

i zmienia się z wilgotnością powietrza. Wyniki pomiarów mogą być przeto różne.

U wielu materiałów izolacyjnych (przy prądzie stałym) idzie nietylko o ich wytrzymałość na przebicie, ale również o ich i z o l a c y j n o ś ć, t. j. o zdolność nieprzepuszczania prądu ani przez nie, ani po ich powierzchni. W stanie suchym mogą one izolować doskonale, natomiast wiele z nich traci te własności pod wpływem wilgoci, którą nasiakają. Wpływ ten odbija się przedewszystkiem na ich powierzchni, t. j. na przewodności powierzchniowej.

Przebicie warstwy powietrza lub oleju nie jest jedyną formą występujących tam wyładowań elektrycznych. Podobnie jak, obok przechodzenia prądu przez powietrze, — niewidzialnego i niesłyszalnego, występuje przy zwiększeniu napięcia wyładowanie niezupełne, jarzące lub snopiaste, a potem zupełne, — tak samo i przez izolatory stałe płynie zrazu po ich powierzchni prąd niewidoczny, który może się przeobrazić w inną, wyraźniejszą formę wyładowań, — w wyładowania powierzchniowe. Mają one postać podobną do wyładowań między elektrodami w powietrzu i mogą doprowadzić do przeskoku iskry naokoło izolatora. (p. str. 76).

3. Wytrzymałość na przebicie.

Przebicie warstwy powietrza lub oleju, które jest objawem przekroczenia dopuszczalnego naprężenia danego materiału, nie pozostawia po sobie trwalszych zmian w tym materiale izolacyjnym. W powietrzu tworzy się ozon, — olej spala się skutkiem przeskoku iskry i wydziela sadzę; materiał izolacyjny wypełnia na nowo kanał iskrowy i całość może dalej izolować. Natomiast iskra, przebijająca izolator stały, niszczy zupełnie jego izolacyjność, podobnie jak nadmierne naprężenie mechaniczne również psuje go zupełnie.

Naprężenie elektryczne izolatora pochodzi od napięcia przyłożonego do elektrod, między którymi znajduje się ów dielektryk stały. W przeciwieństwie do izolatorów gazowych lub płynnych, które otaczają ściśle elektrody, izolator stały jest zwykle w postaci bryły foremnej lub nieforemnej, do której elektrody przylegają więcej lub mniej ściśle. To też pole, wytworzone przez napięcie, przyłożone do elektrod, przechodzi nie tylko przez izolator, ale też i naokoło

niego, przez drugi materiał izolacyjny (np. przez powietrze, otaczające izolator stały).

To komplikuje zjawiska, zachodzące przy naprężaniu izolatorów stałych. Oprócz naprężeń na przebicie, mamy do czynienia jeszcze z naprężeniami dielektryku otaczającego, przez który również może nastąpić przeskok iskry. Ponieważ izolator ma wogóle niedopuszczyć do zwarcia między elektrodami, ten drugi rodzaj naprężenia odniesiemy także do niego i mówić będziemy o naprężaniu izolatora na przeskok (iskry przez powietrze).

Narazie zajmijmy się tylko naprężeniami na przebicie, wyobrażając sobie, że elektrody ściśle przylegają do dielektryku i nie wykazują rozprzescenia linii pola, wzgl., że do żadnych wyładowań po powierzchni izolatora nie dojdzie.

Przy tem samem napięciu na elektrodach naprężenie dielektryku zależy od kształtu pola, a więc od kształtu elektrod. Im mniejszy promień ich krzywizny, tem większe tam — jak wiemy — naprężenie elektryczne. Warstwa dielektryku, ograniczona np. koncentrycznemi powierzchniami elektrod, będzie więcej naprężana po stronie wewnętrznej.

