

Zbigniew GACEK, Krzysztof MAŻNIEWSKI

OPIS NARAŻEŃ ELEKTRYZACYJNYCH W WYBRANYCH RUROCIĄGACH PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. Różne płyny i materiały sypkie mogą się silnie elektryzować podczas transportowania ich rurociągami przemysłowymi. Powstają wtedy potencjały elektryczne rzędu kilkudziesięciu kilowoltów, stanowiące zagrożenie dla instalacji przemysłowych i otoczenia. Artykuł zawiera skróconą charakterystykę rozważanych procesów elektryzacyjnych oraz podstawowych kryteriów oceny wynikających stąd zagrożeń.

DESCRIPTION OF ELECTRIFICATION HAZARDS IN CHOSEN INDUSTRIAL PIPES

Summary. Various liquids and loose materials may electrify strongly during their transport by means of industrial pipes. The high electric potentials of the order of dozens kilovolts, generated in that case, are dangerous for industrial installations and environment. The paper contains the shortened characteristic of considered electrification processes and basic criteria used to estimate the hazards resulting from these processes.

1. WPROWADZENIE

Gospodarka takimi mediami, jak ciecze, pary, gazy i materiały sypkie, jest związana zazwyczaj z ich elektryzacją, czyli powstawaniem nadmiarowych ładunków elektrostatycznych. Szczególnie dogodne warunki do elektryzacji powstają podczas transportu mediów rurociągami przemysłowymi (przewodami rurowymi) wykonanymi najczęściej z metalu, a tylko niekiedy z tworzyw sztucznych. Elektryzacji ulegać mogą wtedy zarówno ścianki rurociągu, jak i transportowane substancje chemiczne. Stwarza to niebezpieczeństwo zapłonu lub wybuchu. Jeżeli ponadto rurociąg nie jest odpowiednio uziemiony lub też jest wykonany z materiału izolacyjnego, wówczas w krótkim czasie może on uzyskać wysoki potencjał, grożący wyładowaniem iskrowym.

Spśród wielu czynników wpływających na poziom zagrożenia elektrycznością statyczną podczas transportu elektryzujących się mediów należy przede wszystkim wymienić: rodzaj, średnicę i długość rurociągu oraz rodzaj przesyłanej substancji. Wytworzone i zgromadzone na powierzchni rurociągów ładunki elektrostatyczne są w stanie wywołać poważne zakłócenia produkcyjne (wiążące się ze stratami materialnymi), a nawet stworzyć zagrożenie dla zdrowia i życia ludzkiego. Zakłócenia powodowane elektryzacją rozpatruje się przede wszystkim jako:

- zagrożenia pożarowo-wybuchowe, wywołane przez wyładowania elektrostatyczne w środowiskach zawierających substancje wybuchowe lub łatwo zapalne,
- zaburzenia w procesach produkcyjnych, przejawiające się m.in. w zmniejszeniu wydajności i pogorszeniu jakości wyrobów oraz błędnych wskazaniach przyrządów pomiarowych,
- szkodliwe oddziaływanie pola elektrostatycznego na organizm ludzki, powodujące w krańcowych przypadkach schorzenia układu nerwowego i krążenia.

Artykuł zawiera skrótowy opis mechanizmów elektryzowania się płynów i materiałów sypkich transportowanych rurociągami, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości i sposobów oceny występujących wtedy narażeń elektryzacyjnych.

2. CHARAKTERYSTYKA PROCESÓW ELEKTRYZACYJNYCH

Podczas przepływu przez rurociągi rozmaitych mediów dochodzi do skomplikowanych procesów wytwarzania nadmiaru przestrzennych ładunków elektrycznych jednego znaku. Zjawiska te, ogólnie nazywane elektryzacją i zaliczane do elektrostatyki, nie są do końca poznane. Dotychczas nie powstała dostatecznie ogólna teoria elektryzacji, chociaż problemy związane z elektryzowaniem się płynów (cieczy i gazów) podczas ich przepływu były tematami licznych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Mechanizm elektryzacji przemieszczających się płynów jest bowiem wieloparametrowy i trudny do opisu ilościowego. Powstało co najmniej kilka - na ogół niespójnych - modeli obliczeniowych dotyczących, na przykład gęstości ładunku elektrycznego unoszonego przez strumień cieczy (patrz [10], [11] i [12]). Wynika to m.in. z braku jednorodności co do zakresu niektórych fizykochemicznych założeń upraszczających oraz związanych z tym postaci uproszczonych równań różniczkowych i ich rozwiązań analitycznych.

