

stwowym), najczęściej pole jest skrzywione, przeważnie na krawędziach elektrod. Tam powstają nadmierne skupienia pola i wyładowania wczesne, które powodują wytwarzanie swobodnych jonów; są to właśnie wyładowania krawędziowe.

Powstające tu jony przebiegają drogę według kierunku pola elektrycznego. Jeżeli ośrodek jest jednolity, wyładowania powinny iść według prostych; zwykle powierzchnia izolatora i jej najbliższe otoczenie nie jest jednolite, są pory, występy i t. p. tak, że droga wyładowań zmienia się rozmaicie.

Wyładowania krawędziowe występują szczególnie wyraźnie przy dużej różnicy w wartości stałych dielektrycznych izolatora i powietrza otaczającego. Na krawędzi elektrody, np. przy okładzinach kondensatora, znajduje się zawsze warstewka powietrza, zwłaszcza gdy okładzina odstaje od dielektryku, gdyż w taką szczelinę wstępuje powietrze (o stałej dielektrycznej mniejszej).

Przez to wytrzymałość dielektryku jest mniejsza na krawędziach okładzin, niż zdala od nich, gdyż skutkiem tych wyładowań następuje nierównomierne lokalne nagrzewanie się dielektryku, osłabiając go i sprowadzając wreszcie przebicie. Intensywność występowania tego zjawiska można zmniejszyć przez zastosowanie izolatora o mniejszej stałej dielektrycznej. Na tej zasadzie opiera się budowa nowoczesnych izolatorów przepustowych i wsporczych.

Szkodliwy wpływ wyładowań krawędziowych na wytrzymałość izolatora stwierdzony został dla szkła w 1904 r. przez prof. I. Mościckiego¹⁾, który, celem zwiększenia wytrzymałości kondensatorów szklanych, zgrubił miejsca, dotykające krawędzi okładzin i otrzymał w ten sposób techniczne kondensatory w postaci walcowej, wytrzymujące do 60 kV.

Powstawaniu wyładowań ślizgowych sprzyja zanieczyszczenie powierzchni. Nawet słabo przewodząca (zanieczyszczona) powierzchnia izolatora bierze bowiem udział w rozdziale napięcia na izolatorze, jak to poznamy w rozdziale o izolatorach przepustowych.

2. Wytrzymałość powietrza.

Wytrzymałość powietrza, — którą określa się zwykle liczbą woltów, przypadających na centymetr grubości (a) warstwy powietrza, znajdującej się między elektrodami, pomiędzy którymi występuje napię-

¹⁾ E. T. Z.—1904 str. 527.

cie krytyczne (V_0), — nie jest wielkością stałą, gdyż właśnie to napięcie krytyczne zmienia się zależnie od kształtu elektrod i innych wpływów postronnych. Naprężenie krytyczne F_0 , miarodajne dla wytrzymałości powietrza, również — jak poznaliśmy — zależy od tych warunków. O ile zatem $\frac{V_0}{a}$ określi dostatecznie wytrzymałość danego układu o powietrznym dielektryku, o tyle, aby z góry można było podać wartość napięcia krytycznego, trzeba znać $V_0 = f(a)$ dla danego układu. W niektórych przypadkach można oprzeć się na podstawie wzorów doświadczalnych.

Wytrzymałość powietrza, jako takiego, nie jest zatem wielkością, którąby można było wyrazić, jaką stałą materiału. Mówiąc przeto o wytrzymałości powietrza, musimy zawsze zaznaczyć, do jakiego układu ona się odnosi, albo też zgodzić się z góry na pewien układ, o elektrodach określonego kształtu i określonej odległości.

Przy pomiarach wytrzymałości powietrza (względnie przy pomiarach napięcia krytycznego) używa się iskierników płaskich, walcowych lub kulistych; stanowią one charakterystyczne układy powietrzne.

Układ o elektrodach płaskich. — 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: $F = \frac{V}{a}$, jeżeli V oznacza napięcie przyłożone do elektrod, a a ich odstęp. (Ściśle biorąc, naprężenie tuż przy powierzchni elektrody jest nieco większe, niż zdała od niej, a to wskutek specjalnego wpływu elektrod).

