

ROZDZIAŁ III.

WYŁADOWANIA ZUPEŁNE W GAZACH.- NAPREŻENIA KRYTYCZNE PODSTA-  
WOWYCH UKŁADÓW POWIETRZNYCH

Z ciał lotnych, które mogą mieć praktyczne zastosowanie w elektro-technice jako materiały izolacyjne, najważniejszą rolę odgrywa powietrze. Występuje ono jako naturalny izolator wszędzie tam, gdzie nie zachodzi potrzeba innego, bezpośredniego odizolowania części metalowych znajdujących się pod napięciem /Nr. przy przewodach napowietrznych poza punktami zamocowania/. Jego własności izolacyjne mogą być także specjalnie wyzyskane przy niektórych konstrukcjach /izolatory przepustowe i t.d./. Dokładna zatem znajomość własności izolacyjnych powietrza, a głównie jego wytrzymałości, jest niezbędna we wszystkich prawie przypadkach, kiedy mamy do czynienia z wysokim napięciem.

Badanie zjawisk, zachodzących w powietrzu pod wpływem pola elektrycznego i praw temi zjawiskami rządzących, należy właściwie do fizyki; tutaj zajmujemy się tą sprawą ogólnie, zatrzymując się głównie na praktycznej stronie zagadnienia, w zastosowaniu do wysokich napięć przemysłowych. Najwięcej obchodzi nas elektryczna wytrzymałość powietrza przy rozmaitej postaci układów i w rozmaitych warunkach, oraz sposoby mierzenia tej wytrzymałości. Naprzód jednak musimy zająć się pokrótce zjawiskami, zachodzącymi w powietrzu pod wpływem wysokiego napięcia.

1. WYŁADOWANIA W POWIETRZU.

Jak wiadomo z teorii kinetycznej, gazy składają się z cząsteczek, poruszających się prostolinijnie i zderzających się ze sobą, przyczem wszystkie kierunki ruchu cząsteczek są jednakowo prawdopodobne. Przy zderzeniu się jednej cząsteczki z drugą następuje zmiana kierunku ich ruchu.

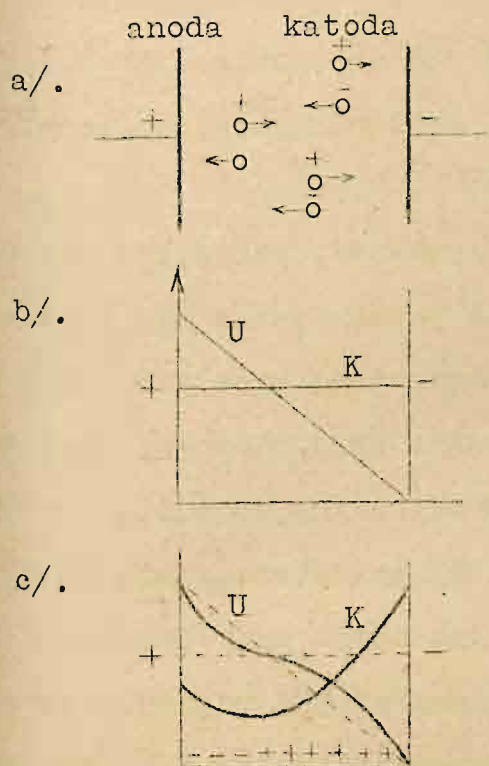
Cząsteczki składają się z atomów, te zaś z protonów, obdarzonych dodatnim ładunkiem i tworzących jądro atomu, oraz elektronów o ładunku ujemnym, krążących około jądra. Elektron posiada masę ok. 1840 razy mniejszą od atomu wodoru. Normalne, t.j. niezjonizowane cząsteczki

posiadają ładunek dodatni jądra,liczbowo równy ładunkowi ujemnemu wszystkich elektronów razem. Ponieważ normalne cząsteczki składają się z atomów niezjonizowanych,przeto nie działają na nie siły pola elektrycznego ; pod względem działania nazewnątrz ładunki dodatnie i ujemne w cząsteczce zobojętniają się. Oprócz cząsteczek normalnych istnieją cząsteczki posiadające nadmiar ładunku elektrycznego jednego znaku ; są to jony gazowe. Jonem dodatnim albo anjonem nazywamy cząsteczkę, mającą w swoim składzie atom, o jednym lub kilku elektronach za mało ; jon ujemny albo katjon jest to: albo cząsteczka w której składzie znajduje się atom o jednym lub kilku elektronach za dużo w stosunku do normalnej ilości elektronów /ciężkimjon ujemny/, albo niezwiązany elektron.

Powietrze naturalne jest mieszaniną niezjonizowanych cząsteczek  $N_2$  i  $O_2$  oraz, jako domieszek cząsteczek  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$  pod postacią pary lub kropelek mgły, cząsteczek gazów szlachetnych i emanacji radu. Cząsteczki zjonizowane i wolne elektrony znajdują się w powietrzu, w warunkach naturalnych, w liczbie znikomej, a powstają, głównie dzięki samodzielnemu rozpadowi cząsteczek gazu szlachetnego na jony dodatnie i elektrony, oraz dzięki jonizowaniu się cząsteczek gazu przez zderzenia z fotonami promieniowania elektromagnetycznego krótkofalowego, wysyłanymi przez związki pierwiastków radioaktywnych /promienie  $\gamma$ /, lub słońce / promienie nadfioletowe/. Do jonizacji powietrza przyczyniają się również niedawno odkryte promienie kosmiczne.

Jeżeli do elektrod w powietrzu przyłożymy napięcie, następuje przenoszenie ładunków swobodnych jonów do elektrod: dodatnich do katody, ujemnych do anody /Rys.44a./, jest to zjawisko przepływu prądu elektrycznego przez powietrze. Jony dodatnie, przybywając do katody, pobierają z niej ilość elektronów, niezbędną do zneutralizowania się i stają się znów cząsteczkami elektrycznie obojętnymi. Podobnie ciężkie jony ujemne oddają nadmiar elektronów anodzie, elektrony swobodne zaś, jeśli są w gazie, przybywając do anody, wprost do niej przenikają. Elektrony, po dostaniu się do metalu, przebiegają pod wpływem siły elektromotorycznej,





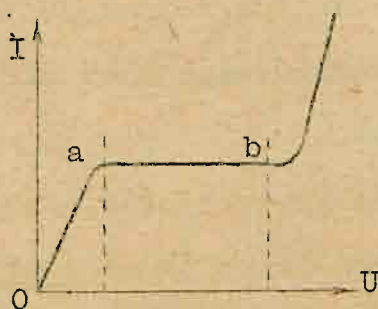
Rys.44.

działającej w obwodzie, przez przewód metalowy i źródło siły elektromotorycznej do katody, czyli jednocześnie z przepływem prądu w gazie powstaje prąd w obwodzie zewnętrznym, o ile obwód zewnętrzny jest zamknięty.

Elektrony, zebrane na katodzie pod wpływem siły elektromotorycznej, działającej w obwodzie, wytwarzają pole elektrostatyczne między elektrodami. Jeśli katoda nie jest rozżarzona, to elektrony nie mogą jej, wskutek działania sił powierzchniowych, opuścić i spowodować przepływ prądu przez gaz. Siły, powstrzymujące elektrony od wyjścia z metalu, są siłami przyciągania między

elektronem a cząsteczką przez niego spolaryzowaną. Natężenie pola elektrycznego, potrzebne do wyrwania elektronów z katody **nierozżarzonej**, powinno być /dla elektrod płytowych/ rzędu 10 milionów V/cm. Tak wielkie natężenia pola elektrycznego w praktycznych układach wysokiego napięcia nie zachodzą. Przy małych natężeniach liczba jonów dodatnich i ujemnych jest w przybliżeniu jednakowa, działanie ich nawzajemnie znosi się i na rozkład pola nie ma to wpływu. Natężenie pola /K/ pozostaje stałe /Rys.44b/, a spadek napięcia /U/ między elektrodami jest liniowy.