Przyczyną elektryzacji są zjawiska elektrokinetyczne i elektrochemiczne, zachodzące przede wszystkim na granicy faz materiału stałego (np. ścianki rurociągu) i unoszonego płynu. O istocie zjawisk elektrokinetycznych w cieczach i gazach decydują przede wszystkim dwa parametry materiałowe: konduktywność i przenikalność elektryczna (tabl. 1). Konduktywność cieczy jest miarą ich zdolności do jonowego przewodzenia prądu elektrycznego, a jednocześnie podatności do elektryzacji [8]. Wartość tego parametru mieści się w szerokim przedziale ($\gamma = 10^{-15} + 10^{-1}$ S/m), zależnie od rodzaju cieczy oraz od rodzaju i stężenia

rozpuszczonych w niej zanieczyszczeń. Należy podkreślić, że ciecze o dużej konduktywności i bardzo czyste (nieprzewodzące) praktycznie się nie elektryzują. Podatność elektryzacyjna cieczy rośnie jednak ze wzrostem jej konduktywności i osiąga maksimum, gdy $\gamma \approx 10^{-10}$ S/m. Dla wodnych roztworów jonowych zmniejsza się ona praktycznie do zera [1]. W cieczach o małym stężeniu swobodnych jonów konduktywność jest proporcjonalna do tego stężenia, natomiast w cieczach o większym stężeniu tworzą się tzw. jony „kolektywne”. Konduktywność cieczy rośnie wtedy mniej niż proporcjonalnie ze wzrostem stężenia jonów.

Tablica 1

Parametry materiałowe decydujące o zjawiskach elektrokinetycznych

Rodzaj płynu	ciecz	gaz
konduktywność γ	<ul style="list-style-type: none"> • niepomijalne procesy elektryzacji występują dla $\gamma = (10^{-13} \div 10^{-7})$ S/m; • największa podatność elektryzacyjna występuje, gdy $\gamma \approx 10^{-10}$ S/m; • ciecze o bardzo małej i bardzo dużej konduktywności nie elektryzują się. 	<ul style="list-style-type: none"> • czyste gazy nie elektryzują się $\gamma \approx 10^{-18}$ S/m; • elektryzacji ulegają gazy zapyłone, a ładunki powstają na cząstkach stałych.
przenikalność elektryczna względna ϵ_r	<ul style="list-style-type: none"> • jony w cieczach o niewielkiej przenikalności nie mogą efektywnie dysocjować (duże siły międzycząsteczkowe); • problemy mogą stwarzać ciecze o małej przenikalności ($\epsilon_r \approx 2$) i małej konduktywności, np. węglowodory. 	<ul style="list-style-type: none"> • czyste gazy nie elektryzują się ($\epsilon_r \approx 1$).

W przeciwieństwie do niektórych cieczy, czyste gazy praktycznie się nie elektryzują podczas przepływu przez rurociągi. Dzieje się tak m.in. dlatego, że ich konduktywność jest bardzo mała, rzędu 10^{-18} S/m. Zjawisko powstawania ładunków elektrycznych występuje jednak na rozmaitych cząsteczkach stałych znajdujących się w gazie, np. cząstkach materiału sypkiego transportowanego pneumatycznie za pomocą strumienia powietrza.