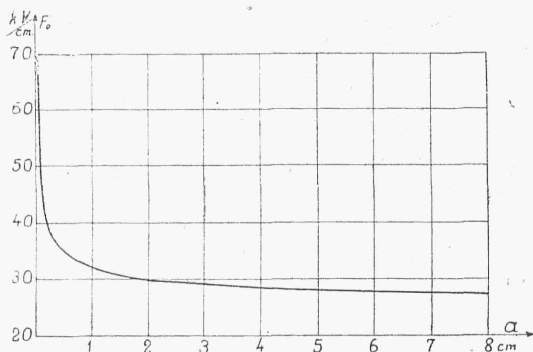
Naprężenie krytyczne takiego układu jest przeto:

$$F_0 = \frac{V_0}{a} \quad (1)$$

Znając więc napięcie krytyczne V_0 dla odstepu a , można zawsze obliczyć F_0 według powyższego wzoru. Naprężenie krytyczne nie jest jednak wielkością stałą, — zależy bowiem także od odstepu elektrod.

Przebieg naprężenia krytycznego F_0 w V/cm w zależności od odstepu elektrod płaskich w cm przedstawia Rys. 12. Widać z tego, jak naprężenie krytyczne, a więc wytrzymałość powietrza, maleje z rosnącą odległością, czego zresztą można było się spodziewać na podstawie teorii jonizacyjnej wyłado-

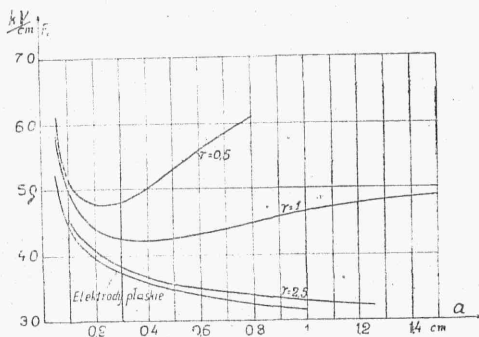
wań w powietrzu. Krzywa $F_0=f(a)$ dąży — jak się zdaje — asymptotycznie do równoległej do osi odciętych; doświadczalnie nie doszło się jeszcze powyżej 12 cm odstępów elektrod¹⁾. Wytrzymałość powietrza zmniejsza się zatem w miarę wzrostu grubości



Rys. 12.

jego warstwy między elektrodami płaskimi. N. p. dla grubości 1 cm wynosi ona około 31 kV/cm, powyżej 12 cm — ok. 26 kV/cm (w wartościach maksymalnych).

Układ o elektrodach kulistych. — Elektrody kuliste, pomiędzy którymi panuje napięcie V , wytwarzają pole niejednostajne, zależne od wielkości tych elektrod i od ich odstępów. Przy małych promieniach r kul i małych odstępach a napężenie krytyczne osiąga bardzo duże wartości (Rys. 13), na-



Rys. 13.

stępnie z rosnącym odstępem maleje i osiąga minimum, a później znów zaczyna rosnąć. Przy dużych promieniach przebieg jest podobny, jak dla elektrod płaskich.

¹⁾ W. O. Schumann—Arch. f. E. 1922.

Zależność naprężenia krytycznego od promieni kul r w cm i odstepu a w cm da się wyrazić według F. W. P e e k a znany m wzorem:

$$F_0 = \beta \frac{V_0}{a}, \text{ wzgl. } F_0 = \beta_0 \frac{V_0}{a} \quad (2)$$

gdzie V_0 jest napięciem krytycznym w wartościach skutecznych, a β i β_0 są współczynnikami, zależnymi od promieni kul i ich odstepu; β_0 stosuje się do przypadku, kiedy jedna kula jest uziemiona, a β , kiedy obie są izolowane.

Spółczynniki β i β_0 są znalezione doświadczalnie i podane w tablicach w zależności od stosunku $\frac{a}{r}$.

N.p. w granicach $\frac{a}{r} = 0,1 \div 4$ $\beta = 1,034 \div 2,686$
a $\beta_0 = 1,035 \div 3,20$.

Dla a , zawartego w granicach między $0,54 \sqrt{r}$ a $2 r$, mamy:

$$F_0 = 19,3 \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{\delta r}} \right) \text{ kV/cm.} \quad (3)$$

gdzie δ jest członem korekcyjnym ze względu na temperaturę i ciśnienie barometryczne (p. str. 39).

Pomiar wytrzymałości powietrza za pomocą iskiernika kulistego daje różne wartości, wytrzymałość zatem powietrza i w tym przypadku nie jest stałą materiału, lecz w znacznym stopniu zależną od kształtu i układu elektrod i innych warunków pomiaru. W porównaniu z pomiarami za pomocą iskierników płaskich otrzymujemy dla kul, stosunkowo dużych, n. p. 25 cm i więcej, podobny przebieg naprężenia krytycznego jak dla płaskich, tylko wyżej leżący. Dla dużych odstepów, ponad 10 cm, naprężenie krytyczne dąży asymptotycznie do osi odciętych, osiągając wartości nieco wyższe niż 30 kV/cm (maksym.).

