عایق ماشین‌های فشار قوی

نوشته :

دکتر مهندس محمد قلی محمدی

روشهای متداول برای‌خشک کردن و نفوذ ناپذیر[1] ساختن عایقها ـ بیان نواقص موجود در این روشها بویژه در نحوه اجرای آنها

روشی نو درخشک‌کردن ونفوذناپذیرساختن عایق ترانسفورماتورها وخازن‌های فشار قوی

۱ـ **مقدمه** ـ افزایش سریع مصرف برق وانتقال این انرژی بوسیله شبکه های فشار قوی به‌نقاط دور ساختمان ترانسفورماتورهای بزرگ را لازم ساخت . فشار و قدرت چنین ترانسفورماتورهائی چندین ده‌برابر نمونه های گذشته آن ها است . بعلاوه درجه دقت و اطمینانی که امروزه ازچنین دستگاههائی مورد انتظار است مبین اهمیت مسئله تهیه و آماده ساختن عایقهای آن هاست که بنوبه خود درجه استقامت الکتریکی و حرارتی این ماشینهای الکتریکی‌راتعیین میکنند .

عایقهای معمولی که امروزه در ساختمان ماشینهای فشار قوی بکار برده میشوند عبارت ازعایق «کاغذ ـ روغن» ویاصمغهای مصنوعی میباشند . تاکنون‌علیرغم‌آزمایشهای زیادی که برای‌تهیه وبکاربردن صمغهای مصنوعی برای عایق کاری ماشینهای فشار قوی انجام گرفته است . هنوز نتایج این آزمایشها اجازه بکار بردن آنها را برای ترانسفورماتورهای با فشار الکتریکی بالاتراز ۱۱۰ هزار ولت نداده است . در ترانسفورماتورهای قدرت حتی برای فشار الکتریکی پائین‌تر نیزمانند گذشته ازعایق «کاغذ‌ـروغن» استفاده میشود، بدینقسم که پس از عایق‌بندی سیم‌پیچیهای اولیه وثانویه‌نسبت‌به‌هم ونسبت‌به‌هسته (بانوار کاغذ) آن را پس از تخلیه ازهوا و گاز(تادرجه‌ای معادل 10^{-3} Torr) درروغن‌مخصوص غوطه داده ونفوذناپذیر میکنند طریقه آماده‌ساختن عایق وتخلیه هوا وگازهائی که درلوله های موئین کاغذ ویا در حبابهای محتوی گاز عایقهای مایع وجامد موجودند وسرانجام غوطه‌دادن کاغذ درروغن تحت خلاء مسئله‌ایست که هنوز باید آزمایشهای متعددی بهترین راه‌حل‌فیزیکی وصنعتی مربوط به‌آن را پیدا کند . ازآنجا که زمان کار و عمر

۱– Impregnierung

ماشین های فشار قوی الکتریکی مربوط به‌شدت و ضعف تخلیه الکتریکی ویا وقوع اتصال کوتاه درآنهاست بجاست که ابتدا اصول ونظریه های مربوط به‌اتصال کوتاه الکتریکی وحرارتی را درعایقها و تابعیت آن‌ها را از مقدار رطوبت و گازهای باقیمانده درعایق بطور خلاصه بیان داریم.

۱/۱- اتصال کوتاه الکتریکی - درباره‌علل‌وقوع اتصال کوتاه‌الکتریکی درعایق تئوریهای‌مختلفی وجود دارد که ما دراینجا لزومی به‌بیان یک‌یک آنها ویا مقایسه آنها باهم نمیدانیم. نتایج بسیاری از آزمایشها تایید‌میکند که‌اتصال کوتاه درروغن یا کاغذ بویژه‌زمانیکه این‌عایقها‌تحت فشارالکتریکی‌متناوب ویا ضربه‌ای قرارگیرند زاییده ایونیزاسیون در گازهای محبوس در روغن ویا کاغذ ویا سرانجام عایقهای جامد است. این گازهای محبوس مثلا در حبابهای باقیمانده در روغن میتوانند تحت‌تاثیر شدت میدان الکتریکی آزادشده وبا تشکیل حبابهای بزرگتر ووقوع ایونیزاسیون درآنها اتصال کوتاهی الکتریکی را درداخل‌روغن بوجودآورند. بعلاوه نتایج دیگر همین آزمایشهانشان میدهد که ساقه‌های موئین ومرطوب جداشده از کاغذ در روی سطح روغن درجهت تأثیر شدت میدان الکتریکی قرارگرفته وبا کوتاه کردن فاصله الکترودهااتصال کوتاه الکتریکی را موجب میگردند. بعلاوه اتصال کوتاه الکتریکی درکاغذ ناشی از وجود الکترون و ایون‌های آزادی‌ست که تحت تأثیر شدت میدان الکتریکی سرعت گرفته و ایونیزاسیون را شروع میکنند. وقوع ایونیزسیون بنوبه خود یکنواختی میدان را برهم میزند و اتصال کوتاهی را درعایق موجب‌میگردد. وجود الکترونها و ایونهای آزاد درکاغذ خود بمیزان قابل‌توجهی از رطوبت کاغذ و وجود گازها در داخل لوله‌های موئین آن تبعیت میکند.