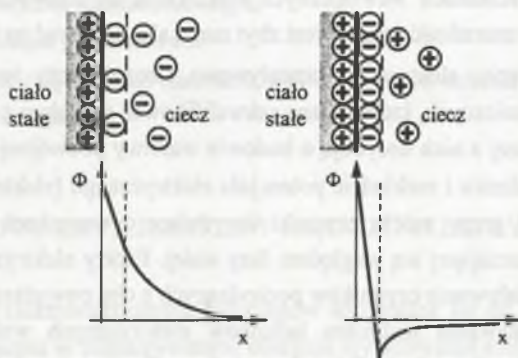
Przenikalność elektryczna względna rozmaitych cieczy może być bardzo zróżnicowana ($\epsilon_r = 2 \div 80$), natomiast przenikalność gazów jest zbliżona do jedności. Również z tego powodu czyste gazy są mediami o bardzo małej podatności elektryzacyjnej. Ciecze o małej przenikalności nie są podatne na elektryzację, ponieważ - zgodnie z prawem Coulomba - siła przyciągania między jonami dodatnimi i ujemnymi jest wtedy znacząca, a jony nie mogą swobodnie dysocjować i przemieszczać się w polu elektrycznym. Problemy mogą jednak stwarzać ciecze o wprawdzie niewielkiej przenikalności ($\epsilon_r \approx 2$), ale jednocześnie praktycznie nieprzewodzące, np. ciekłe węglowodory.

Ciecz praktycznie nieprzewodząca ładuje się elektrycznie wtedy, gdy rozrywane są granice międzyfazowe. W skali mikroskopowej następuje to na ogół w wyniku rozdzielania się ładunków na granicy fazy stałej (wewnętrznej ściance rurociągu) i fazy ciekłej wskutek wzajemnego przemieszczania się powierzchni międzyfazowych. Nadmiar ładunku jednego znaku pojawiający się w cieczy jest spowodowany unoszeniem się części *elektrycznej warstwy podwójnej*, będącej wynikiem rozkładu ładunków na granicy faz. Taka warstwa tworzy się wskutek zjawiska selektywnej adsorpcji i powstaje na wewnętrznej ściance rury, a dokładniej - na granicy faz metalu i cieczy. Na powierzchni materiału stałego przeważają wyindukowane ładunki o jednej biegunowości, natomiast ładunki przeciwnego znaku (o nierównomiernej gęstości objętościowej i znacznie słabszych wiązaniach) tworzą warstwę dyfuzyjną w cieczy. Liczba ładunków w warstwie podwójnej zależy od rodzaju reakcji elektrochemicznej na granicy fazy stałej i ciekłej. Według [4], jest ona odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z konduktywności cieczy.

Ładunki zaczynają przyczepiać się do granicy faz między ścianką rurociągu metalowego a cieczą dzięki mechanizmom, związanym z: lustrzanymi siłami przyciągania między jonami w cieczy i metalu, adsorpcją chemiczną (specyficzną dla niektórych jonów w cieczy), uwalnianiem jonów z metalu wskutek procesów elektrolitycznych. Zasadnicze znaczenie ma w tym przypadku rozkład ładunku elektrycznego w warstwie podwójnej, który warunkuje charakter zmian potencjału w pobliżu ścianki rurociągu. Wpływa to z kolei na podstawowe parametry fizyczne cieczy oraz podział ładunku wskutek jej ruchu.

Zgodnie z najczęściej obecnie wykorzystywanym modelem Sterna (patrz [1] i [5]), odwzorowującym warstwę podwójną na granicy fazowej ciało stałe - ciecz, elektryczna warstwa podwójna składa się z dwóch części: bardzo cienkiej podwarstwy (rzędu promienia jonu) powstającej bezpośrednio przy ściance i znacznie grubszej podwarstwy dyfuzyjnej (położonej nieco dalej) o niewyraźnie zaznaczonych granicach. Grubość podwarstwy dyfuzyjnej zależy od konduktywności cieczy i może być bardzo zróżnicowana - w przedziale od części milimetra (wodne roztwory o konduktywności większej niż 10^{-6} S/m) do wielu centymetrów (bardzo czyste węglowodory lub skroplone gazy). Model Sterna wykorzystuje poprzednie teorie Helmholtza i Gouya-Chapmana, wyjaśniając zjawisko zmiany znaku potencjału (rys.1). Stwierdzono, że właśnie rozerwanie warstwy podwójnej i przemieszczenie się części jej podwarstwy dyfuzyjnej jest główną przyczyną elektryzacji. Ładowanie cieczy następuje wskutek ruchu nośników ładunku w kierunku środka (osi) przewodu rurowego, po opuszczeniu przez nie podwarstwy dyfuzyjnej związanej ze ścianką rurociągu.

