodzącego (np. rury lub płyty wykonanej z tworzywa sztucznego). W tym wypadku ilość zgromadzonego ładunku C zależna jest w zasadzie od powierzchni S materiału oraz jego grubości d . Wyładowania będą powstawać z powierzchni materiałów nie grubszych niż 8-10 mm. Pojemność elektryczna jest odwrotnie proporcjonalna do grubości materiału, zgodnie z zależnością:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}$$

gdzie: ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni równa $8,85419 \cdot 10^{-12} F/m$; ϵ_r – przenikalność elektryczna względna ośrodka (wielkość bezwymiarowa).

Tego typu wyładowania uznaje się za *niezupewne*, co oznacza, że nie cały zgromadzony ładunek zostaje zneutralizowany podczas wyładowania. Wynika to z faktu niskiej przewodności materiałów z tworzyw sztucznych, przez co przepływ ładunków jest mocno utrudniony.

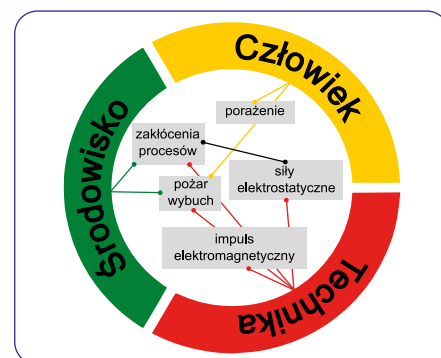
Dla wyładowania snopiastego rozprzestrzeniającego się, za maksymalną wartość graniczną ładunku elektrycznego na powierzchni materiału, w odniesieniu do której nie dojdzie jeszcze do uwolnienia energii przyjmuje się ok. $26 \mu C/m^2$ [6]. Jednocześnie można obliczyć, jak duży ładunek zgromadzony jest na ciele człowieka, w warunkach, które opisano powyżej, tj. elektryzację na skutek poruszania się po dywanie ($U_c = 35 \cdot 10^3 V$) oraz średnią wartość pojemności ciała człowieka ($C_{c,s} = 0,2 \cdot 10^{-9} F$):

$$Q_c = C_{c,s} U_c = 7 \cdot 10^{-6} C = 7 \mu C$$

Przewodzi to z kolei do wniosku, że taka sama ilość ładunku elektrycznego może zgromadzić się na materiale z tworzywa sztucznego o powierzchni rzędu $0,27 m^2$. W warunkach przemysłowych, w wielu procesach technologicznych często wykorzystuje się tworzywa sztuczne o znacznie większych powierzchniach, co determinuje towarzyszące zagrożenie powstania wyładowania elektrostatycznego.

Wyładowanie elektrostatyczne stanowi wieloaspektowe zagrożenie w środowisku pracy. Poniżej dokonano przyporządkowania tychże zagrożeń do powszechnie stosowanego podziału na oddziaływanie na człowieka, technikę i środowisko, pojawiającego się w ergonomii i nauce o bhp (rys. 4.).

Oczywiście możliwe jest mnożenie bardziej szczegółowych zagrożeń i tym samym rozbudowa sieci wzajemnych zależności. Rys. 4. ilustruje najważniejsze z nich. Nie wolno zapominać, że wyładowanie elektrostatyczne oddziałuje także na człowieka, według tego samego mechanizmu, co porażenie prądem elektrycznym. Jego skutkiem jest także impuls elektromagnetyczny, mogący wywoływać zakłócenia pracy urządzeń kontrolnych i pomiarowych. Ładunek elektrostatyczny może utrudniać proces technologiczny, np. drukowanie na materiałach z tworzyw sztucznych, elektryzowanych w trakcie ich transportu do drukarki. Wydzielona energia może doprowadzić do zapłonu mieszaniny wybuchowej, czy mieszaniny palnej. W kolejnych rozdziałach przytoczono zdarzenia rzeczywiste, w których kluczowe znaczenie miała elektrostatyka.