Pod wpływem pola elektrycznego jony poruszają się więc i nabierają prędkości, która zależy od natężenia pola i jest dla jonów różnego znaku inna: przy naprężeniu ok. 30 kV/cm. i normalnym ciśnieniu atmosferycznym wynosi dla jonów dodatnich ok.  $10^5$  cm/sek, a dla ujemnych i elektronów  $10^7$  do  $10^8$  cm/sek. Podnosząc napięcie przyłożone do elektrod, stopniowo zwiększamy prędkość jonów,



Rys.45.

nie jest ona jednak zrazu dostatecznie duża, aby zapobiec łączeniu się ponownemu jonów tak, że nie wszystkie dostają się do elektrod. Prąd, jaki temu odpowiada jest proporcjonalny wprost do napięcia /Rys.45., prosta 0-a/, a odwrotnie do długości drogi.

Zwiększając dalej napięcie, zwiększa się prędkość, wszystkie wytworzone jony odprowadzane są do elektrod. Jeżeli jednak jonizacja jest stała, ilość jonów wytworzonych jest ciągle ta sama, prąd więc temu odpowiadający stały /a-b/; występuje stan nasycenia. Prąd nasycenia jonowego jest niezależny od napięcia, jest zaś proporcjonalny do odstępów elektrod. Natężenie pola nie jest jednakowe w całej przestrzeni między elektrodami. Z powodu większej ruchliwości jonów ujemnych przy anodzie znajduje się więcej tych jonów, a prawie całą przestrzeń między elektrodami wypełniają jony dodatnie. Przy elektrodach występują wtedy większe spadki napięcia, naprężenie przy anodzie się zmniejsza w porównaniu z przypadkiem b/, a przy katodzie powiększa, co ułatwia dalszy proces jonizacji /Rys.44c/.

Prąd odpowiadający strefie natężenia 0-b /Rys.45./ jest prądem ciemnym, zjawisko takiego wyładowania nazywamy wyładowaniem ciemnym, w przeciwieństwie do innych form wyładowania, przy których występują zjawiska świetlne. Prąd ciemny może istnieć tylko przy zjonizowanym gazie. Musi więc zachodzić stałe jonizowanie gazu przez czynniki obce, aby utrzymać taki prąd. Stan nasycenia osiąga się już przy naprężeniach normalnie zachodzących w technice i to w czasie bardzo ~~krótkim~~. Przy odstępach parocentymetrowych, przy kilkudziesięciu do kilkuset woltach występuje prąd rzędu  $10^{-4}$   $\mu$  A. Wyładowanie tego rodzaju, które może nastąpić tylko przy zjonizowaniu gazu czynnikami zewnętrznymi, nazywa się niesamodzielne.

Przy dalszym podnoszeniu napięcia prąd zaczyna wzrastać /Rys.45. punkt b/. Wywołane to jest dodatkowym wytworzeniem jonów przez jonizację bodźczą. Jony ujemne nabierają prędkości większej, a przez to i większej energii kinetycznej i uderzając o niezjonizowaną cząsteczkę, odry-



wają z niej elektron i tworzą z niej w ten sposób jon dodatni. Elektron czepia się innej cząsteczki i tworzy jon ujemny. W ten sposób liczba jonów się powiększa, a przez to i prąd. Początkowo czynią to elektrony i ruchliwsze jony ujemne, dopiero później, przy podnoszeniu napięcia, następuje jonizacja bodźczą jonów dodatnich.

Zjawisko powyższe jest jednak jeszcze ciągle niesamodzielne; ustaże, jeżeli dopływ jonów z zewnętrznej przyczyny ustanie. Jak długo występuje jonizacja tylko jednego znaku, odpowiednie jony /ujemne/ tworzą się lawinowo, lecz przebieg zanika, bo niema odpowiedniego zjawiska w drugą stronę skierowanego. Pozatem jony uderzające o siebie tracą na prędkości, nowo utworzone jony muszą na nowo doznać przyspieszenia. Dopiero, gdy<sup>i</sup> jony dodatnie zaczną jonizować, zjawisko przybiera formę lawinowego potęgownia jonizacji. Wtedy po przekroczeniu pewnej określonej wartości natężenia pola /naogół w praktyce ok. 30 kV/cm./ nie potrzeba już zewnętrznego jonizowania, zjawisko wyładowania utrzymuje się samo, jest przeto samodzielne.

Wyładowanie samodzielne jest związane zawsze ze zjawiskami świetlnymi. Chwila jego występowania zależy nie tylko od natężenia pola, lecz i od odstępu elektrod. Do wywołania tego wyładowania wystarczy obecność kilku jonów; jonizacja bodźczą, potęgując się lawinowo, sprowadzi ostateczne wyładowanie.

Nas obchodzą głównie trzaski zjawiska przepływu samodzielnego. Możemy je podzielić na dwie grupy zależnie od tego, czy przepływ zachodzi wyłącznie w polu elektrostatycznym, czy w polu z ładunkami przestrzennymi.

W polu wyłącznie elektrostatycznym wartości i rozkład natężenia pola między elektrodami są wyznaczone tylko przez ładunki elektrostatyczne powierzchni elektrod; w polu elektrycznym w przestrzeni, przez którą przepływa znaczny prąd, ładunki przezeń przenoszone powodują inny rozkład natężenia pola, niż w przypadkach bez przepływu prądu, gdyż wtedy w poszczególnych obszarach pola zwykle przeważają ładunki jednego

znaku.

Do wyładowania w polu elektrostatycznym należy wyładowanie bezpośrednie, występujące bez żadnych form przejściowych w postaci iskry lub łuku świetlnego między elektrodami, jako wyładowanie zupełne, przy napięciu ściśle określonym, skoro tylko naprężenie przekroczy wartość krytyczną dla danego układu. Obliczenie napięcia, przy którym następuje wyładowanie, odbywa się na podstawie prostych praw pola elektrostatycznego.

Wyładowaniami, przy których ładunki przestrzenne odgrywają dużą rolę, są:

wyładowanie świetlące w postaci warstwy świecącej na elektrodach, bez oznak głosowych;

wyładowanie snopiące w postaci snopu słabych iskier wyskakujących z warstwy świecącej na elektrodzie, z towarzyszeniem trzasków i syczeń;

wyładowanie iskrowe w postaci iskier przeskakujących z trzaskiem między elektrodami, jako następstwo tamtych;

wyładowanie łukowe w postaci łuku świetlnego, huczącego, który zastępuje iskrę, o ile źródło energii zasilające elektrody jest dostatecznie duże.

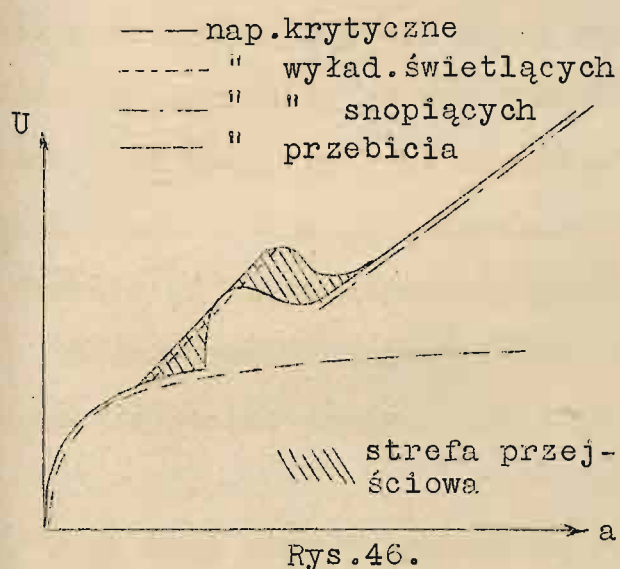
Wyładowania świetlące i snopiące nazywają się wyładowaniami niezupełnymi, ponieważ przy nich nie dochodzi jeszcze do zupełnego wyładowania między elektrodami.