Problemy dotyczące procesów fizykochemicznych zachodzących na granicy faz ciało stałe - ciecz są analizowane niekiedy przy wykorzystaniu tzw. *potencjału elektrokinetycznego (dzeta)*. Definiuje się go jako potencjał na płaszczyźnie poślizgu między powierzchnią ciała stałego i cieczy, gdy te dwie fazy przemieszczają się względem siebie. Jest to więc potencjał w warstwie przyściennej cieczy, która zaczyna się poruszać. Potencjał dzeta jest łatwo mierzalny tylko wtedy, gdy opisany jest ruch cząstek cieczy w zewnętrznym polu elektrycznym. Jest on w zasadzie wielkością eksperymentalną [2].



Rys.1. Odmiany modelu Sterna warstwy podwójnej ładunku na granicy ciało stałe - ciecz: a) model bez zmiany znaku potencjału Φ , b) model ze zmianą znaku potencjału Φ

Fig. 1. Modifications of Stern' model for a double layer on the solid - liquid border: a) model without reversal of the electric potential Φ sign, b) model with reversal of the electric potential Φ sign

Ciecz płynąca przez rurociąg unosi ładunki z podwarstwy dyfuzyjnej na przykład do zbiornika. Jeśli rozpoczęty proces elektryzacji cieczy ma być kontynuowany, to ładunki uniesione przez ciecz muszą być zastąpione przez ładunki dopływające z ziemi do ścianki przewodu rurowego. Jest to możliwe nawet w przypadku nieziemionego przewodu rurowego, ponieważ do tego celu wystarczają bardzo niewielkie prądy ładowania, rzędu $10^{-14} \div 10^{-9}$ A (wg [1]).

Poziom naładowania cieczy wskutek jej wymuszonego przepływu w rurociągu jest ograniczony przede wszystkim przez trzy czynniki:

- prędkość dyfuzji jonów ze ścianki rurociągu i następnie procesu ich rozładowania (relaksacji),
- powstanie ustalonego prądu elektryzacji przepływowej w cieczy (w długich rurociągach może to doprowadzić do zupełnego odbudowania warstwy podwójnej),
- konduktywność cieczy (przy czym rodzaj jonów decydujących o przewodzeniu wpływa na biegunowość, lecz nie na wartość ładunków).

Na podstawie wielu badań eksperymentalnych, podsumowanych m.in. w książce [1], stwierdzono, że:

- niepomijalne procesy elektryzacji przepływowej mogą wystąpić w cieczach o konduktywnościach mieszczących się w przedziale $10^{-13} \div 10^{-7}$ S/m;
- gęstość powstających wtedy ładunków elektrycznych jest rzędu $10^{-6} \div 10^{-2}$ C/m³;
- największą podatnością na elektryzację (niewiele zależną od rodzaju zastosowanego metalu konstrukcyjnego) charakteryzują się rury metalowe;
- mniejszą, lecz niepomijalną podatność na elektryzowanie się wykazują rury wykonane z materiałów niemetalowych (np. ze szkła, gumy i rozmaitych tworzyw sztucznych);
- przepływy turbulენტne powodują większe efekty elektryzacyjne niż przepływy laminarne;

- rury o szorstkich ściankach wewnętrznych elektryzują się zazwyczaj bardziej niż rury gładkie (nawet gdy szorstkość ścianek jest zbyt mała, aby wpływać na turbulencję cieczy).

W ogólnym ujęciu, elektryzacja przepływowa cieczy zależy jednocześnie od wielu czynników fizykochemicznych, które można zakwalifikować do jednej z dwóch grup. Czynniki należące do pierwszej z nich decydują o budowie warstwy podwójnej na granicy faz, czyli również o gęstości ładunku i rozkładzie potencjału elektrycznego (elektrokinetycznego) w tej warstwie. Do drugiej grupy należą czynniki decydujące o warunkach hydrodynamicznych fazy ciekłej przemieszczającej się względem fazy stałej. Efekty elektryzacyjne cieczy zależą od wzajemnego oddziaływania czynników pochodzących z obu powyższych grup.