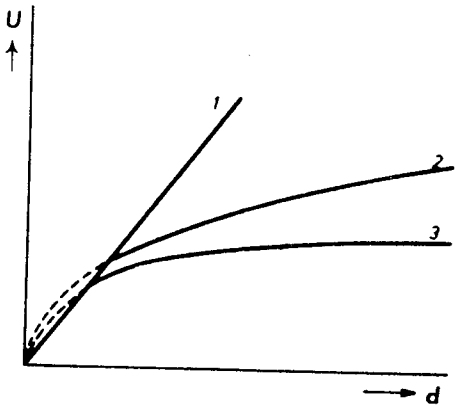
۱/۲- **اتصال کوتاه حرارتی** - اغلب براثر گذاردن فشار الکتریکی دائم برروی عایق این نوع اتصال کوتاه بوقوع می‌پیوندد. ودرتحت تأثیر فشار الکتریکی متناوب نیز در شرایط معینی دیده میشود. میدانیم که مقاومت حقیقی یک‌عایق با بالارفتن حرارت بایک تابع‌توانی ازنوع e^{-x} پائین میافتد. باگذاردن فشار الکتریکی برروی عایق شدت جریان عبوری اولیه عایق راگرم‌میکند که خود باعث کم شدن مقاومت الکتریکی عایق است.

کم‌شدن مقاومت الکتریکی خود عبور جریان بیشتری‌را بهمراه‌دارد. بدینقسم زمانیکه‌حرارت‌خارج شده ازعایق کمتراز میزان حرارت ایجاد شده درداخل عایق گردد اتصال کوتاه درداخل عایق حتمی‌است.

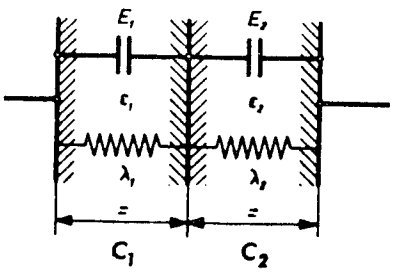
۱/۳- **اتصال کوتاه حرارتی - الکتریکی** - که اغلب درعایقهائی که برای مدت زمانی تحت فشار الکتریکی متناوبی قرارگیرند، پیش میآید. استقامت «حرارتی - الکتریکی» عایقها چنانکه درمنحنی نشان داده‌شده درشکل ۱ پیداست مقدار کمتری نسبت به‌استقامت تنهای حرارتی و یا الکتریکی نشان میدهد زیرا که درکنار تلفات الکتریکی ناشی از ایونیزسیون و تلفات اهمی ژول تلفاتی ناشی از پولاریزاسیون بموجب قوانین **ماکسول**[۱] **- واگنر**[۲] **و دبای**[۳] ایجادمیشود.

۱- Maxwell ۲- Wagner ۳- Debye

۱/٤- تلفات الکتریکی - اکنون چنانکه عایق «کاغذ - روغن» را که بترتیب دارای اعدادی الکتریک ε_1وε_2 میباشند و قابلیت هدایت آنها λ_1وλ_2 است زیر فشار الکتریکی با شدت میدانهای E_1 و E_2



(شکل ۱) - منحنی اتصال کوتاه دریک عایق
۱- اتصال کوتاه الکتریکی ۲- اتصال کوتاه حرارتی
۳- اتصال کوتاه حرارتی - الکتریکی



(شکل۲)- شمای الکتریکی دوعایق کنارهم

قرار دهیم بااستفاده از شمای الکتریکی ۲ که جانشین این دوعایق میگردد نسبت شدت میدانهای الکتریکی درهریک از دوعایق عکس نسبت عددی دی الکتریک آنها است :

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \qquad (1)$$

با دانستن شدت جریان عبوری از واحدسطح که عبارت است از :

$$i_1=\lambda_1 \cdot E_1$$

و

$$i_2=\lambda_2 \cdot E_2$$

اگر بخواهیم درمرز این دوجسم اضافه بار الکتریکی باقی نماند باید :

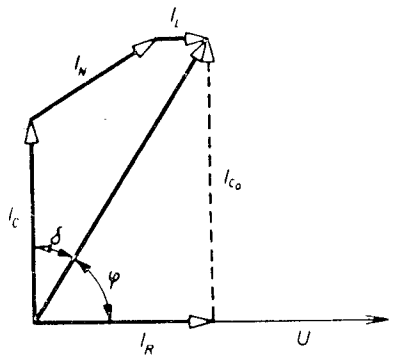
$$i_1=i_2=\lambda_1 E_1=\lambda_2 E_2$$

باشد وبنابراین نسبت زیر برقرار خواهد بود :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}=\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \qquad (2)$$