Forma, jaką przybierze wyładowanie, zależy od warunków geometrycznych układu, stanu atmosferycznego, materiału elektrod, rodzaju źródła prądu i t.d.

Wyładowanie zupełne może nastąpić albo odrazu, bezpośrednio, jako pierwsza forma wyładowania, lub też jako następstwo wyładowań niezupełnych. Właściwie jednak można uważać, że przejście od wyładowań niezupełnych do zupełnego może się odbyć tak prędko, że praktycznie tego nie zauważamy. Przy wyładowaniu bezpośrednim /iskrowem lub łukowem/ ładunki przestrzenne muszą się zawsze zjawiać, lecz dzieje się to tak krótko, że można ich nie uwzględniać przy praktycznym obliczaniu układów.



W niektórych razach mogą te postacie wyładowań zjawiać się kolejno, w miarę wzrostu napięcia. Np. przy małych elektrodach kulowych i dostatecznie dużym odstępie, zobaczymy przy pewnym napięciu wyładowanie świetlące, które przejdzie przy zwiększaniu napięcia w snopiące, a wreszcie w iskrowe lub, gdy źródło prądu jest dostatecznie zasobne, w łukowe /Rys. 46/. W innych razach znowu, np. przy elektrodach o dużym promieniu krzywizny i przy niewielkim odstępie zjawiają się odrazu wyładowania



iskrowe, wzgl. łukowe, bez innych postaci poprzedzających.

Napięcie, przy którym występuje pierwszy objaw wyładowania, nazywa się napięciem krytycznym. Może ono wpadać w napięcie przebicia, przy którym następuje wyładowanie zupełne czyli przebicie, lub też poprzedzać je, a załam wpadać w napięcie świetl-

nia, lub napięciom snopienia. Napięcie krytyczne warunkuje często wytrzymałość układu, jakkolwiek przy niem do przebicia zupełnego może jeszcze nie dojść. W niektórych jednak razach układy mogą pracować, przynajmniej przejściowo, podczas wyładowań świetlących, a nawet snopiących, bez widocznego uszczerbku dla ich wytrzymałości /zjawisko ulotu elektrycznego przewodów napowietrznych/. Normalnie jednak, o ile te wyładowania mogą nadpsuć izolację układu, nie należy do nich dopuszczać.

Ponieważ natężenie pola elektrycznego wywołuje tę siłę, która działa na cząstki znajdujące się w gazie i posiadające ładunek elektryczny, a przez to powoduje przeniesienie ładunku elektrycznego /prąd elektryczny/, zatem rozkład i wartość natężenia pola /inaczej elektrycznego naprężenia powietrza/ muszą grać wielką rolę przy powstawaniu wyładowań. Charakterystyczną wielkością pola elektrycznego jest jego największe natężenie. Występuje ono z reguły przy powierzchni jednej z elektrod. Największe natężenie pola elektrycznego w chwili wyładowania nazywamy

natężeniem krytycznym, lub naprężeniem krytycznym i oznaczamy przez  $K_0$ .

Z danych doświadczalnych wynika, że przy napięciu zmiennem iskiernik pomiarowy reaguje, przy podnoszeniu napięcia na wartość maksymalną krzywej napięcia. Dlatego znaczenie fizyczne posiada  $U_0$  i  $K_0$  podane w wartościach maksymalnych  $/kV_{max}$ , względnie  $kV_{max}/cm$  /. Podając  $U_0$  w wartościach skutecznych, należy podać współczynnik amplitudy krzywej napięcia.

Doświadczenie wykazało, że przy tym samym odstępnie elektrod napięcia krytyczne dla różnych rodzajów elektrod nie są jednakowe. Zależność napięcia krytycznego  $/U_0/$  od odstępnie elektrod  $/a_0/$  ujmujemy za pomocą charakterystyk  $U_0 = f/a$ /. Wykreślając zależności  $K_0 = f/a$  dla różnych układów elektrod, otrzymujemy drugi rodzaj charakterystyk. Te właśnie charakterystyki stanowią punkt wyjścia dla rozważań teoretycznych i dlatego są równie ważne, jak krzywe  $U_0 = f/a$ /, mające znaczenie bezpośrednio praktyczne.

Ażeby nie dopuścić do wyładowań w powietrzu, trzeba znać jego wytrzymałość, a właściwie wytrzymałość układu, w którym powietrze gra dużą rolę jako materiał izolacyjny. Kwestja wytrzymałości elektrycznej powietrza jako materiału interesuje nas mniej, jest to rzecz raczej fizyki. Zresztą, jak zobaczymy później, przy wyznaczaniu jej jesteśmy związani geometrycznymi wielkościami układu pomiarowego, od których wytrzymałość takiego układu powietrznego zależy w bardzo dużym stopniu. Wytrzymałość powietrza, którą określa się zwykle liczbą woltów przypadających na cm. grubości  $/a/$  warstwy powietrza, znajdującej się między elektrodami, pomiędzy którymi występuje napięcie krytyczne  $/U_0/$ , nie jest wielkością stałą, gdyż właśnie to napięcie krytyczne zmienia się zależnie od kształtu elektrod i innych wpływów postronnych. Naprężenie krytyczne  $/K_0/$ , miarodajne dla wytrzymałości powietrza, również jak poznaliśmy, zależy od tych warunków. Wytrzymałość powietrza, jako takiego, nie jest zatem wielkością, którąby można było wyrazić, jako stałą mater<sup>a</sup>jku. Mówiąc przeto o wytrzymałości powietrza, musimy zawsze zaznaczyć, do jakiego



układu ona się odnosi, albo też zgodzić się z góry na pewien układ pomiarowy o elektrodach określonego kształtu i określonej odległości. Mówiąc zaś o wytrzymałości układu izolacyjnego, np. kabla, izolatora i t.d., wystarczy zazwyczaj podanie wartości napięcia krytycznego.

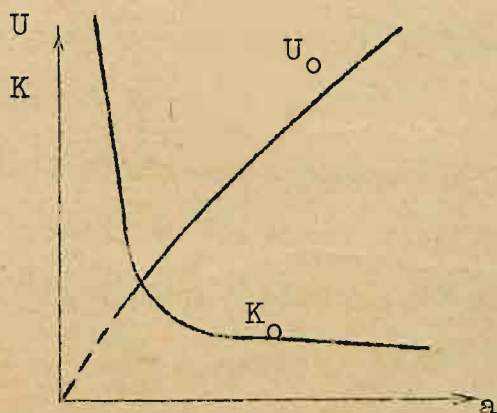
Przy badaniu wytrzymałości powietrza posługujemy się układami możliwie prostymi, w postaci elektrod odizolowanych od siebie powietrzem, z których każda połączona jest metalicznie z innym biegunem wysokiego napięcia. Dla danego kształtu elektrod, danego ciśnienia atmosferycznego i danej temperatury otoczenia, każdej odległości elektrod odpowiada wartość różnicy potencjałów między elektrodami określona jednoznacznie. Mając tę wartość napięcia, można na podstawie prostych zależności obliczyć odpowiadające temu naprężenie, a przeto i wytrzymałość danego układu.

Na tej podstawie można również mierzyć napięcie, znając zależność funkcyjną napięcia krytycznego od odstępów elektrod. Na tem polegają iskierniki pomiarowe, jako przyrządy do pomiaru wysokiego napięcia. Są to układy izolacyjne wysokiego napięcia szczególnie ważnego znaczenia. Zajmiemy się nimi zatem bliżej.