Rys. 4. Skutki wyładowania elektrostatycznego a system człowiek-technika-środowisko
Źródło: oprac. własne

Fig. 4. The effects of electrostatic discharge and the work environment

Przykłady zdarzeń rzeczywistych

Mimo rozwoju wiedzy i stanu techniki, a także ciągłej aktualizacji prawodawstwa poszczególnych krajów w zakresie minimalnych warunków bezpieczeństwa, na całym świecie ciągle dochodzi do zdarzeń związanych z występowaniem elektryczności statycznej. W artykule opisano wybrane wypadki, które miały znaczenie dla poziomu bezpieczeństwa, lub w których doszło do porażenia i/lub pożaru czy też wybuchu.

Elektryzacja aerozolu

Pierwsze zdarzenie miało miejsce w warunkach przemysłowych, w obrębie strefy 2² zagrożenia wybuchem [7]. Oznacza to, że w warunkach normalnej eksploatacji nie spodziewa się wystąpienia wybuchowej mieszaniny gazu lub par cieczy palnej z powietrzem, a jeżeli taka atmosfera wystąpi, to przez krótkie okresy.

W obrębie strefy znajdował się rurociąg zasilaający w przegrzaną parę wodną jeden z procesów technologicznych, pokazany schematycznie na rysunku 5.

Medium przesyłane było stalową zabezpieczoną antykorozyjnie rurą (1). Izolację termiczną stanowiła włna szklana (2). Zewnętrzną warstwę stanowił płaszcz ochronny (3), wykonany z galwanizowanej blachy stalowej. Po zakończeniu prac montażowych w pobliżu rurociągu (budowa trasy kablowej), zauważono, że pomiędzy płaszczem ochronnym a połączeniem kołnierzowym rurociągu dochodzi do regularnych wyładowań elektrostatycznych iskrowych (6). Ponieważ rurociąg (1) jest uziemiony (4), pierwszym wnioskiem jest fakt, że płaszcz ochronny (3) musi gromadzić ładunek elektrostatyczny, który narastając powoduje wzrost potencjału i wyładowanie, po przekroczeniu wartości progowej, jaką jest wytrzymałość dielektryczna powietrza (ok. 3,2 MV/m). Jak wyjaśniono w trakcie oględzin, podczas prac montażowych doszło do uszkodzenia połączenia wyrównawczego pomiędzy płaszczem a rurociągiem (5). Pozostawało jednak pytanie, co stanowiło źródło elektryzacji. W pierwszej kolejności podejrzenia padły na nowo powstałą trasę kablową, jednak pomiary potwierdziły,

² Strefa 2 to przestrzeń, w której atmosfera wybuchowa zawierająca mieszaninę z powietrzem substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł, nie występuje w trakcie normalnego działania, a w przypadku wystąpienia, utrzymuje się przez krótki okres (Dz.U. 2010 nr 138 poz. 931).

że zastosowane kable nie stanowią źródła pola elektromagnetycznego, mogącego doprowadzić do elektryzacji sąsiadującego rurociągu. Podczas pomiarów wykryto jednak wyróżniające się spośród tła pole elektryczne, już w odległości ok. 1 m od miejsca powstawania wyładowań elektrostatycznych. W miejscu tym zidentyfikowano także nieszczelność rurociągu. Wytwarzany w ten sposób aerosol (cząsteczki wody i para wodna) stanowił źródło elektryzacji.

Mechanizm powodujący to zjawisko to elektryzacja poprzez kontakt. W trakcie wypływu medium, aerosol opuszczając rurociąg, w pewnym momencie stykał się i ponownie tracił kontakt z płaszczem ochronnym, przez co rozdzielany był ładunek. W obłoku pary, podczas kondensacji zachodziło zjawisko podobne, tj. wytwarzane cząstki cieczy rozdzielały się, generując przeciwne ładunki elektrostatyczne. Tłumaczy to obecność pola elektrycznego w obrębie wycieku pary.

Rozwiązaniem tego problemu było przede wszystkim zatrzymanie wycieku. Jest to tylko jeden z elementów łańcucha zdarzeń, które mogły doprowadzić do wybuchu. Szczęśliwie wyładowania zostały szybko zauważone, a w ich obrębie nie pojawiła się atmosfera wybuchowa. Był to bowiem jedyny brakujący element czynników koniecznych do powstania wybuchu.