Przy nadmiernem naprężeniu miejscowem dielektryku mogą się zjawić wyładowania jarzące w porach, znajdujących się w materiale. O ile materiał jest podatny na działanie jonizacji lub ozonu, może się psuć w tych miejscach i tracić zdolności izolacyjne. Zjawisko to tłumaczymy sobie nierównomiernym rozdziałem napięcia w dielektryku uwarstwionym, o różnych stałych dielektrycznych (powietrze lub woda w porach). Materiały porowate, higroskopijne, mają mniejszą wytrzymałość, niż bardziej zwarte. Podobnie — materiały niejednolite, zanieczyszczone, o nierównomierniej strukturze i t. d.

Widać z tego, że wytrzymałość materiałów takich musi być niejednakowa, zależna od ich składu, struktury, wyrobu i t. p., a nadto także od wpływów zewnętrznych. Wytrzymałość ich nie jest zatem stałą materiału, raczej lepiej mówić o wytrzymałości gotowych układów izolacyjnych z takich materiałów.

Wytrzymałość układu izolowanego praktycznie określona jest wysokością napięcia, przy którym następuje jego przebicie. Ażeby zatem zrozumieć, czem uwarunkowana jest ta wytrzymałość, trzeba poznać prawa, rządzące zjawiskami, powodującemi przebicie

materiału izolacyjnego stałego pod wpływem przyłożonego napięcia. Przy materiałach izolacyjnych gazowych i płynnych przypisujemy przebicie warstwy izolacyjnej przez iskrę elektryczną zjawiskom jonizacyjnym, powodującym przechodzenie przez nią prądu elektrycznego, wzrastającego stopniowo aż do formy zupełnego zwarcia. Przy izolatorach stałych — ze względu na inny stan skupienia —, zjawiska jonizacji bodźczej nie mogą występować, jak to poznaliśmy na początku tego rozdziału, tak wyraźnie, jak w tamtych. Muszą tu wchodzić w grę jeszcze inne czynniki.

Pod tym względem mamy różne teorie przebicia materiałów izolacyjnych stałych pod wpływem przyłożonego napięcia.

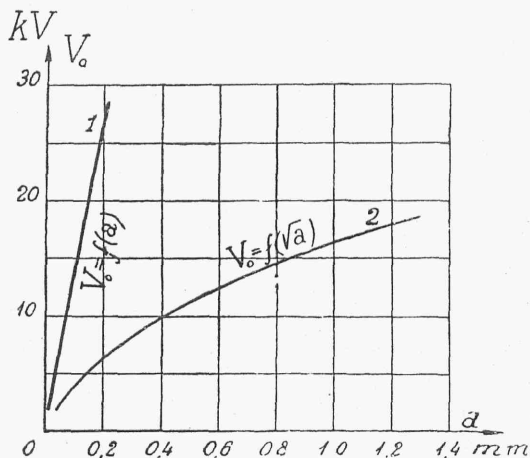
Teoria elektryczna. — Do niedawna panowała powszechnie teoria elektryczna, określająca, że przebicie zależy tylko od maksymalnej wartości natężenia pola. Podobnie określano i prawa przebicia gazów, gdzie jednak przekonano się niedawno ostatecznie, że ma tu wpływ także i lokalny rozdział pola elektrycznego. Według tej teorii następuje skutkiem natężenia pola rozluźnienie się cząsteczek, z którymi są związane jony. Pod wpływem dostatecznego dużego natężenia pola (naprężenie krytyczne) następuje gwałtowne oderwanie tych ładunków od cząsteczek, a jako rezultat tego — przebicie.

W ten sposób wytrzymałość elektryczna musiałaby się wyrazić w określonej liczbie woltów, przypadających na daną grubość dielektryku, według pewnego prawa zależności napięcia od grubości. Po osiągnięciu tego naprężenia (kV/cm) musiałoby nastąpić momentalnie przebicie. Tymczasem okazuje się, że materiały izolacyjne stałe mogą wytrzymywać chwilowo znacznie większe wartości naprężenia, niż przy naprężeniach dłużej trwających. Przy chwilowych naprężeniach inne zatem zachodzą zjawiska, niż przy trwałych.