Z różnych możliwych typów najważniejsze są iskierniki: płytowy, kulowy, walcowy i ostrzowy, które są reprezentantami układów: płaskiego, kulistego, walcowego i ostrzowego.

## 2. NAPRĘŻENIA KRYTYCZNE UKŁADÓW PODSTAWOWYCH.

### a/ Układ o elektrodach płaskich.



Rys. 47.

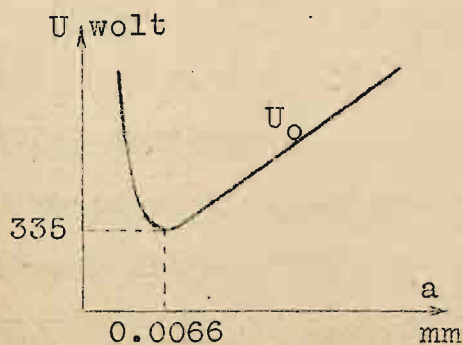
Typowym takim układem jest iskiernik płytowy /por. Rys. 4/. Elektrody płaskie, równoległe do siebie ułożone, stanowią kondensator płaski powietrzny, w którego środku panuje pole jednostajne, a zatem występuje tam naprężenie jednakowe w każdym punkcie:  $K = \frac{U}{a}$ , jeżeli  $U$  oznacza napięcie przyłożone do elektrod, a  $a$  ich odstęp.

Napężenie krytyczne takiego układu jest przeto:

$$K_0 = \frac{U_0}{a} \quad /1./$$

Znając więc napięcie krytyczne  $U_0$  dla odstępu  $a$ , można zawsze obliczyć  $K_0$  według powyższego wzoru. Nie będzie to jednak wartością krytyczną dla powietrza, napężenie krytyczne bowiem nie jest w takim układzie wielkością stałą, lecz zależy także od odstępu elektrod. Przebieg napężenia krytycznego  $K_0$  w V/cm. w zależności od odstępu elektrod płaskich w cm. przedstawia Rys. 47. Widać z tego, jak napężenie krytyczne, a więc niejako wytrzymałość powietrza, maleje z rosnącą odległością, czego się zresztą można było spodziewać na podstawie teorii jonizacyjnej wyładowań.

Krzywa  $U_0 = f/a$  dla iskiernika płytowego w powietrzu /Rys. 48./ wykazuje dla  $a = 0,0066$  mm. przy  $b = 760$  mm Hg i temperaturze pokojowej najmniejszą wartość napięcia krytycznego, około 335-350 woltów / $K_0 = \text{ok. } 500 \text{ kV/cm.}$ /. Dla odległości mniejszych od 0,0066 mm napięcie krytyczne jest większe od 335 V i rośnie w miarę zmniejszania odległości, przyczem katoda zaczyna brać udział w wyładowaniu. Małą wielkością odległości, przy której występuje minimum  $U_0$ , tłumaczy się to, że na wykresach  $U_0 = f/a$ , o dużym zakresie skali dla odstępu elektrod  $a$ , krzywa  $U_0 = f/a$  przechodzi pozornie przez zero /Rys. 48./. Minimum to leży, oczywiście, poza granicą stosowania praktycznych układów płaskich /iskierników pomiarowych/; zajmować się niem tutaj nie będziemy. Wartość 335-350 V odpowiada spadkowi katodowemu.



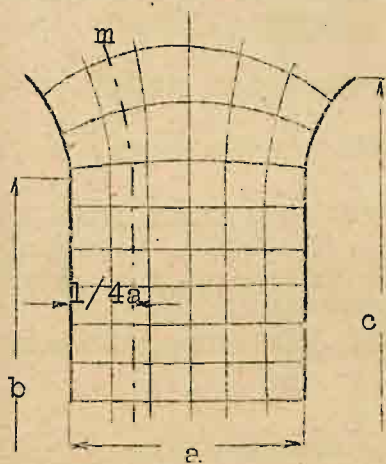
Rys. 48.

Przypadek idealny, jednostajnego pola elektrostycznego zachodzi przy elektrodach płaskich, nieskończenie rozległych. Zbliżyć się możemy do tego w części środkowej elektrod o wymiarach ograniczonych, jeśli brzoś ich są odpowiednio wygięte i część płaszczyzny, tworząca elektrodę, nie jest za mała /patrz niżej/. Największa odległość elektrod



dotąd zbadana wynosi  $14 \pm 15$  cm. W rzeczywistości nie mamy do czynienia z polem jednostajnym w całym dielektryku, lecz natężenie pola przy elektrodach jest nieco większe, niż<sup>w</sup> pośrodku między niemi, a to skutkiem wpływu ładunków elektrod.

Przy praktycznym wykonaniu iskiernika płytowego wpływ krawędzi elektrod jest szczególnie ważny. Na nich występują naprężenia znacznie większe, niż w pośrodku iskiernika, jak to jest widoczne z obrazu pola kondensatora płaskiego /Rys.49./. Wyładowanie występuje tam wcześniej, niż w pośrodku. Warunkiem przeto niezbędnym jest, aby zakrzywienie krawędzi okładzin było tego rodzaju, żeby wyładowanie na nich występowało przy wyższym napięciu, niż w pośrodku. Można to osiągnąć, dając to zakrzywienie według jednej z powierzchni ekwipotencjalnych. Obraz tego pola nie zmieni się, jeżeli wzdłuż jednej z powierzchni ekwipotencjalnych poprowadzimy powierzchnię metalową. Wypada to mniej więcej dla po-



Rys.49.

wierzchni  $m$ , przebiegającej w odstępie  $\frac{1}{4}a$  od okładzin  $k$ .

Ażby uniknąć wpływu ładunków zewnętrznych na rozkład pola w iskierniku, nie może być średnica elektrod za mała w stosunku do ich odstępów. Jako praktyczne dane można tu przyjąć w przybliżeniu przynajmniej :

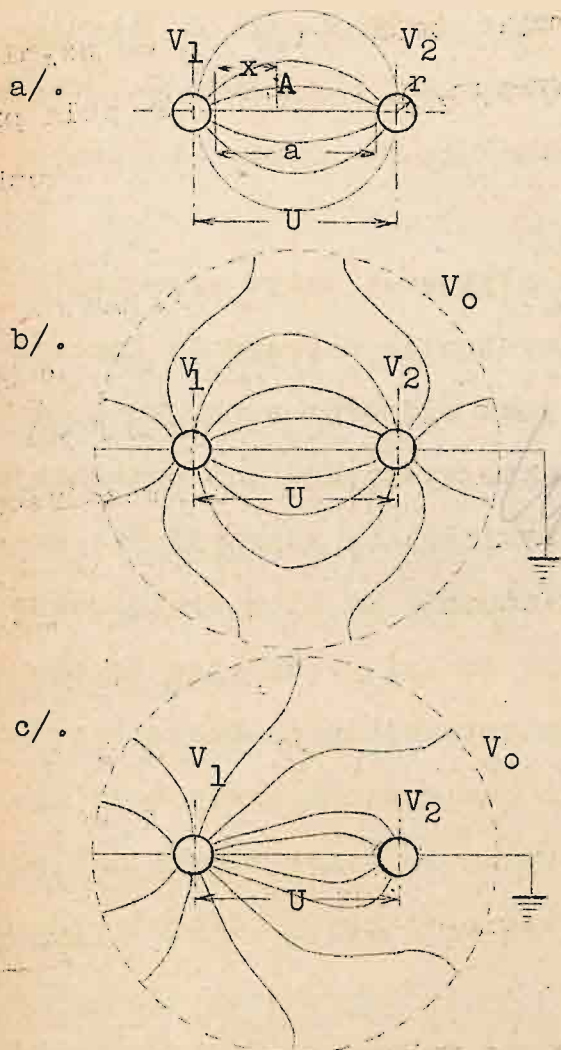
$$b = 2,5a, \text{ i } c = 4,5a. \text{ jeżeli } a \text{ jest odstępem}$$

części płaskich elektrod.