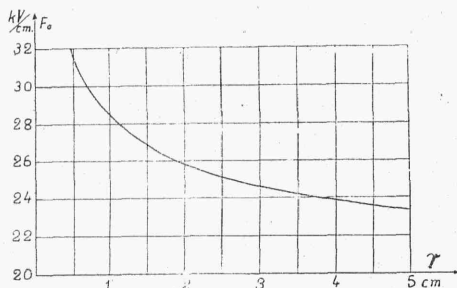
Układ o elektrodach walcowych. — Najbardziej regularne pole, wolne od wpływów zewnętrznych ładunków i dające się dosyć ściśle obliczyć, daje układ, złożony z walca wydrążonego i pręta okrągłego, umieszczonego wewnątrz spółśrodkowo. Iskiernik taki, syst. P e t e r s e n a, można wobec tego stosować dla pomiarów dokładnych. Długość walca zewnętrznego musi być przynajmniej dwa razy większa, niż jego średnica, a wewnętrznego przynajmniej jeszcze dwa razy tak duża.

Napięcie krytyczne takiego układu występuje prawie dokładnie, jak wypada z obliczenia lub z innych, ściślejszych pomiarów. Jest ono zależne od promieni obu elektrod: r — wewnętrznego i R — zewnętrznego walca i wyraża się znanym wzorem:

$$F_0 = \frac{V_0}{r \log_n \frac{R}{r}} \quad (4)$$

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

Z licznych pomiarów wypośrodkowaną krzywą zależności $F_0 = f(r)$, przy $R = \text{const}$, przedstawia Rys. 14. Przebieg ten jest prawie niezależny od R , a więc stosuje się do każdych wartości R .



Rys. 14.

Z poprzednich trzech przypadków pomiaru wytrzymałości powietrza widać, że nie jest ona stałą materjału, że raczej trzeba mówić o wytrzymałości układów powietrznych. Najlepsze wyniki pomiarów tej wytrzymałości dają elektrody płaskie. Na podstawie różnych pomiarów wypośrodkować można 25,7 kV/cm, jako najprawdopodobniejszą wartość wytrzymałości powietrza przy dużych odstępach (przynajmniej kilkanaście centymetrów) elektrod. Przy obliczeniach z grubsza i przy polach, niezbyt odbiegających od jednostajnych, można ją przyjąć orientacyjnie.

Wytrzymałość powietrza jest ponadto zależna w dosyć znacznym stopniu od temperatury i ciśnienia barometrycznego.

Temperatura ma bowiem wpływ na napięcie krytyczne, o ile przy tem zmienia się gęstość powietrza. Przy stałej prężności jest ono odwrotnie proporcjonalne do temperatury bezwzględnej. Prężność powie-

trza zwiększa napięcie krytyczne proporcjonalnie. Natomiast wilgotność w normalnych granicach nie ma na nie prawie żadnego wpływu. Podobnie i częstotliwość w normalnych granicach. Pole wytworzone przez napięcie, panujące między elektrodami, jest bardzo czułe na obce pola, względnie obce ładunki. Przeważnie przyspieszają one wyładowania, t. zn. zmniejszają napięcie krytyczne. Wszystko to łatwo sobie wytłumaczyć na podstawie teorii jonizacyjnej wyładowań w powietrzu.

Poprawkę, jaką trzeba uwzględnić skutkiem wpływu temperatury i prężności powietrza, obliczamy według wzoru F. W. P e e k a na napięcie krytyczne, sprowadzone do temperatury bezwzględnej i ciśnienia barometrycznego 760. Mając podane w tablicach wartości napięcia krytycznego V_{0n} dla 25° C i 760 mm sł. rt., obliczymy napięcie krytyczne przy temperaturze t° i ciśnieniu b według wzoru

$$V_0 = \frac{b}{760} \cdot \frac{273 + 25}{273 + t} V_{0n} = \delta \cdot V_{0n}, \quad (5)$$

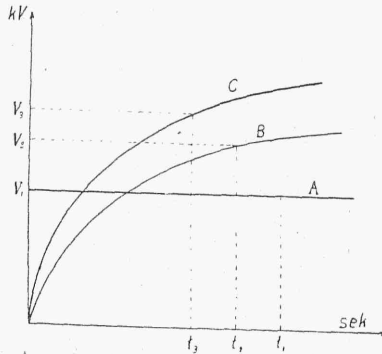
gdzie poprawka $\delta = \frac{0,392 \cdot b}{273 + t}$.