Praktyczne zastosowanie teorii przebicia musi znaleźć swój wyraz podczas prób materiałów izolacyjnych. Próbkę do badania nadają się najlepiej, jeżeli posiadają kształt płytek; elektrody wtedy również będą płaskie i pole elektryczne między nimi — jednostajne. Idzie o stwierdzenie, przy jakim napięciu próbka zostanie przebita, wzgl. jakie naprężenie jeszcze wytrzyma, oraz czy te naprężenia krytyczne są

w czem zależne od grubości próbki. Podobnie jak u materiałów izolacyjnych gazowych i płynnych — zależność ta wyraża się w postaci charakterystycznej krzywej: $F_0 = f(a)$, gdzie F_0 maleje z rosnącą odległością elektrod a .

Doświadczenia naogół potwierdziły, że rzeczywiste napięcie krytyczne maleje z grubością dielektryku. Ponieważ teoria jonizacji bodźczej nie mogła tu być zastosowana, tłumaczono sobie to w różny sposób i godzono się, że grubsze warstwy wykazują



Rys. 25.

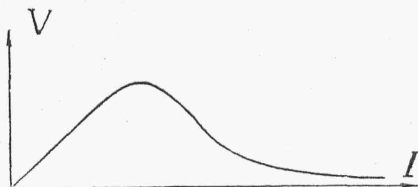
większe nierównomierności struktury, niż cieńsze, że zatem łatwiej mogą być przebijane. Podobnie rzecz się miała, jeżeli przy próbach poddawano płytkę naprężeniu na większej powierzchni, niż — na mniejszej.

Jak się jednak ma rzecz dla zupełnie jednolitych i czystych materiałów? Różne próby i doświadczenia dawały tu różne wyniki, zależne najczęściej od warunków pomiaru. Naogół przyjęło się określenie, że napięcie przebicia rośnie z drugim pierwiastkiem grubości dielektryku. Prof. I. Mościcki w 1904 r. wykazał,^{*)} że w polu jednostajnym, t. j. w środku między okładzinami, napięcie przebicia szkła jest proporcjonalne od jego grubości. (Rys. 25, krzywa 1). Natomiast na krawędzi okładzin, gdzie naprężenie pola jest większe, niż pośrodku, jest ono proporcjo-

^{*)} E.T.Z. 1904, str. 527.

nalne do drugiego pierwiastka z grubości (krzywa 2). Zostało to później potwierdzone z innych stron, przy zastosowaniu specjalnych metod, aby uniknąć wpływu wyładowań krawędziowych, które psują pomiar (o czym później będzie mowa). Między innymi potwierdził to Schwaiger*) w 1921 i K. W. Wagner **) 1922 r.

Teoria termiczna. — Teoria elektryczna przebicia nie dawała jednak odpowiedzi, dlaczego przy dłuższych naprężeniach wytrzymałość materiału maleje. Zwrócono się zatem w zupełnie innym kierunku i starano się szukać rozwiązania w traktowaniu przewodzenia prądu przez izolator, jako zjawiska, zależnego od temperatury.



Rys. 26.

Pod wpływem choćby minimalnego prądu płynącego przez izolator ogrzewa się on, gdyż ilość wydzielonego ciepła jest, jak wiemy, proporcjonalna do RI^2 , gdzie choć I^2 jest bardzo małe, ale R bardzo duże. Przy prądzie stałym jest to czysty prąd upływowy, przy zmiennym dochodzą jeszcze straty histerezy. Izolatory mają przeważnie współczynnik cieplny oporności ujemny. Skutkiem ogrzewania się przewodność rośnie, a zatem rośnie i prąd, a skutkiem tego i ciepło. Poza tem w materiale istnieć mogą miejsca o różnej przewodności, n. p. w postaci kanalików o przewodności większej, niż otoczenie. Prąd elektryczny przepływa więc przede wszystkim tamtędy i tam wywiązuje się najwięcej ciepła. To ciepło musi zostać odprowadzone w dostatecznej mierze, aby nie dopuścić do dalszego zwiększenia się przewodności w kanaliku. Jeżeli jednak ilość ciepła wytworzonego będzie większa, niż odprowadzonego, to zjawisko to potęguje się i dojdzie do przebicia materiału.