#### b/ Układ o elektrodach kulistych.

Typowym takim układem jest iskiernik kulowy /Rys.50./. Składa się on z 2 kul metalowych osadzonych mimośrodkowo i izolowanych od siebie. Pole takiego układu nie jest jednostajne. Obliczenie naprężeń w układzie jest nader skomplikowane z powodu wpływu ziemi, która występuje tu jako trzecia elektroda. Kule wykazują bowiem pewną pojemność nie tylko

Dokładne obliczenie tego zostało podane przez Rogowskiego /Arch.f.Elektrotechnik t.XII./



Rys.50.

tryczny względem obu kul. W przypadku jednej kuli uziemionej rozkład potencjałów, pojemności, ładunków, a przez to i pola jest niejednakowy; różnica potencjałów kul względem ziemi

$$V_1 - V_0 = V_1 - V_2 = U$$

Z tem związany jest niejednakowy rozkład naprężeń dla obu kul. Przy niesymetrycznym układzie występuje największe naprężenie na tej kuli, która wykazuje większe napięcie względem ziemi, a więc naizolowanej. Wielkości naprężeń nie można, jak łatwo z powyższego wywnioskować, obliczyć na podstawie prostej zależności, jak przy układach foremnych. Najczęściej posługujemy się wzorami gotowymi lub wykresami funkcyjnymi naprężeń wzgl. napięć i wymiarów geometrycznych układu.

Najczęściej używanymi wzorami empirycznymi są wzory F.W.Peeka dla iskiernika kulowego /i walcowego/ <sup>x/</sup>.

<sup>x/</sup>Do wzorów tych można mieć duże zaufanie ze względu na doskonałe wypo-

względem siebie, ale i względem ziemi, którą można zastąpić uziemioną kulą, otaczającą tamte w bardzo wielkiej odległości od nich. Na Rys.a/ przedstawione jest pole kul bez wpływu ziemi, na Rys.b/ przy uwzględnieniu tego wpływu, a na Rys.c/ kiedy jedna z kul jest uziemiona.

W razie symetrycznego układu kul, t.j.kiedy obie kule są pod taką samą różnicą potencjałów względem ziemi, mamy:

$$V_1 - V_2 = U$$

$$V_1 - V_0 = -V_2 - V_0 = 1/2 U$$

Wskutek tego wykazują one jednakową pojemność względem ziemi, przez co na obu kulach znajduje się taki sam ładunek i rozkład pola jest symetryczny.



Wzór Peeka dla iskiernika kulowego przy symetrycznym rozkładzie napięć opiera się na następujących danych:

dla bardzo małych  $x$  /Rys.50a/ naprężenie w punkcie A wynosi w przybliżeniu:

$$K_x = \frac{U}{r + 2x} \cdot \frac{r}{a} \cdot \beta,$$

gdzie  $U$  jest napięciem między kulami, a  $\beta$  współczynnikiem wyznaczonym analitycznie, zależnym tylko od stosunku  $a$  do  $r$ . Z pomiarów Peeka dla odstępów elektrod w granicach  $0,54\sqrt{r}$  do  $2r$  wynika, że naprężenie krytyczne układu, panujące przy powierzchni każdej z kul /dla  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $b = 760 \text{ mm Hg}$  / wynosi:

$$K_0 = g_0 / 1 + \frac{0,54}{\sqrt{r}} / 2/$$

z dokładnością do 2%, gdzie  $g_0 = 27,2 \text{ kV/cm /max./}$  dla kul o średnicy 6,25 do 100 cm jest wartością stałą w tych granicach. <sup>xx/</sup>

Z drugiej strony naprężenie krytyczne / na powierzchni elektrod/

$$K_0 = \frac{U_0}{r} \cdot \frac{r}{a} \cdot \beta = \frac{U_0}{a} \cdot \beta$$

Podstawiając do wyrżenia na  $g_0$  ze wzoru /2/, wyrażenie na  $K_0$  ze

wzoru ostatniego:

$$g_0 = \frac{U_0}{r + 0,54\sqrt{r}} \cdot \frac{r}{a} \cdot \beta$$

W odstępach  $x$  panuje naprężenie krytyczne

$$K_{x_0} = \frac{U_0}{r + 2x} \cdot \frac{r}{a} \cdot \beta$$

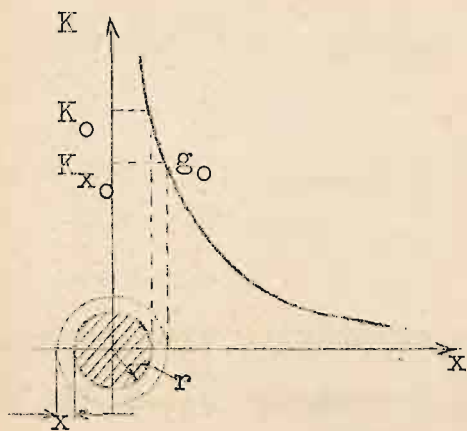
sażenie laboratoryjne Gen.El.Comp. w Pittsfield, w którym Peek dokonywał pomiarów, i na samą osobę ich autora. W ciągu ostatnich 2 lat sprawdzano kilkakrotnie w Europie słuszność formuły Peeka dla iskiernika kulowego. Wyniki tych sprawdzeń potwierdzają całkowicie słuszność tych wzorów. /Należy nadmienić, że wzory Peeka dotyczą jedynie naprężeń krytycznych o częstotliwości 60 okr./sek; są one jednak słuszne i dla częstotliwości 50 okr./sek.

<sup>xx/</sup> Zakres odległości  $0,54\sqrt{r}$  do  $2r$  odpowiada szerokiemu minimum krzywej  $K_0 = f/a$  przy  $r = \text{const.}$ , gdzie  $K_0$  jest stałe z dokładnością do 2%.

Widzimy, że będzie

$$g_0 = K_{x_0},$$

jeżeli  $0,54\sqrt{r} = 2x$ , czyli  $x = 0,27\sqrt{r}$ /Rys51/

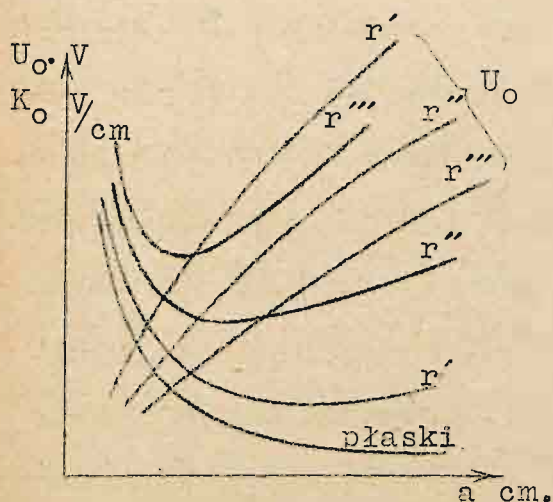


Rys.51.

Peek wyciąga stąd wniosek, że naprężenie  $g_0$  istnieje w chwili wystąpienia wyładowania samodzielnego w odległości  $x = 0,27\sqrt{r}$ . Gdy naprężenie ma wartość  $g_0$  na powierzchni kuli, wyładowanie samodzielne nie nastąpi. Dopiero gdy  $g_0$  istnieje w odległości  $0,27\sqrt{r}$  od kuli, wtedy na jej powierzchni panuje naprężenie  $K_0$ , większe od  $g_0$  /gdyż w przestrzeni między kulami największe naprężenie jest przy ich powierzchni /.