Zjawisko powstawania nadmiaru ładunków elektrycznych wskutek wymuszonego przepływu gazu zawierającego cząstki stałe jest spowodowane zupełnie innymi dynamicznymi mechanizmami elektryzacji [3]. Może ono powstać wskutek:

- stykania i rozdzielania się cząstek między sobą oraz ze ściankami elementu instalacji,
- uderzania i tarcia cząstek o powierzchnię ścianki elementu instalacji,
- tarcia symetrycznego i asymetrycznego między powierzchniami cząstek stałych.

Efekty elektryzacyjne zależą m.in. od rodzaju rozdrobnionego materiału (pyłu) oraz rodzaju materiału konstrukcyjnego, z którego wykonano element instalacji (szorstkość, stopień zanieczyszczenia). Podczas wymuszonego przepływu gazu następuje wymiana ładunku elektrycznego między cząstkami stałymi a ściankami. Jest to bardzo złożony proces tzw. tryboelektryzacji, czyli dynamicznej elektryzacji wskutek tarcia, zależny od wielu rozmaitych czynników i nadal nie w pełni poznany. Należy jednak podkreślić, że:

- gazy bardzo czyste praktycznie nie elektryzują się podczas przepływu (w przeciwieństwie do niektórych cieczy),
- elektryzacja nieprzewodzących i przewodzących cząstek stałych w gazie jest zjawiskiem wyłącznie powierzchniowym,
- procesowi elektryzowania się ulegają wszystkie rozdrobnione w gazie ciała stałe, niezależnie od ich właściwości fizycznych.

Pomimo odmiennych mechanizmów elektryzacji cząstek stałych w strumieniu gazu, przenoszenie ładunków elektrycznych jest podobne do prądu elektryzacji (przepływu) w strumieniu cieczy, opisanego ogólnym wzorem:

$$\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = \int_0^R qv_x 2\pi r dr, \quad (1)$$

w którym:

\mathbf{J} - wektor gęstości prądu elektryzacji przepływowej,

$d\mathbf{s}$ - element przekroju poprzecznego rury,

q - gęstość objętościowa ładunku elektrycznego w strumieniu płynu,

v_x - prędkość składowa (osiowa) płynu,

R - promień wewnętrzny ścianki rurociągu,

$r \leq R$ - zmienna bieżąca promieniowa.

Oznacza to, że podobne są również narażenia wywołane przez ładunki przemieszczające się wraz z płynami w rurociągach.

3. PODSTAWOWE KRYTERIA OCENY NARAŻEŃ ELEKTRYZACYJNYCH

Ocena narażeń elektrostatycznych rurociągów sprowadza się do uzyskania informacji o możliwości wystąpienia w rozpatrywanym obiekcie wyładowania elektrostatycznego, które mogłoby wywołać pożar lub wybuch. Zagrożenie pożarowo-wybuchowe zależy głównie od następujących czynników:

- istnienia źródeł ładunków elektrostatycznych podczas procesów produkcyjnych, związanych z zastosowaniem materiałów o dużej rezystywności skrośnej i powierzchniowej,
- gromadzenia się ładunku na elektryzujących się materiałach i wynikającego stąd wzrostu potencjału elektrycznego, wystarczającego do spowodowania wyładowań iskrowych,
- energii wydzielanej podczas wyładowań elektrostatycznych, a dostatecznej do zapłonu palnego medium,
- obecności mieszaniny palnej lub wybuchowej w strefie wyładowań iskrowych.

Według pracy [6], do oceny podatności elektryzowania się materiałów niezbędna jest znajomość następujących parametrów elektrycznych:

- rezystywności skrośnej ρ_v i powierzchniowej ρ_s (dla materiałów stałych),
- rezystancji upływu obiektu odizolowanego od ziemi R_u ,
- gęstości powierzchniowej σ lub objętościowej ładunku ρ ,
- natężenia pola elektrostatycznego E w pobliżu naelektryzowanego obiektu,
- prądu ładowania I lub rozładowania I_w obiektu.