اما در عمل اکثراً در مرز بین دوعایق بار الکتریکی‌ای جمع میشود که به‌عایق خاصیت یک دو قطبی (دی‌پل)میدهد. درموقع یکسان‌شدن بارالکتریکی‌عایق، جریان‌الکتریکی‌عقب‌مانده‌ای که با I_n نمایش میدهیم(شکل۳)از عایق عبور میکند وشدت جریان خازنی ازمقدار I_C به I_C ترقی می‌یابد. شدت جریان I_R که بوجودآورنده‌تلفات اهمی میباشد برابر است‌با :

$$I_R=I_{Co} \cdot tg\delta$$



(شکل۳) حاصل های شدت جریان دریک عایق

ومقدار تلفات عایقی :

$$N = U \cdot I_R = U \cdot I_C \cdot tg\delta$$
$$N = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta$$

وبا درنظر گرفتن :

$$C = C_L \cdot \varepsilon_\omega$$

تلفات عایقی برابر خواهد بود با :

$$N = U^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_\omega \cdot tg\delta \cdot C_L \qquad (۳)$$

در رابطه بالا :

N عبارت از تلفات عایقی با واحد وات

U فشار الکتریکی با واحد ولت

ω سرعت زاویه در ثانیه

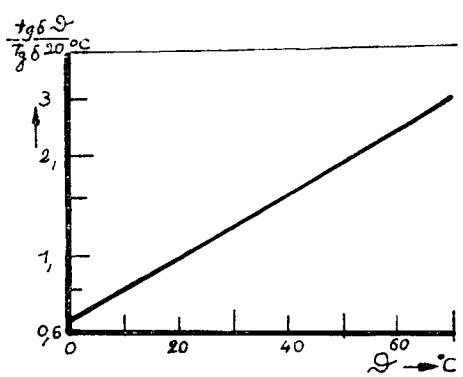
ε_ω عدد نسبی دی‌الکتریک برای سرعت زاویه معین ω

δ زاویه تلفات عایقی

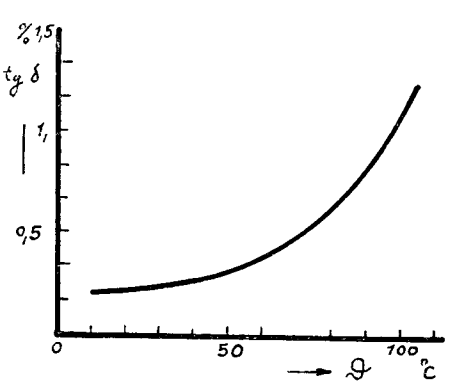
وسرانجام C_L ظرفیت عایق بین دوقطب، اگر این عایق ازهوا درنظر گرفته‌شود، میباشند.

رابطه(۳) نشان میدهد که تلفات عایقی وارده درعین‌حال که از فشار الکتریکی گذارده‌شده برروی عایق وفرکانس آن تبعیت میکند تابعی ازنوع جنس عایق وخصوصیات آن یعنی میزان رطوبت و مقدارگاز موجود درآن میباشد .

بمجرد آنکه گرمای حاصله ازعبور جریان خازنی بخارج هدایت نشود تلفات عایقی نیز عایق را مانند تلفات اهمی گرم میکنند وباگرما ضریب زاویه تلفات عایقی بزرگ میگردد . شکلهای ٤ و ٥ نمایش



(شکل٤) زاویه تلفات بعنوان تابعی از حرارت در روغن



(شکل٥) زاویه تلفات عایقی $tg\delta$ بعنوان تابعی‌از حرارت دریک باندژ کاغذی آغشته‌شده‌به‌روغن

تغییرات ضریب زاویه تلفات را بعنوان تابعی‌از حرارت نشان‌میدهند.

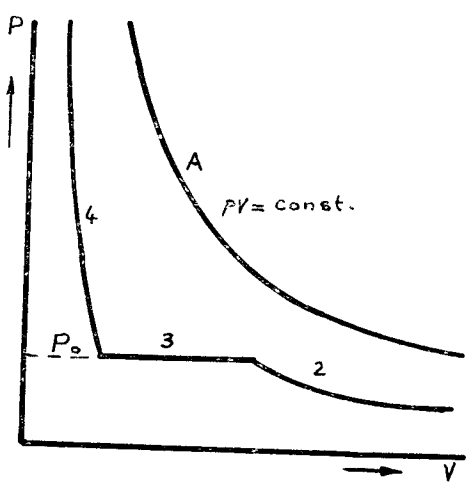
توضیحات مختصر داده‌شده دربالامربوط به‌اتصال کوتاه درعایق نشان میدهند که رطوبت ووجود حبابهای گاز درداخل عایق‌ها چگونه استقامت الکتریکی عایق را پائین میآورد .

در ۲۰ سال اخیر کوششهای زیادی در رشته‌های مختلف علمی شده است تا بهترین راه‌ها برای از بین بردن رطوبت وخارج‌ساختن گازهای موجود در عایق‌های مایع وجامد بدست‌آید و همزمان باآن دقیقترین آزمایشها برای بازرسی و کنترل نتایج چنین روشهائی درتهیه وآماده کردن عایق بدست آید.