Rys.52. przedstawia charakterystyki iskiernika kulowego, zdjęte doświadczalnie dla różnych promieni kul  $r' > r'' > r'''$ . Dla porównania podano charakterystykę iskiernika płaskiego.

Dla iskiernika kulowego, gdy napięcia obu kul, względem ziemi są jednakowe co do wielkości, największe natężenie pola elektrycznego panuje przy powierzchni każdej z kul, najmniejsze w środku między kulami. Każda z kul posiada zatem swą warstwę jonizacyjną. Dla odległości kul większej od grubości dwóch warstw jonizacyjnych natężenie pola powinno być stałe z dokładnością do 1%. Tymczasem krzywe  $K_0 = f/a$  przy  $r = \text{const}$  doświadczalnie wyznaczone, osiągają przy wzroście odległości a minimum,



Rys.52.

a później nieco wznoszą się do góry. Wzrost powyższy tłumaczmy sobie zmianą rozkładu pola elektrycznego między kulami, skutkiem wpływów przedmiotów otaczających iskiernik, które mogą grać rolę dodatkowych elektrod, a zwłaszcza wpływów doprowadzeń do kuli. Doprowadzenia te, przy większych odstępach kul  $/a/$ , jak zresztą doświadczalnie wykaza- no/Peek/, pozornie zwiększają  $K_0$ , o ile przy

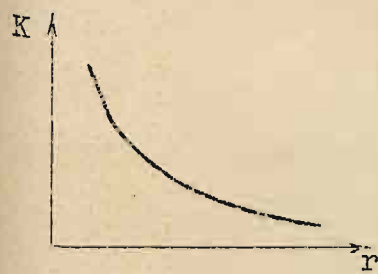


obliczeniu rozkładu pola nie uwzględni się ich wpływu.

Używając współczynnika  $\beta$ , obliczonego analitycznie dla iskiernika kulowego, gdy jedna z kul jest uziemiona /układ niesymetryczny/, nie otrzymamy szerokiego minimum krzywej  $K_0 = f/a/$  przy  $r = \text{const.}$ , o stałej /z dokładnością do 2%/ wartości  $K_0$ , lecz minimum wyraźne, po którym następuje silny wzrost  $K_0$ . Wzrost ten, nieoczekiwany z punktu widzenia teoretycznego, jest spowodowany wpływami obcemi na rozkład pola /doprowadzenia/. Peek wprowadza tu inny współczynnik  $\beta'$  i zakłada, że współczynnik ten musi być taki, aby i tutaj otrzymać owo szerokie  $/0,54\sqrt{r} \pm 2r/$  minimum krzywej  $K_0 = f/a/$ ; współczynnik ten znajduje Peek doświadczalnie i otrzymuje, że jest on funkcją tylko  $\frac{a}{r}$ , przytem  $\beta' > \beta$ . Tablicę współczynników  $\beta$  i  $\beta'$  można znaleźć w jego pracy.<sup>2/</sup>

#### c/. Układ o elektrodach walcowych.

Do badania wytrzymałości powietrza nadaje się bardzo dobrze układ walcowy o elektrodach koncentrycznych /iskiernik walcowy /. Napięcie

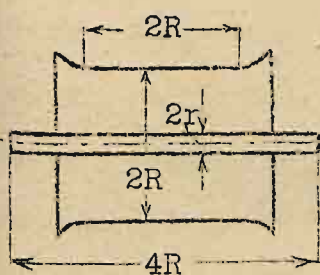


Rys. 53.

krytyczne takiego układu jest bowiem prawie dokładnie takie, jak wypada z obliczenia lub innych, ściślejszych pomiarów. Jest ono zależne od promieni obu elektrod:  $r$  - wewnętrznego i  $R$  - zewnętrznego walca i wyraża się znany wzorem

$$K_0 = \frac{U_0}{r \log_n \frac{R}{r}}$$

Napięcie krytyczne takiego układu jest w większym stopniu zależne od promienia walca wewnętrznego, niż zewnętrznego. Krzywą zależności



Rys. 54.

$K_0 = f/r/$  wypośrodkowaną z licznych pomiarów przy  $R = \text{const.}$  przedstawia Rys. 53. Przebieg ten jest prawie niezależny od  $R$ , a więc stosuje się do każdych wartości  $R$ .

Wpływy brzegów elektrod na rozkład natężenia pola w części środkowej iskiernika można bardzo

łatwo wyeliminować, jeśli długość walca zewnętrznego przyjmą równą przynajmniej  $2R$ , a wewnętrznego  $4R$ , przyczem brzegi walca zewnętrznego należy odpowiednio wygiąć, podobnie jak przy iskierniku płaskim /Rys.54/.

F.W.Peek ustalił wzór dla iskiernika walcowego i zbadał go w granicach promienia wewnętrznego  $0,06$  do  $1$  cm, temperatur  $-20^{\circ}$  do  $+140^{\circ}\text{C}$ , ciśnień  $300$  do  $1000$  mm Hg, częstotliwości  $45$  do  $90$  okr./sek.

W odległości  $x$  od walca wewnętrznego naprężenie

$$K_x = \frac{U}{r+x/\log_n \frac{R}{r}}$$

Z pomiarów Peeka przy temp.  $25^{\circ}\text{C}$  i ciśn. bar.  $760$  mm, dla  $a > 0,308\sqrt{r}$

$$K_0 = g'_0/1 + \frac{0,308}{\sqrt{r}}/, \quad /3/$$

gdzie  $g'_0 = 31$  kV/cm w wart. max.

Stąd 
$$g'_0 = \frac{K_0}{1 + \frac{0,308}{\sqrt{r}}}$$

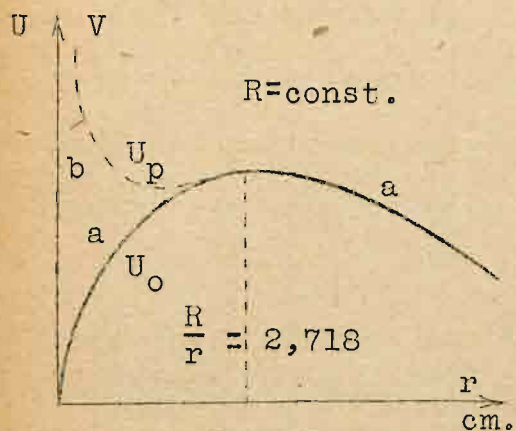
Ponieważ dla iskiernika walcowego  $K_0 = \frac{U_0}{r \log_n \frac{R}{r}}$ , przeto

$$g'_0 = \frac{U_0}{r + 0,308\sqrt{r}/\log_n \frac{R}{r}}$$

Widzimy, że  $g'_0 = K_x$ , jeżeli  $x = 0,308\sqrt{r}$

A zatem wyładowanie samodzielne powstanie, jeśli w odległości  $x = 0,308\sqrt{r}$  od walca wewnętrznego osiągniemy  $K_x = g'_0$ .

Charakterystyka napięciowa iskiernika walcowego  $U_0 = f(r)$ , przy stałym promieniu zewnętrznym  $R$ , a zmiennym wewnętrznym  $r$  posiada typowy przebieg, przedstawiony na Rys.55. Przy stosunku elektrod  $\frac{R}{r} > 3$ ,



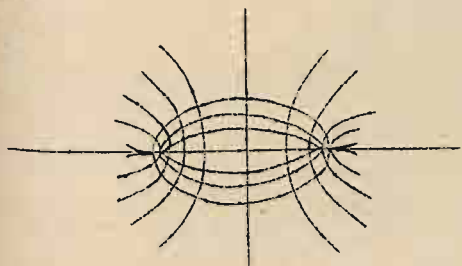
Rys.55.

występowanie napięcia krytycznego  $U_0$  można bardzo dokładnie uchwycić uchem jako krótki trzask, zapowiadający wyładowanie niezupełne. Podnosząc napięcie, osiągniemy wreszcie wyładowanie zupełne przy napięciu przeskoku  $U_p$  w postaci iskry. Przebieg napięcia krytycznego przedstawia krzywa a, napięcia przeskoku -krzywa b.