Dokonano pomiarów rezystancji płaszcza ochronnego względem ziemi. Wynik przekraczał wartość $1\text{ M}\Omega$, co wobec wymogu zapewnienia połączenia z uziemieniem o rezystancji nie większej niż $10\ \Omega$ (wg PN EN 61430) stanowi oczywiste źródło problemu. Najprostsze i zarazem najskuteczniejsze w tej sytuacji jest wykonanie trwałego połączenia galwanicznego płaszcza ochronnego i rurociągu. W ramach organizacyjnych środków zaradczych, zalecane jest wyraźne oznakowanie punktów uzależniających oraz ich każdorazowa wzrokowa kontrola przez pracowników i służby utrzymaniowe.

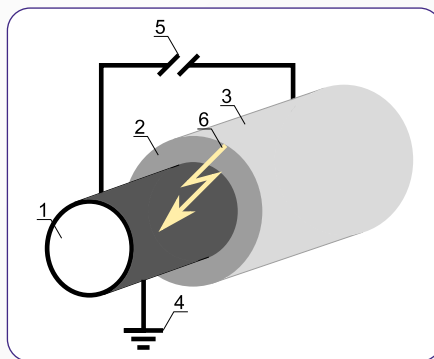
Podsumowując opisane zdarzenie zauważyć należy, że poza jednym, wszystkie czynniki konieczne do powstania wybuchu zostały spełnione, tak więc niewystąpienie zdarzenia było dziełem przypadku. Rurociąg technologiczny nie był właściwie zabezpieczony i/lub konserwowany, skoro tak łatwo mogło dojść do wyprowadzenia punktu pracy systemu poza bezpieczną granicę.

Elektryzacja nieprzewodzącego pyłu

Do drugiego zdarzenia doszło podczas transportu pyłu nieprzewodzącej substancji, schematycznie przedstawionego na rys. 6. [7].

Pokazany na schemacie fragment procesu technologicznego obejmował przesyp grawitacyjny pyłu termoplastycznego polimeru, jakim jest octan celulozy. Trzeba zauważyć, że zagrożenie należy rozszerzyć na dowolny nieprzewodzący pył, który transportowany jest czy to pneumatycznie, czy grawitacyjnie. W tego typu sytuacjach dochodzi bowiem do elektryzacji poprzez kontakt, tj. tuż po rozdzieleniu dwóch cząstek pojawi się nierównowaga ładunków elektrycznych (np. po zderzeniu dwóch cząstek materiału podczas swobodnego spadania w powietrzu).

Dzięki podciśnieniu wytwarzanemu w instalacji (1) pył transportowany jest pneumatycznie (2). W odpylaczu cyklonowym (3) pył jest separowany, po czym trafia do lejka samowyladowczego (zasob-



Rys. 5. Stalowa preizolowana rura ciepłownicza z płaszczem ochronnym

Źródło: oprac. własne na podstawie [7]

Fig. 5. Steel pre-insulated heating pipe with protective jacket [7]

nika – 4). Po otwarciu zaworu motylkowego (5), pył trafia do wózka transportowego (6).

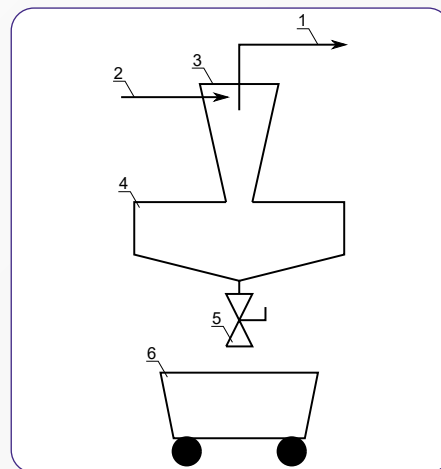
W opisywanym zdarzeniu pracownik zeznawał, że po otwarciu zaworu usłyszał wybuch, zobaczył błysk płomienia, a w otoczeniu urządzenia pojawił się pył zawieszony w powietrzu. Odczuwalny był także zapach spalonej substancji. Szczęśliwie, zdarzenie nie spowodowało obrażeń pracownika ani znaczących strat finansowych, przy czym można to uznać za szczęśliwy zbieg okoliczności.