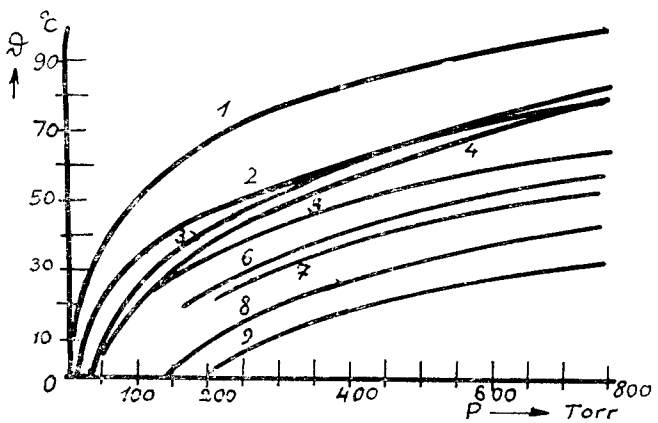
۲- روشهای متداول ومعمولی درخشک‌کردن ونفوذ ناپذیرساختن عایق کاغذ - بیرون بردن گازو رطوبت عایق ازطریقه معروف به‌تخلیه‌کلاسیک .

بالابردن فشار الکتریکی مولدها و یا ترانسفورماتورها و خازنها ایجاب میکند که عایق چنین دستگاههائی تاسرحد ممکن ازگازهای موجود در حبابهای ذره‌بینی گاز تخلیه گردد تا **فشارگاز درعایق** بسیار پائین‌آید. اما پائین‌آوردن **فشارگاز** درعایق موکول به ازبین بردن و خشک کردن رطوبت عایق است . بعبارتی دیگر فشار **بخارآب** در الیاف عایق بایدبسیارکم باشد. برای شناسائی بیشتر بااین دواصطلاح فنی وتفاوت بین گازها بویژه گازهای ایده‌آل وبخارها شاید توضیح زیر مفید باشد .

گازهای ایده‌آل در حوزه فشار انتخاب شده‌برای آزمایشهای الکتریکی قابل کندانسه شدن نیستند وقانون بویل - ماریوت را تبعیت میکنند یعنی : $P \cdot V = Const$ است ، درحالیکه بخارها تابع رابطه‌بالا نیستند زیرا که این بخارها درحوزه فشار موردنظر شکل وحالت خود را تغییر میدهند. منحنی A درشکل۶ تغییرات حجم گاز ایده‌آل را بعنوان تابعی ازفشار نشان میدهد. منحنی در تمامی مسیرخود تبعیت از قانون بویل-ماریوت میکند گاز ایده‌آل درظرف سربسته که قبلا بکلی ازهوا تخلیه شده‌است فشاری متناسب باحجم وحرارت خود به دیواره‌های ظروف‌وارد میسازد که **فشارگاز** نامیده میشود. این فشار چنانکه میدانیم‌نسبتی معکوس باحجم گاز ونسبتی مستقیم با حرارت آن دارد . درحالیکه اگر بجای گاز ایده‌آل درهمین‌ظرف بکلی



(شکل۶) تغییرات فشار نسبت به‌حجم گاز ایده‌آل وبخار



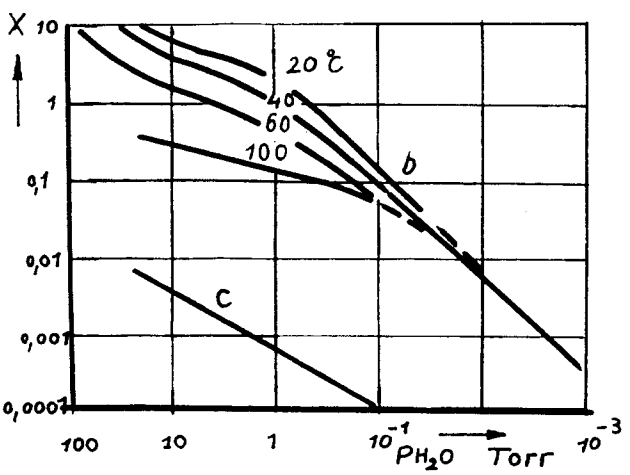
(شکل۷) فشار بخارمحلول‌های مختلف بعنوان‌تابعی از حرارت
۱- آب ۲- الکل‌طبی ۳- بنزل ٤- الکل صنعتی ٥-تتراکلرورکربن
٦- کلروفوم ۷- استن ۸- سولفورکربن ۹- اتر

از هوا خالی شده مایعی را واردکنیم قسمتی از این مایع به‌بخار تبدیل شده و برروی مایع می‌ایستد . این بخار فشاری متناسب باحرارت خود برروی مایع باقیمانده درظرف واردمیکند. این فشاررا **فشاربخار** مینامیم.

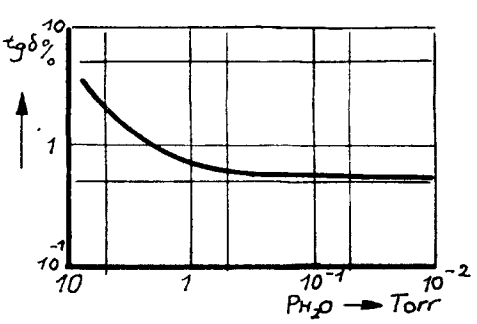
اکنون درظرف محتوی بخار ومایع فشار بخار تنها تابعی از حرارت آن است . شکل ۷ نمایش فشار بخار محلول های مختلف ومنجمله بخارآب را میدهد . فشاربخار دراین محلول ها بعنوان تابعی از حرارت درسطح آزاد مایع داده شده است .