Podstawowymi wielkościami kryterialnymi, służącymi do oceny stopnia zagrożenia elektrycznością statyczną oraz kontroli skuteczności stosowanych środków zaradczych, są:

- graniczne wartości rezystywności,
- czas relaksacji ładunków elektrostatycznych τ ,
- energia pochodząca od ładunku elektrostatycznego zgromadzonego na powierzchni W_w ,
- graniczne wartości napięcia lub natężenia pola elektrycznego,
- najwyższa dopuszczalna wartość ładunku przenoszonego w impulsie wyładowania Q_i ,
- gęstość masowa ładunku $q_m = Q/m$ (elektryzacja materiałów sypkich).

Metody oceny zagrożenia pożarowego i wybuchowego wywołanych elektryzacją dielektryków stałych, materiałów sypkich oraz zawieszin cząstek w powietrzu (aerozoli) określa norma [7]. Dla materiałów o płaskiej powierzchni norma ta podaje na przykład, że zagrożenie nie występuje, jeśli: $\sigma \leq 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2$, $E \leq 10^5 \text{ V/m}$ (przy minimalnej energii zapłonu $W_{z, \min} \leq 5 \cdot 10^{-1} \text{ J}$), $\tau \leq 10^{-3} \text{ s}$, $Q_i \leq 0,6 \cdot 10^{-8} W_{z, \min}$ (przy czym $W_{z, \min}$ wyrażona w mJ), $W_w \leq W_{z, \min}$

(przy czym $W_{z, \min}$ wyrażona w J). Zgodnie z normą [7], w przewodach przeznaczonych do pneumatycznego transportu materiałów sypkich nie powstaje zagrożenie, jeżeli spełnione są równoważne warunki:

$$\frac{1}{D_p} \cdot \frac{Q(t)}{v_0(t)} \leq 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2} \quad (2)$$

lub

$$D_p \cdot \frac{Q(t)}{V_0(t)} = D_p \rho_d(t) = D_p \rho_s C_v(t) \leq 10,6 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}, \quad (3)$$

gdzie:

D_p - średnica przewodu przesyłowego (m),

$Q(t)$ - ładunek elektrostatyczny (C) cząstek materiału przemieszczających się w czasie t (s),

v_0 - średnia prędkość liniowa nośnika (m/s),

$C_v(t) = \frac{V(t)}{V(t) + V_0(t)}$ - stężenie objętościowe cząstek stałych w przepływie dwufazowym¹⁾,

$V(t)$ - objętość całkowita cząstek (m³),

$V_0(t)$ - objętość fazy nośnej gazowej (powietrza), odpowiadająca zawartości cząstek $V(t)$ (m³),

$\rho_s = \frac{Q(t)}{V(t)}$ - gęstość objętościowa statyczna ładunku elektrostatycznego (C·m⁻³),

$\rho_s = \frac{Q(t)}{V(t) + V_0(t)}$ - gęstość objętościowa dynamiczna ładunku elektrostatycznego²⁾ (C·m⁻³).

Wartości po prawej stronie nierówności (2) i (3) obliczono przy założeniu maksymalnej gęstości powierzchniowej ładunku $\sigma_{\max} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2$ i $E_{\max} = 3,0 \cdot 10^5 \text{ V/m}$.

Metody badania rezystywności i rezystancji upływu określa norma [8]. Zgodnie z warunkami tam postanowieniami, do wyznaczania rezystancji należy stosować następujące przyrządy pomiarowe:

- amperomierze o zakresie 10^{-15} ÷ 10^{-3} A i dokładności $\pm 5\%$ oraz woltomierze o zakresie do 1 kV, rezystancji wewnętrznej większej niż $10^{13} \Omega$ i dokładności pomiaru napięć nie mniejszej niż $\pm 10\%$,
- omomierze o zakresie co najmniej do $10^{14} \Omega$, napięciu pomiarowym stałym, regulowanym w zakresie 10÷1000 V oraz o dokładności nie mniejszej niż podanej w tabelicy 2.

¹⁾ $C_v(t) = \frac{V(t)}{V_0(t)}$, gdy spełniony jest warunek $V(t) \ll V_0(t)$

²⁾ $\rho_s = \frac{Q(t)}{V_0(t)}$, gdy spełniony jest warunek $V(t) \ll V_0(t)$.