#### d/. Układ o elektrodach ostrzowych.

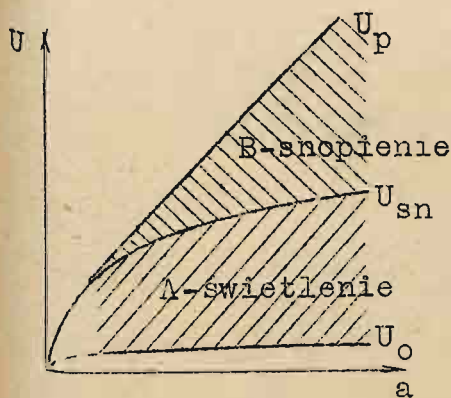
Najczęściej używanym układem takiego rodzaju jest iskiernik ostrzowy /Rys.56/. Rozkładu pola w takim układzie nie można obliczyć analitycznie. Naprężenie na końcu ostrza jest teoretycznie nieskończenie wielkie. To też i w rzeczywistości jest ono tam bardzo wielkie w porównaniu z resztą obszaru pola i zależy bardzo od rozwartości ostrza. Występuje tam prawie cały spadek napięcia tak, że w środku obszaru naprężenie jest stosunkowo bardzo słabe.



Rys.56.

Z powodu braku/prawie zupełnego/działania osłonowego elektrod wpływ obcych ładunków i doprowadzeń na rozkład pola jest bardzo duży. Będzie o tem mowa w następnym rozdziale.

Wyładowanie początkowe jest tylko dla bardzo małych odstępów elektrod i małych napięć odrazu zupełne; zwykle powstaje wyładowanie świeżące, potem snopiące, a wreszcie iskrowe.



Rys.57.

Charakterystykę iskiernika ostrzowego podaje Rys.57, na którym napięcie krytyczne  $/U_o/$  napięcie wyładowań snopiących  $/U_{sn}/$  i napięcie przebicia  $/U_p/$  są w funkcji odstępów  $a$ .

Przy wyładowaniu zaznacza się wpływ biegunowości elektrod; np. wyładowanie następuje przy napięciu niższym, gdy ostrze jest ujemne

względem płyty, a przy dodatniem przeciwnie.

Do pomiarów napięcia iskiernik ostrzowy naogół się nie nadaje.

### 3. WPLYW CZYNNIKÓW POSTRONNYCH NA NAPRĘŻENIE KRYTYCZNE

#### WYŁADOWAŃ BEZPOŚREDNICH .

Najważniejsze czynniki mogące, wpływać na wartość napięcia krytycznego, są: a/ kształt i wielkość elektrod oraz ich odstęp i wzajemne położenie; b/ skład chemiczny, ciśnienie i temperatura gazu izolującego /powietrze/; c/ rodzaj napięcia /stałe czy zmienne; małej czy dużej często-

tliwości; fale uskokowe /; d/ biegunowość elektrod; e/ jonizacja zewnętrzna przerwy iskrowej; f/ materiał elektrod.

a/ Wpływ kształtu<sup>i</sup> wielkości elektrod oraz ich odstępów i wzajemnego położenia był przedmiotem rozważań poprzednich /ust.2/. Warunkujące rozkład pola elektrycznego, który jest tu czynnikiem prawie decydującym. Inne czynniki, nie wynikające bezpośrednio z rozkładu pola, a więc postronne, wykazują ten wpływ bardzo znaczny. Nie można o nim zapominać przy wszelkiego rodzaju badaniach układów powietrznych.

b/ Gęstość powietrza. - Badania okazały, że napięcie krytyczne wyładowań bezpośrednich jest wprost proporcjonalne do ciśnienia barometrycznego i to niezależnie od wymiaru elektrod i ich odstępów. Jest ono natomiast odwrotnie proporcjonalne do temperatury bezwzględnej. Wobec tego istnieje proporcjonalność napięcia krytycznego do gęstości powietrza. Jest to zrozumiałe z punktu widzenia teorii jonizacyjnej wyładowań w gazach; z rosnącą gęstością gazu maleją swobodne drogi, przez które jony przebiegają, potrzebne jest przeto większe natężenie, aby wywołać większą prędkość jonów.

Jeżeli przyjmniemy gęstość powietrza przy 760 mm Hg i 20°C za jednostkę, to gęstość względna

$$\delta = \frac{b}{760} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} = \frac{0,386 \cdot b}{273 + t}$$

gdzie b jest ciśnieniem barometrycznym w mm słupa rtęci, a t temperaturą w stopniach Celsjusza. Wobec tego napięcie krytyczne / $U_n$ / w warunkach normalnych t.j. przy  $b = 760$  mm i  $t = 20^\circ$  / $\delta = 1$ /

$$U_n = \delta \cdot U_\delta = \frac{0,386 \cdot b}{273 + t} U_\delta \quad /4/$$

gdzie indeks  $\delta$  oznacza, że dana wielkość odnosi się do warunków chwilowych, t.j. do ciśnienia b i temperatury t, a więc warunków odpowiadających gęstości  $\delta$  powietrza.

Wpływ gęstości powietrza na właściwości iskierników kulowych i walcowych został szczegółowo zbadany przez F.W. Peeke /temperaturę otoczenia przyjmuje on 25°C, wyniki nie różnią się jednak, jeżeli przyjmniemy 20°C/.



Dla iskiernika kulowego w układzie symetrycznym zależność napięcia krytycznego  $K_0$  od gęstości powietrza według Peeka jest następująca:

$$K_0 = g_0 \delta / 1 + \frac{0,54}{\sqrt{r \cdot \delta}} \quad /5/$$

gdzie  $g_0 = 27,2$  kV/cm w wartościach maksymalnych.

Widać stąd, że, gdy przy powierzchni kuli panuje napięcie krytyczne  $K_0$ , to w odległości  $0,27 \sqrt{\frac{r}{\delta}}$  panuje napięcie  $g_0 \cdot \delta$ .

Przy obliczaniu napięcia krytycznego dla układu 2 kul mimośrodkowych o promieniu  $r$  i odstępie  $a$  w cm. posługiwać się więc można wzorem, wyprobowanym z powyższego, w postaci

$$U_{0\delta} = g_0 \cdot \delta / 1 + \frac{0,54}{\sqrt{r \cdot \delta}} \cdot \frac{a}{\beta} \quad \text{kV /max./} \quad /6a/$$

lub zamieniając promień  $r$  na średnicę  $D$

$$U_{0\delta} = g_0 \cdot \delta / 1 + \frac{0,757}{\sqrt{D \cdot \delta}} \cdot \frac{a}{\beta} \quad \text{kV /max./} \quad /6b/$$

Stosowanie tego wzoru jest niedogodne w praktyce, dlatego prawie wyłącznie posługujemy się tablicami lub wykresami, przedstawiającymi zależność napięcia krytycznego  $U_{0n}$  w warunkach normalnych i w wartościach maksymalnych w funkcji odstępu  $a$  elektrod. Aby otrzymać wartość mierzonego napięcia w warunkach chwilowych  $U_{0\delta}$ , trzeba znać stosunek

$$\frac{U_{0\delta}}{U_{0n}} = k$$

gdzie  $k$  jest współczynnikiem, uwzględniającym gęstość powietrza i średnicę kul. Znając  $g_0$ , mamy zmierzone napięcie, które spowodowało prześkok iskry przy danym odstępie kul.

$$U_{0\delta} = k \cdot U_{0n}$$

gdzie  $U_{0n}$  otrzymujemy z tablic.