آزمایشهای بالا نشان میدهد که فشارگاز وفشار بخار بکلی از یکدیگر مستقل بوده وازهم تبعیت نمیکنند همچنانکه در مثال بالا درحالیکه فشار بخار مقداری قابل سنجش است ، فشارگاز برابرصفر میباشد . مجموعه فشارگاز وفشار بخار را فشارکل مینامیم - بدیهی است همانطورکه درمایع بالا براثرخلاء قسمتی از آن بشکل بخار با فشار معینی برروی سطح آن ایستاد برروی سطح «روغن - کاغذ» مرطوب نیز بخار آبی متناسب بامقدار رطوبت آنها قابل سنجش است .

درشکل ۸ منحنی معروف «به‌منحنی تعادل»[1] نمایش داده شده است . چنانکه دراین منحنی دیده میشود هرمقداری از رطوبت مبین فشار معینی از بخار آب است . وبنابراین میتوانیم در زیر خواص الکتریکی عایق ها را بعنوان تابعی از فشار بخارآب نشان دهیم ودرحقیقت تابعیت این خواص را از رطوبت ومقدار آب عایق بیان داشته باشیم . ازشکل مزبور میتوان نتیجه مهمتری نیز گرفت ، چنانکه از مسیر منحنی مشهود است مقدار رطوبت کاغذ در فشار پائین تر از 10^{-1} Torr بمیزان غیرقابل توجهی از حرارت تبعیت میکند در حالیکه درفشاری بالاتر از این مقدار تابعی از حرارت است . بنابراین چنانکه مایل باشیم به میزان رطوبتی مثلا معادل 2×10^{-1} درصد وزن عایق برسیم باید کاغذ را درمحیطی که فشار بخارآبی معادل ٤ Torr در آن حکمفرما است برده و ۱۰۰ درجه گرم کنیم . اما اگر فشاربخار به‌میزانی معادل 2×10^{-1} Torr پائین آید درجه حرارتی معادل ۲۰ درجه کافی است . لازم به‌توضیح است که در موقع خشک کردن کاغذ به خاطر حفظ استحکام مکانیکی الیاف آن از حرارتهای مافوق صددرجه دوری میجویند .



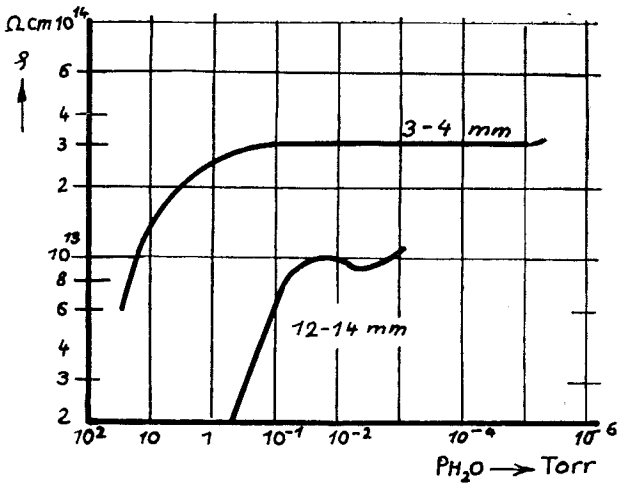
(شکل ۸) «منحنی تعادل» کمترین مقدار ممکن رطوبت درعایق بعنوان تابعی ازفشار بخارآب . X- مقداردرصدرطوبت نسبت‌به وزن‌عایق . PH_2O-فشاربخارآب . b-کاغذسلرلز . c- روغن ترانسفورماتور دردرجه حرارت‌ثابت ۲۳° سانتیگراد



(شکل ۹) ضریب زاویه تلفات $tg\delta$ بعنوان تابعی از فشار بخارآب

۱- منحنی تعادل بوسیله Oetjen و Schultes درمورد کاغذ وروغن ترانسفورماتور برداشته شده است.

شکل ۹ خواص الکتریکی و عایقی کاغذ را بوسیله ضریب زاویه تلفات $tg\delta$ بعنوان تابعی ازمیزان رطوبت کاغذ نشان‌میدهد. درشکل ۹ به‌آسانی قابل درك است که‌دررطوبتی‌بیشتر ازیکدهم درصد وزن کاغذ که متناسب بافشار بخار آبی برابر با ۰×۱۰^{-۱} Torr است ضریب زاویه تلفات بسرعت زیاد میشود . در حالیکه بازای رطوبتی کمتر از این مقدار ضریب زاویه تلفات بدون‌تغییر میماند دراین آزمایش درجه حرارت پیوسته ۹۰ درجه سانتیگراد ثابت نگهداشته شده است. بنابراین مسیر منحنی ضریب زاویه تلفات $tg\delta$ نشان میدهد که بازای فشار بخار آبی کمتر از یک Torr کاغذ تاحدود مناسبی خشك شده است وتخلیه بیشتری قادر به کوچکترساختن ضریب زاویه تلفات $tg\delta$ یعنی بهتر خشك‌شدن کاغذ نمیباشد . همین نتایج‌را سنجش چگالی مقاومت عایق بعنوان تابعی از درجه خلاء (فشار بخار آب درظرف) تأیید میکند. (شکل ۱۰) -