Obce ładunki mają bardzo duży wpływ na zjawisko opóźniania się wyładowania iskrowego. Łatwo bowiem można zauważyć, że między chwilą przyłożenia do elektrody napięcia, odpowiadającego napięciu przebicia, a chwilą samego przebicia, upływa pewien, stosunkowo długi, okres czasu (sekundy). W ciągu tego czasu można chwilo-wo, nawet znacznie (stosunkowo), zwiększyć napięcie ponad napięcie przebicia — i mimo to do przebicia nie dojdzie odrazu. Wygląda to, jakby wytrzymałość powietrza przy naprężeniach krótkotrwałych była większa, niż przy dłużej trwających. Pochodzi to stąd, że do wytworzenia iskry potrzeba pewnego czasu, zanim powietrze zjonizuje się w dostatecznym stopniu.

Zjawisko opóźnienia się wyładowań może być osłabione lub usunięte przez sztuczne zjonizowanie przeskoku iskrowego za pomocą naświetlenia promieniami pozafioletkowymi, radioaktywnymi i t. p.; często wystarczy zwykła lampa łukowa, płonąca w pobliżu iskiernika.

Również i szybkość wzrastania napięcia na elektrodach ma wpływ na napięcie krytyczne. Jeżeli np. prosta A (Rys. 15) przedstawia wysokość ustalonego napięcia przebicia V , a czas od chwili przyłożenia tego

napięcia do chwili przebicia jest t_1 , to, jeżeli napięcie wzrosło według krzywej B , przebicie nastąpi po czasie (t_2), krótszym, i przy napięciu V_2 , wyższym od V_1 . Podobnie będzie $t_3 < t_2$, a zato $V_3 > V_2$. Im prędzej napięcie przyłożone wzrasta, tem napięcie krytyczne bywa większe i tem prędzej następuje przebicie. Z tego wynika, że fale o dużej częstotliwości, lub fale uskokowe o stromym przebiegu czoła, wywołują przebicie przy wyższych wartościach napięcia krytycznego, niż fale o częstotliwości normalnej.



Rys. 15.

Zjawisko wzrastania napięcia przebicia z prężnością powietrza można wyzyskać do otrzymania dużych wartości wytrzymałości powietrza. Np. powietrze sprężone do 25 atmosfer ma wytrzymałość ok. 25 razy większą od normalnego; przewyższa więc już wtedy prawie wszystkie inne znane materiały izolacyjne. Ma to zastosowanie np. przy kondensatorach.

B. Materiały izolacyjne płynne. Oleje izolacyjne.

Z materiałów izolacyjnych płynnych najważniejszą rolę odgrywają o l e j e, używane jako środek izolacyjny głównie do transformatorów i wyłączników;—poza tem stosuje się l a k i e r y, służące do nasywania materiałów włóknistych i papierowych, albo do pociągania izolacji, np. uzwojeń transformatorów i maszyn; możnaby wreszcie zaliczyć tu m a s y izolacyjne, służące do zalewania połączeń kablowych i t. d. Jednak lakiery i masy podczas normalnej pracy są już w stanie stałym, przeto traktować je można jako materiały izolacyjne stałe.

1. Przewodność i wytrzymałość izolatorów płynnych.

Przewodzenie prądu w materiałach izolacyjnych płynnych jest do pewnego stopnia — według do niedawna panującej teorii—p r z e w o d z e n i e m e l e k t r o l i t y c z n e m, to zn. odbywa się według praw przechodzenia prądu przez przewodniki płynne — elektrolity.

W izolatorze takim znajdują się zawsze wolne jony, pochodzące od zanieczyszczeń, które się rozpuściły w płynie izolującym i są zawsze więcej lub mniej zjonizowane. Pod wpływem pola elektrycznego, wytworzonego między anodą i katodą, następuje ruch jonów dodatnich do katody, a ujemnych do anody. Tam oddają one swe ładunki i przez to następuje przepływ prądu przez elektrolit. Zneutralizowane jony, skupione w pobliżu elektrod, częściowo łączą się w inne związki, częściowo osiadają na elektrodach. Skutkiem tego jest zmiana koncentracji płynu; powstają więc miejsca o różnej przewodności. Tam gromadzą się ładunki o różnych skupieniach, na które działa pole elektryczne z siłą proporcjonalną do napięcia i skierowaną do miejsca o mniejszej przewodności. To powoduje ruch cząstek płynu, związanych z ładunkami, z miejsc o większej do mniejszej przewodności. Po ustaniu działania prądu następuje wkrótce powrót do stanu pierwotnego.

Pod wpływem przyłożonego stałego napięcia zmienia się rozdział jonów w elektrolicie, oraz zmniejsza się z czasem jego przewodność. Jeżeli zaś napięcie zmienia się okresowo, to ten rozdział jonów nie może tak szybko podążać za zmianami napięcia i to tembardziej, im większa jest częstotliwość. Prędkość poruszania się jonów jest mała tak, że prąd zmien-