Nie bez przyczyny do wybuchu doszło w momencie otwarcia zaworu motylkowego. Jak wspomniano, transport pneumatyczny pyłu nieprzewodzącego powoduje najczęściej jego elektryzację. Jeżeli transport odbywa się przewodzącym, uziemionym rurociągiem, a także obudowy zasobnika i separatora są skutecznie uziemione, cząstki pyłu zderzając się z tymi elementami oddają ładunek, przez co stopień elektryzacji jest znikomy. Zawór motylkowy składa się z metalowej obudowy, która stanowiąc ciąg technologiczny (także i w omawianym przypadku) jest uziemiona. Część czynną zaworu stanowi jednak dysk, obracający się wokół swojej osi. Kiedy zawór jest zamknięty, dysk dotyka metalowej obudowy. Po jego otwarciu, warunki uziemienia mogą ulegać drastycznemu pogorszeniu, zależnie od sposobu łożyskowania wału zaworu i wykorzystanych materiałów konstrukcyjnych. W opisywanym przypadku, w toku postępowania powypadkowego udowodniono, że dysk w zastosowanym zaworze motylkowym, po jego otwarciu, przestawał być uziemiony. Ładunek elektrostatyczny, przekazywany z poruszającego się poprzez zawór pyłu, nie miał zatem możliwości swobodnego odpłynięcia do uziemienia, na skutek czego potencjał elektryczny dysku wzrastał znacząco. Po przekroczeniu wartości krytycznej nastąpiło wyładowanie iskrowe pomiędzy dyskiem zaworu motylkowego a uziemioną obudową.

Podsumowując, stosowanie skutecznego uziemienia jest zwykle podstawowym środkiem zabezpieczającym przed powstawaniem wyładowań elektrostatycznych. Opisany przykład dowodzi, jak ważna jest drobiazgowo weryfikacja, czy rzeczywiście zastosowane środki bezpieczeństwa są wystarczające.

Podsumowanie

Wyładowanie elektrostatyczne stanowi zagrożenie z punktu widzenia możliwości porażenia pracownika, powstania wybuchu lub pożaru czy



Rys. 6. Schemat procesu przesypu grawitacyjnego

Źródło: oprac. własne na podstawie [7]

Fig. 6. Diagram of the gravitational dump process [7]

uszkodzenia urządzeń. Mimo wysokiego stanu wiedzy na temat zjawisk elektrostatycznych, na świecie regularnie dochodzi do zdarzeń tego typu. Prawdopodobną przyczyną tego stanu rzeczy jest brak świadomości pracowników na temat zagrożeń, czy też brak pełnego zrozumienia przyczyn i warunków powstawania wyładowań. Jednocześnie nie do przecenienia jest rola wdrożonych środków bezpieczeństwa, które muszą być regularnie konserwowane i poddawane przeglądowi.

Intencją autorów artykułu jest przekazanie Czytelnikom podstawowej wiedzy na temat zjawisk elektrostatycznych, szczególnie w kontekście bezpieczeństwa w środowisku pracy, w celu podnoszenia świadomości i poszerzania wiedzy osób mających do czynienia z tego rodzaju zagrożeniami.

BIBLIOGRAFIA

- [1] OHSAWA, A. Statistical analysis of fires and explosions attributed to static electricity over the last 50 years in Japanese industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2011, 30.
- [2] PTAK, SZ. Zagrożenia elektroenergetyczne w środowisku pracy. Warszawa, SGSP, 2020. ISBN 978-83-957235-3-7.
- [3] CYBULSKI, K., WIECHUŁA, B. Elektryzacja jako źródło zagrożenia. *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko*. 2011,3:5-2.
- [4] Ochrona przed rozładowaniami statycznymi w środowisku elektronicznym. *Podręcznik ESD*, Renex, 2020.
- [5] PTAK, SZ., SMALCERZ, A., OSTROWSKI, P. Estimation of the energy released during propagating brush discharge. *Journal of Electrostatics* 2020,103:103-416.
- [6] LUTTGENS, G., LUTTGENS, S. *Static Electricity. Understanding, Controlling, Applying*. Weinheim: Wiley-VCH, 2017. ISBN 0-7506-2782-4.
- [7] EGAN, S., Learning lessons from five electrostatic incidents. *Journal of Electrostatics*. 2017,88:183-189.

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 w zakresie projektów badawczych i rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.