(شکل ۱۰) تابعیت مقاومت الکتریکی عایق از فشار بخار در درجه حرارتی برابر ۹۰ درجه سانتیگراد

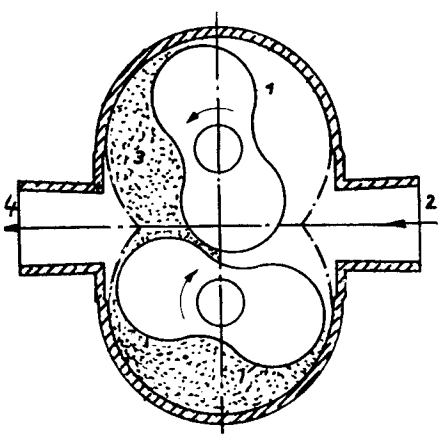
درشکل مزبور دیده میشود که مقاومت الکتریکی کاغذ نیز در فشاری کمتر از یک Torr بدون تغییر میماند آزمایشهای مختلف دیگری‌برای خشك کردن کاغذعایق نشان میدهند که‌اگر کلفتی بانداژ کاغذ بیشتر از ۳ تا ٤ سانتیمتر باشد برای خشك کردن آن باید دردرجه حرارتی معادل ۹۰ تاصد درجه، خلاء را تا $۱۰^{-۲}$ Torr پائین‌آورد تا ضمانت کافی برای خشك‌شدن‌وخلاء گازهای موجود درلوله‌های موئین باقی باشد .

۱ـ۲ - طریقه اجرای‌عمل تخلیه‌کاغذ ازگازهای موجوددرلوله‌های موئین‌آن وخشك‌کردن‌کاغذ ازطریق خلاء مداوم .

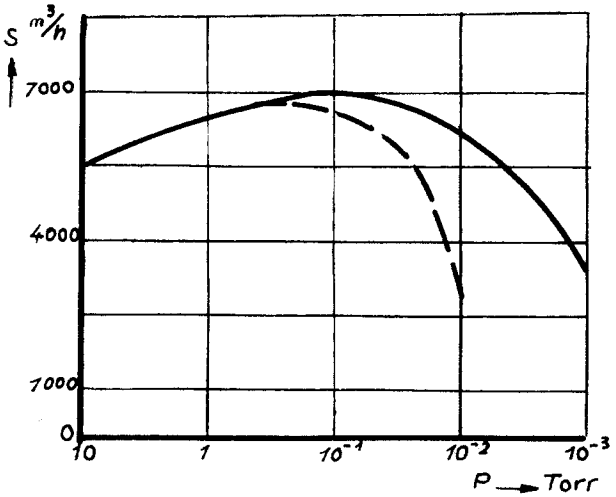
پس ازآنکه ماشین‌های فشارقوی مانند ترانسفورماتورهای قدرت ـ ترانسفورماتورهای فشار و جریان و بالاخره خازنها باکاغذ عایق‌بندی شدند درمحفظه‌های بزرگی که کاملا آب بندی شده‌اند قرار میگیرند. این دیگهابوسیله پمپ‌های خلاءقوی قادرندکه فشار داخل دیگ را تا $۱۰^{-٤}$ Torr پائین بیاورند. با درنظر گرفتن این مسئله که کاغذ عایق در هوائی با رطوبت نسبی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد بطور معمول بین ٦ تا ۱۲ درصد وزن خود رطوبت دارد و ما حداکثر با گذراندن هوای گرم (درحدود ۵۰ درجه سانتیگراد) قادریم که این رطوبت را به ۲ تا ۳ درصد وزن کاغذ پائین آوریم روشن میشود که دراین دیگها از راه خلاء و حرارت چه میزان رطوبتی را بشکل بخار آب باید از کاغذ به خارج هدایت کرد .

بطور مثال متذکر میشویم که برای پائین آوردن رطوبت ۱۰ تن کاغذ درخلائی‌برابر $۱۰^{-۱}$ Torr به‌میزان ۱ر۰ درصد مجبوریم بخارآب و گازی به حجم ۱۰۰ متر مکعب از دیگ خارج کنیم . این مقدار بخار

آب و یا گاز به‌حجمی معادل 10^{6} مترمکعب میرسد اگر بخواهیم درجه خلاء را به 10^{-2} Torr پائین‌تر ببریم. قدرت پمپهای معمولی روغنی کافی برای انجام چنین تخلیه‌ای نیستند زیرا قدرت پمپ کردن چنین پمپهای خلائی متأسفانه در فشاری بین 10^{-2} Torr تا 10^{-1} به حداقل خود میرسد. بنابراین امروزه در کارخانهای بزرگ از پمپهای قوی موسوم به پمپ روت استفاده میشود که طریقه کار آن وقدرت مکیدن آن درشکلهای ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند. چنانکه از شکل ۱۲ پیداست قدرت تخلیه این پمپها در حدود 10^{-1} Torr درجه فشار درماکزیمم خود میباشد.