Tablica 2

Dokładność pomiaru rezystancji

Zakres pomiarowy omomierza, Ω	Dokładność pomiaru, %
do 10^9	± 5
$10^9 \div 10^{13}$	± 10
powyżej 10^{13}	± 20

Zgodnie z normą [8], do pomiaru rezystancji skrośnej i powierzchniowej przewodów rurowych należy stosować elektrody wykonane z taśmy przewodzącej o szerokości 25 mm, które powinny być umieszczone na obydwu końcach przewodu. Na badany przewód należy uprzednio nanieść elektrody ciekłe: na jednym końcu przewodu na powierzchni zewnętrznej, a na drugim - na powierzchni wewnętrznej. Elektrody ciekłe powinny być wykonane w postaci powłoki z przewodzącej cieczy lub przewodzącej substancji koloidalnej.

Ocenę wyników przeprowadza się według następujących kryteriów:

- jeśli $R_s, R_v < 5 \cdot 10^4 \Omega$, to wyrób jest elektroprzewodzący i nie ulegający naelektryzowaniu, ale nie zapewniający ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym,
- jeśli $5 \cdot 10^4 \Omega \leq R_s, R_v \leq 1 \cdot 10^6 \Omega$, to wyrób jest elektroprzewodzący i przydatny do transportowania cieczy łatwo zapalnych,
- jeśli $1 \cdot 10^6 \Omega \leq R_s, R_v \leq 1 \cdot 10^9 \Omega$, to wyrób jest antystatyczny, nie ulegający niebezpiecznemu naelektryzowaniu i przydatny do wzajemnego łączenia indywidualnie uziemionych zbiorników cieczy palnych.

Norma [8] podaje również kryteria oceny pomiaru rezystywności skrośnej cieczy (pomiar ρ_v , cieczy opisany jest również w normie PN-84/E-04409), ponieważ:

- jeśli $\rho_v \leq 10^4 \Omega \cdot m$, to ciecz nie jest zdolna do niebezpiecznego naelektryzowania się, gdy znajduje się w kontakcie z uziemionymi elementami metalowymi urządzeń,
- jeśli $10^4 \Omega \cdot m \leq \rho_v \leq 10^8 \Omega \cdot m$, to ciecz wykazuje ograniczoną zdolność do niebezpiecznego naelektryzowania się (elektryzacja takiej cieczy może ewentualnie stwarzać zagrożenie w obiektach lub strefach zaliczanych do kategorii zagrożenia wybuchem W I),
- jeśli $\rho_v > 10^8 \Omega \cdot m$, to elektryzacja cieczy może wywoływać zagrożenie pożarowe i wybuchowe (w obiektach zagrożonych wybuchem należy zastosować odpowiednie środki ochrony).

Na podstawie powyższego kryterium dokonuje się również oceny rezystancji skrośnej R_s materiałów sproszkowanych, po jej przeliczeniu na rezystywność skrośną według wzoru: $\rho_v = 0,57R_s$.

W przypadku rurociągów wykonanych z materiałów przewodzących narażenie elektryzacyjne można ocenić na podstawie wyniku pomiaru rezystancji upływu R_u . Stan niebezpiecznego naelektryzowania obiektu nie występuje, jeżeli spełniony jest warunek $R_u \leq 10^6 \Omega$. Przy uwzględnieniu pojemności elektrycznej C_u , tworzonej przez kontrolowany obiekt względem ziemi, powinien być spełniony warunek relaksacyjny: $\tau = R_u C_u \leq 10^3$ s.

4. PODSUMOWANIE

Ocena narażeń elektryzacyjnych powstających wskutek transportu płynów i materiałów sypkich rurociągami przemysłowymi jest zadaniem złożonym. Należy bowiem uzyskać informację o wielu parametrach elektrycznych i fizycznych, charakteryzujących m.in. materiał, z którego wykonany jest rurociąg, właściwości fizykochemiczne przesyłanej substancji oraz warunki dynamiczne przepływu. Wybór parametrów niezbędnych do pomiaru oraz kryteria, na podstawie których można ocenić zmierzone wielkości, regulują tylko częściowo odpowiednie normy i wytyczne. W przepisach tych położono nacisk przede wszystkim na badania laboratoryjne - badawcze i projektowe. W przypadku obiektów rzeczywistych przepisy ograniczają się do podania zasad ich ochrony od elektryczności statycznej ze względu na zagrożenie pożarowo-wybuchowe.