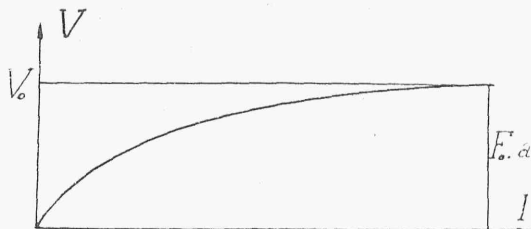
Charakterystyka napięcia w funkcji prądu (Rys. 26) przebiega z początku jako linja prosta, t. zn.

*) Lehrb. d. elektr. Festigkeit. 1921.

**) Berichte der Akad. d. Wiss. Berlin, 1922, oraz J. Amer. Inst. El. Eng. t. 41.

że zachodzi ścisła proporcjonalność między temi wielkościami, bo przy małych prądach ogrzewanie nie odgrywa jeszcze większej roli. Następnie osiąga maksimum i zaczyna szybko spadać, co wskazuje na wzrastanie prądu skutkiem ogrzewania, aż nastąpi stan równowagi nietrwałej. Przy tem samem napięciu prąd gwałtownie wzrasta, izolator przepala się i następuje przebicie.

Według tej teorii napięcie przebicia jest proporcjonalne do pierwszej potęgi grubości dielektryku. Badania K. W. W a g n e r a prawo to potwierdziły.



Rys. 27.

Teoria termiczna przebicia, której wyraziłami są w Europie głównie K. W. W a g n e r *) (1922), a w Ameryce Ch. P. Steinmetz i L. K. Hayden **) (1922), nie daje jednak dostatecznego wytłumaczenia przebicia, jako procesu czysto termicznego, w tych wszystkich przypadkach, kiedy czas trwania naprężenia jest zbyt krótki, aby temperatura mogła osiągnąć dostateczne dla przebicia wartości. Zachodzi to np. przy momentalnych naprężeniach, przy b. cienkich płytach i wogóle przy niskich temperaturach.

Wydaje się zatem, że trzeba obie te teorie, termiczną i elektryczną, połączyć, aby wyjaśnić mechanizm przebicia. Zależnie od przewagi charakterystycznych warunków, można zastosować jedną lub drugą, t. zn. raz przeważy czynnik elektryczny, t. j. naprężenie elektryczne, drugi raz termiczny, t. j. naprężenie termiczne. Taką teorię można nazwać termiczno-elektryczną***). Stosownie do tego można różnie tłumaczyć dwa rodzaje naprężeń: chwilowe i trwałe. Według tej teorii, podczas naprężenia chwilowego przy zwiększaniu prądu spadek napięcia RI w izolatorze przebiega według podanej na Rys. 27

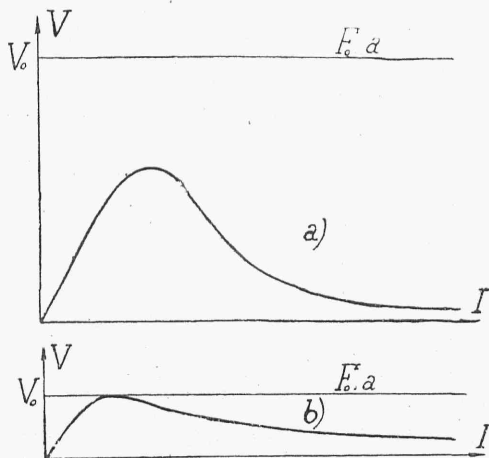
*) l. c.

**) El. World. 1922.

***) Rogowski, — Arch. f. El. 1924.

krzywej, aż przy V_0 osiągnie wartość $F_0 a$, czyli wtedy następuje przebiecie skutkiem działań elektrycznych. Przebieg zaś napięcia przebiecia zależnie od grubości płyty przedstawia linja prosta ($V_0 = c \cdot a$ na Rys. 29).