(شکل ۱۱) نمایش یک پمپ روت از مقطع آن
۱- پیستون‌های بیضی‌شکل ٤- دریچه مکیدن
۳- محفظه پمپ ۲- جهت بیرون دادن گاز



(شکل ۱۲) مشخصه یک پمپ خلاء روت
S- قدرت خلاء P- فشار . منحنی کارپمپ
بدون پیچ هوا- منحنی کار پمپ باپیچ هوا-

ثابت نگه داشتن حرارت‌نیز، دراین‌طریقه ازخلاء، بعلت پائین‌آوردن فشارداخل دیگ خودمسئله قابل ملاحظه‌ای است زیرا باکم‌شدن فشارداخل دیگ حرارت نیز بسرعت پائین میافتد. بالابردن حرارت نیز درفشارهای پائین علیرغم صرف انرژی حرارتی زیاد آسان نیست زیراتعادل حرارت درداخل دیگ ازراه جابجائی‌دشوارترشده‌است. سالهادرفن تخلیه‌صنعتی‌باندازه‌های ضخیم کاغذدرماشینهائی مانندترانسفورماتورها این اشتباه تکرار میگردیده است که حرارت دیگ را بوسیله ترموالمنت‌هائی که دردیوار داخلی‌دیگ نصب میشده است می‌سنجیدند وبارسیدن به‌درجه‌حرارت مطلوب (مثلا ۹۰ درجه سانتیگراد) پمپهای خلاء را بکار میانداختند درحالیکه درهمان زمان درجه حرارت داخل بانداژ بمراتب کمتر از ۹۰ درجه بوده است. باخارج کردن هوای گرم داخل‌دیگ حرارت درداخل بانداژ کاغذ بسرعت‌پائین‌رفته وعمل تخلیه در حرارت‌پائین با دشواری انجام میگرفت زیرابخارآب درداخل‌لوله‌های موئین کندانسه شده وعمل تخلیه کامل‌نمیتوانست انجام گیرد. دراین‌حال فشار داخل دیگ را به‌حدودی معادل 10^{-1} Torr میرساندند و معتقد بودند که بموجب منحنی معروف تعادل (شکل۸) دردرجه خلائی پائین‌تر از 10^{-1} Torr پارامتر حرارت رل‌مؤثری را بازی نمیکند. بدینقسم رطوبت درداخل کاغذ باقیمانده‌وعلیرغم تخلیه دیگ تا 10^{-2} Torr ازمیزان‌رطوبت

درداخل کاغذ بمقدار قابل توجهی کاسته نشده بود . بدین‌منظور آزمایشهای متعددی بطریق زیر انجام شد: ماشینهای بانداژشده با کاغذ در داخل دیگ قرارداده‌شدند ومتناسب باحجم این بانداژها بین ۸ تا ۱۲ ساعت تحت حرارتی درحدود ۹۰ درجه قرارگرفتند تا قسمت اعظم رطوبت بشکل بخار از لوله‌های موئین طبقات مختلف بانداژ کاغذ بیرون آید . بدینطریق لائی‌های داخلی بانداژ کاغذی نیز به‌میزان کافی حرارت گرفتند (حرارت‌لائیهای داخلی کاغذ بوسیله ترموالمنت نصب شده درداخل بانداژ اندازه‌گیری شد) پس‌ازگذشت مدت فوق پمپ‌های خلاء بکار انداخته شدند وبخار آب‌راخارج کردند . منحنی‌های برداشته شده‌از آزمایش نشان میدهد که :

۱- انتخاب درجه حرارتی برابر ۹۰ درجه مدت‌خشک کردن وتخلیه کاغذرا دریک دیگ باظرفیت ۱۰ تن درحدود $\frac{۱}{۳}$ مدت خشک کردن همان کاغذ دردرجه‌حرارتی بین ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد میکند. شرط کوتاه کردن مدت تخلیه به‌نسبت فوق حرارت‌دادن دیگ در فشار آتمسفر بمدت ۸ ساعت میباشد .

۲- اجرای عمل تخلیه تحت‌شرایط بالا ثابت نگهداشتن حرارت را پس از بکار انداختن پمپهای تخلیه نیز آسان‌تر میسازد .

آزمایشهای بالا در درجه حرارت انتخاب شده تغییری دراستحکام الیاف کاغذ نمیدهد .

۳ ـ خشک کردن کاغذ عایق وتخلیه آن ازگاز ازطریق دمیدن هوای گرم بداخل دیگ و مکیدن مجدد آن (خلاء امپوسی).

طریقه بالا یعنی خلاء‌مداوم نشان‌داد که باتخلیه دیگ‌وپائین‌آمدن فشار، حرارت‌نیز در داخل دیگ سقوط کرده وتأمین مجدد آن بعلت بطی انجام گرفتن عمل جابجائی (کنوکسیون) بدشواری انجام میگیرد .