Łatwo sprawdzić, że

$$k = \frac{U_{0\delta}}{U_{0n}} = \frac{g_0 \delta / 1 + \frac{0,54}{\sqrt{\delta \cdot r}}}{g_0 / 1 + \frac{0,54}{\sqrt{r}}} = \delta \cdot \frac{1 + \frac{0,54}{\sqrt{\delta \cdot r}}}{1 + \frac{0,54}{\sqrt{r}}}$$

Gdy wymagana jest mniejsza dokładność, można dla  $\delta$  mało różniącego się od 1 założyć  $k = \delta$ .

Dla iskiernika walcowego znalazł Peek zależność:

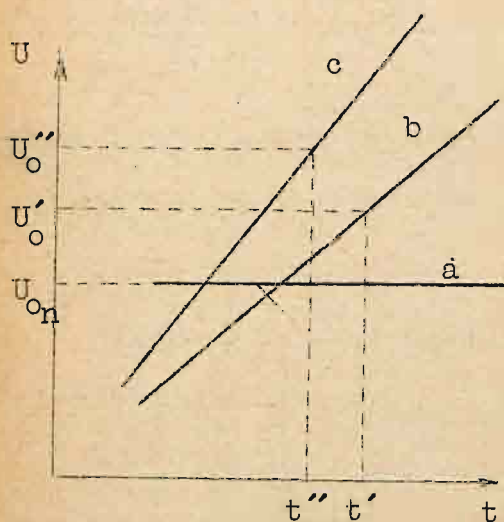
$$K_0 = g'_0 \delta / 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta \cdot r}} /, \quad /7/$$

gdzie jak poprzednio  $g'_0 = 31 \text{ kV/cm}$  w wartościach maksymalnych. Wyładowanie samodzielne powstanie, jeżeli w odległości  $x = 0,308 \sqrt{\frac{r}{\delta}}$  od walca wewnętrznego naprężenie osiągnie wartość  $K_0 = g'_0 \cdot \delta$ .

Interpretując wyniki otrzymane dla iskiernika kulowego i walcowego / a także dla dwóch walców równoległych/, Peek dochodzi do twierdzenia, że wyładowanie samodzielne w tych układach następuje zawsze, o ile na granicy warstwy jonizacyjnej

$$g_0 = K_x = 30 \text{ kV/cm przy } \delta = 1 \text{ /w wart. max./}$$

c/ Czas trwania naprężenia. - Do wytworzenia się zjawiska wyładowania potrzebny jest pewien czas; wobec tego czas trwania naprężenia; a więc czas przyłożenia napięcia do układu, musi mieć wpływ na wysokość naprężenia krytycznego układu. W stanie ustalonym, t.j. przy naprężeniach długotrwałych w stosunku do zjawisk jonizacyjnych, zmiana napięcia w czasie nie wpływa na charakterystykę wyładowania. Natomiast w stanie nieustalonym przy szybkich zmianach napięcia przyłożonego, napięcie krytyczne naogół rośnie w stosunku do stanu ustalonego. Występuje skutkiem tego opóźnienie wyładowania.



Rys. 58.  
przy napięciu  $U'_0 > U_{0n}$  dajmy na to po czasie  $t'$ . Jeżeli zaś napięcie jeszcze szybciej się **podnosi** /krzywa c/, to wyładowanie nastąpi przy napięciu jeszcze większym,  $U''_0 > U'_0 > U_{0n}$ , a po czasie  $t''$  krótszym  $t'' < t'$ .  
Zjawisko to można zaobserwować już przy czasach mniejszych, niż  $\frac{1}{100} \text{ sek}$ .



występuje jednak wyraźnie i wpływa na pomiar znacznie przy czasach rzędu mikrosekund, głównie przy zjawiskach fal uskokowych /np. przy wyładowaniach atmosferycznych/. Dla pracy i przy badaniu izolatorów zjawisko to ma szczególne znaczenie.

Stosunek napięć  $\frac{U_0}{U_{0n}}$  wzgl.  $\frac{U_0''}{U_{0n}}$  i t.d. nazywa się spółczynnikiem impulsu. Jest on zależny od kształtu elektrod; przy ostrzach jest duży, przy kulach i płytach jest mały. Według Peeka wynosi on przy ostrzach 2,25; przy kulach, przy czasach trwania naprężenia rzędu mikrosekundy jest nieco większy, niż 1.

Wpływ częstotliwości inaczej się przejawia, niż wpływ fal uskokowych. Zmiana częstotliwości w granicach  $10^4$  okr./sek. nie wpływa na wysokość napięcia krytycznego. Przy częstotliwościach większych następuje obniżenie się tego napięcia o kilkanaście %. Tłumaczymy to nagromadzeniem się ładunków przestrzennych między elektrodami, które nie mogą podążać w czasie półokresu za zmianami napięcia i oscylują w zmiennym polu elektrod. Przy częstotliwościach większych ponad  $10^6$  okr./sok. następuje znowu wzrost napięcia krytycznego. Występują wtedy zjawiska podobne, jak przy falach uskokowych; przy tak krótkotrwałych naprężeniach w ciągu zmiany napięcia od zera do wartości maksymalnej, daje się odczuć wpływ ograniczonej ruchliwości jonów.

d/ Wpływ biegunowości. - Biegunowość elektrod, t.j. która z elektrod jest w danej chwili połączona z biegunem + czy - źródła prądu, ma wpływ na wysokość napięcia krytycznego, jeśli idzie o elektrodę bardzo małą, o bardzo dużej krzywiznie /np. ostrze lub cienki pręt/ w połączeniu z elektrodą o małej krzywiznie /np. płaszczyzna lub walec o dużym promieniu, koncentryczny z prętem/. Przy napięciu stałym w czasie otrzymamy inne  $U_0$ , gdy elektroda o małej krzywiznie jest katodą, a inne anodą. Zjawisko to leży jednak poza granicą stosowania iskierników pomiarowych; jest o niem mowa w Rozdź.IV.

e/ Czynniki joniżujące przerwę iskrową mają powien wpływ na wartość napięcia krytycznego. Stwierdzono mianowicie, że jeśli działanie ich

jest dostatecznie silne, to przy małych odległościach elektrod zmniejszają  $U_0$  o kilka do kilkunastu %, dzięki wpływowi na rozkład natężenia pola elektrycznego dużych ilości ładunków przestrzennych. Powyżej kilkudziesięciu tysięcy okr./sek. zwiększanie częstotliwości nie wpływa prawie na zmniejszenie napięcia przeskoku, które początkowo maleje ze wzrostem częstotliwości. Sprawa ta nie jest jeszcze należycie wyjaśniona.

f/ Materiał i stan elektrod. - W zakresie gęstości powietrza i odległości elektrod, spotykanych przy pomiarze wysokiego napięcia, materiał elektrod nie ma wpływu na wartość  $U_0$ , natomiast duży wpływ może wywierać kurz, osiadający na elektrodach, obniżając  $U_0$ . Np. Roth dla kul  $2r = 50$  cm,  $a = 10$  cm.,  $f = 50$  okr./sek., znajduje przy elektrodach specjalnie zakurzonych  $U_0 = 50$  kV, przy średnio zakurzonych 100 kV, a po starannym ich odkurzeniu 200 kV. Jak widać, przy bardzo wielkim zakurzeniu elektrod zostaje osiągnięta wartość  $U_0$  taka, jak dla ostrzy przy  $a = 10$  cm.

Stan powierzchni elektrod /dobrze lub źle wypolerowane/ nie ma większego wpływu na  $U_0$  przy 50 okr./sek., natomiast przy dużych częstotliwościach, przy źle wypolerowanych elektrodach otrzymujemy  $U_0$  niższe, niż przy 50 okr./sek.

---