Narazenia elektryzacyjne oraz związane z nimi zakłócenia produkcyjne występujące podczas przesyłu mediów rurociągami przemysłowymi coraz częściej wymagają ciągłej kontroli stanu naelektryzowania mediów i elementów konstrukcji, a także oceny wynikającego stąd zagrożenia - zgodnie z aktualnymi wymogami bezpieczeństwa.

LITERATURA

1. Cross J.: Electrostatics. Principles, Problems and Applications - Chapter 2 of the book: Electrification of Solids and Liquids. IOP Publ. Ltd 1987.
2. Felici N. J., Gosse J. P., Solofomboahangy A.: Liquid Flow Electrification and Zeta-Potential in Hydrocarbons. *J. Electrostatics*, 12 (1982), pp. 369-376.
3. Gajewski J. B.: Continuous Non-Contact Measurement of Electric Charges of Solid Particles in Pipes of Pneumatic Transport. Part II: Measuring Systems and its Application. Conf. Rec. of the 1989 IEEE/IAS Annual Meeting, San Diego, USA, Oct.1÷5, 1989, pp. 1964÷1969.
4. Gavis J.: Transport of Electric Charge in Low Dielectric Constant Fluids. *Chem. Eng. Science*, 1964, Vol. 19, pp. 237-252.
5. Kędzia J.: Elektryzacja statyczna oleju transformatorowego i wynikające z niej zagrożenia. Rozdz. 3.1.3 książki „Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce”, t. I, ss. 225-236.
6. Ministerstwo Przemysłu Chemicznego i Lekkiego: Wytyczne w zakresie ochrony przed elektrycznością statyczną obiektów i instalacji produkcyjnych. Przedsiębiorstwo Wydawnictw i Wystaw Przemysłu Chemicznego i Lekkiego „Chemil”, Warszawa 1984.
7. PN-92/E-05201. Metody oceny zagrożeń wywołanych elektryzacją materiałów dielektrycznych stałych. Wyd. Normalizacyjne „ALFA”, Warszawa 1993.
8. PN-92/E-05203. Materiały i wyroby stosowane w obiektach oraz strefach zagrożonych wybuchem. Wyd. Normalizacyjne „ALFA”, Warszawa 1993
9. Touchard G., Borzeix J., Saunière J.: Électrisation des fluides en mouvement dans les conduites. *Revue Générale d'Électricité*, No 7-8, 1985, pp. 592-602.

10. Touchard G.: Flow Electrification of Liquids - Chapter 5 of the Handbook of Electrostatics Processes. Marcel Dekker Inc. New York 1995, pp. 83-87.
11. Touchard G., Romat H.: Electrostatic Charges Conected by Flow of Dielectric Liquid Through Pipes of Different Length and Radii (Theoretical Model and Experimental Results). J. Electrostatics, 10 (1981), pp. 275-281.
12. Touchard G.: Streaming Currents Developed in Laminar and Turbulent Flows Through a Pipe. J. Electrostatics, 5 (1978), pp. 463-476.

Recenzent: Dr hab. inż. Józef Kędzia, prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dn. 15 czerwca 1998 r.

Abstract

The management of such substances as liquids, steams and loose materials is connected with their electrification, i.e. generation of excess electrostatic charges. Particularly convenient conditions for electrification processes occur during transportation of media through industrial pipes, usually made of metal. Walls of the pipe as well as flowing substances may electrify then. It causes ignition or explosive conditions in certain circumstances.

Electrostatic charges created and assembled on the pipe surface are able to cause considerable productive disturbances (connected with material losses) and even health or life hazards. Electrostatic disturbances are considered first of all as fire- or explosive conditions, productive disturbances and harmful influences of the electrostatic field on people. The first part of the paper gives a short description of electrification processes in fluids and loose materials during their transportation through pipes, whereas the second one concerns electrification hazards and valid Polish regulations in this field.