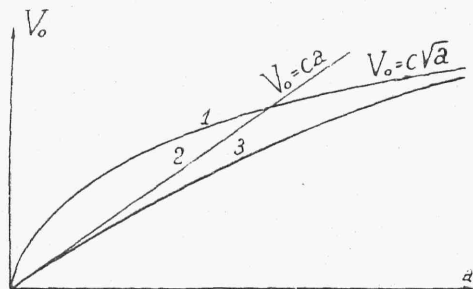
Przy naprężeniach trwałych inaczej się rzecz przedstawia dla grubych i dla cienkich płyt. Przy grubych płytach charakterystyka spadku napięcia jest jak w czysto technicznem ujęciu (Rys. 28, a). Po-



Rys. 28.

dobnie $V_0 = f(a) = c \sqrt{a}$. Maksimum nie dochodzi do wartości $V_0 = F_0 a$, jakaby wypadła z czysto elektrycznego ujęcia. Natomiast u płyt cienkich, przy małych wartościach prądu, charakterystyka ma przebieg, jak według teorii elektrycznej. (Rys. 28, b). Spadek napięcia RI dochodzi prawie do wartości V_0 , jeżeli jednak temperatura wzrasta, to nie osiągnie tej wartości, lecz oddala się coraz bardziej od V_0 i przechodzi w przebieg termiczny. Krzywa zaś $V_0 = f(a)$ ma dla małych wartości a przebieg prawie prosty (Rys. 29, 3). potem przechodzi powoli w przebieg pierwiastkowy (termiczny). Przy małych grubościach jest zatem proporcjonalność napięcia przebiecia do grubości, jak według teorii elektrycznej lub podczas chwilowych naprężeń. Przy grubościach dużych mamy za to proporcjonalność do \sqrt{a} ; odchylenie to należy przypisać wpływom termicznym.

Z powyższych teorii widać, jak duży wpływ na wytrzymałość materiałów izolacyjnych stałych ma ogrzewanie się, względnie stopień odprowadzania



Rys. 29.

ciepła, powstałego skutkiem strat w dielektryku. Stąd pochodzą różne wartości, otrzymywane w pozornie tych samych warunkach. Jasnym też jest, że wielkość strat w dielektryku może być oceną dobroci i wytrzymałości materiału. Nowoczesną tendencją jest określanie dobroci wyrobu nie tylko jego wytrzymałością na przebicie, ale i wielkością strat, czyli stratnością dielektryczną, która wyraża się w W/cm^3 .

4. Porcelana.

Najbardziej rozpowszechnionym i najważniejszym materiałem izolacyjnym w technice wysokich napięć jest porcelana, używana do wyrobu wszelkiego rodzaju izolatorów.

Porcelana izolatorowa, t. zw. porcelana twarda, jest to mieszanina $\frac{2}{4}$ kaoliny, $\frac{1}{4}$ krzemu i $\frac{1}{4}$ szpatu polnego (ortoklaz), którą się wypala w specjalnych piecach. Kaolina jest to związek krzemo-aluminowy ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), topliwy przy temperaturze 1200 do 1800° C. Przez dodanie łatwiej topliwego szpatu (punkt topliw. ok. 1200° C) otrzymuje się materiał, który daje się dobrze formować i wypalać już przy temperaturze 1400 ÷ 1500° C. Kwarc ma topliwość podobną, — w temperaturze wypalania nie topi się więc, lecz tylko zostaje częściowo rozpuszczony przez roztopiony szpat tak, jak koałina.

Kaolina daje porcelanie przed jej wypaleniem potrzebną plastyczność, a następnie odporność na wpływy termiczne; kwarc — daje należyłą wytrzymałość mechaniczną, stanowiąc niejako szkielet porcelany; wreszcie szpat jest czynnikiem, łączącym oba tamte, i daje porcelanie spoiwość i wy-