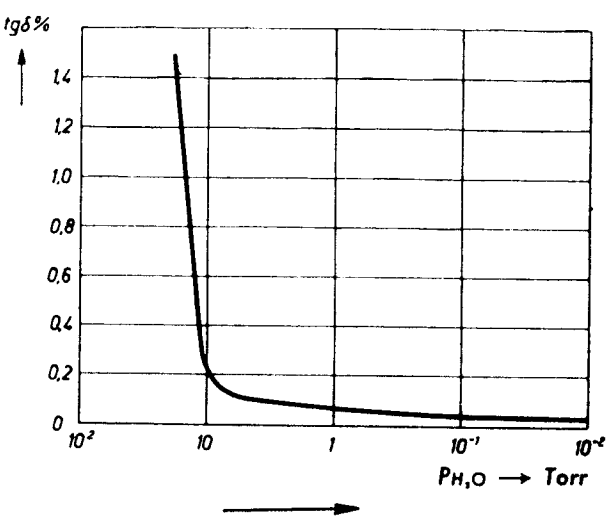
تجربیات مختلف نشان داده است که اگر گازی خشک و گرم را بداخل لوله‌های موئین کاغذ هدایت کنیم براثر گرما رطوبت بخار شده وذرات بخارآب برروی مولکولهای گاز قرار میگیرند و با آنها از کانالهای موئین کاغذ خارج میشوند . بنابراین به‌آسانی مشهود است که با تخلیه مداوم هرچه درجه خلاء در داخل دیگ بالا میرود خارج‌ساختن رطوبت موجود درکاغذ دشوارتر میشود . در درجه فشاری پائین‌تر از $۱۰^{-۱}$ Torr عمل خارج ساختن رطوبت و خشک کردن کاغذ بسیار کند میگردد . با اتکاء به‌نتایج این آزمایشها راه‌نوینی برای‌خشک کردن عایقهای ماشین‌های الکتریکی‌پیش گرفته شد بدینقسم که بجای تخلیه دائمی ، بطورمتناوب هوای خشک وگرم شده را (درجه حرارت درحدود ۹۰ درجه سانتیگراد) بداخل دیگ وبدینوسیله به‌داخل کاغذ هدایت کرده وپس از زمانی کوتاه ومعین آن را با پمپ خلاء به بیرون میمکیم و با آن مقداری بخار آب را ازکاغذ خارج میسازیم . فشار لازم برای هدایت گاز یا هوای خشک به‌داخل لوله‌های موئین درحدود یک [atu] بوده وبسته به‌قطر بانداژ میتوانیم تا $۱٫۵^{atü}$ افزایش‌دهیم .

این طریقه از خشک کردن برای بانداژهائی که از ۴ تا ۶ سانتیمتر ضخامت دارند نتایج بسیارخوبی داده است وزمان تخلیه کاغذ ازگاز وبخار آب وآماده‌نمودن آن‌را برای نفوذ ناپذیرساختن به‌نسبت $\frac{۲}{۳}$ پائین آورده است .

ضخیم‌ترشدن بانداژ کاغذ از حدود ٤ سانتیمتر زمان نفوذ گاز بداخل بانداژ را بالابرده و مانع از گرم‌شدن لائی‌های داخلی بانداژ کاغذمیشود. بویژه اگر درنظر گیریم که‌این بانداژ کاغذ درفواصل‌مختلف برای محکم‌شدن باچسب آغشته شده است.

٤ ـ نفوذ ناپذیر ساختن کاغذ بوسیله روغن ترانسفورماتور.

روغنها بمراتب سهلترخشک میشوند وباتخلیه گازهای موجود درحبابهای ذره‌بینی باقیمانده درآنها ضریب زاویه تلفات بسیار ناچیزی پیدا میکنند. منحنی نمایش داده شده در شکل ١٣ مسیر منحنی ضریب زاویه تلفات $tg\delta$ را بعنوان تابعی از فشار بخارآب نشان میدهد دراین آزمایش فرکانس فشار الکتریکی. ٥ هرتس انتخاب‌شده وثابت‌نگهداشته‌شده‌است.



(شکل ١٣) مسیر $tg\delta$ یک روغن بعنوان تابعی از فشار بخار آب موجود

با خشک کردن‌وآماده نمودن کاغذازیکی دوراه شرح داده شده دربالا وخشک کردن و تخلیه‌روغن ازگاز بطورجداگانه اکنون‌روغن آماده شده را بداخل دیگ که در تحت خلاء واقع شده است وارد میکنیم. روغن با سرعت بداخل لوله‌های موئین خلاء شده کاغذ وارد شده وامکان مرطوب شدن مجددآن راحین کار نمیدهد. بدیهی است که چندین ساعت قبل‌از داخل کردن روغن بداخل دیگ حرارت را قطع میکنیم تا درموقع جریان دادن روغن بداخل کاغذ مقداری‌از آن تحت حرارت بالا تبدیل‌به‌بخار نشود.

اجرای دقیق یک چنین برنامه‌ای امکان کارطولانی و بدون خطری را به ماشینهای بزرگ فشار قوی میدهد.

مأخذی‌که در تهیه این مقاله مورداستفاده واقع شده‌اند

١– Die Durchschlags festigkeit von Luftüber saettigtem oel und Oel – Pepier – Dielektrikum prof. Dr. Ing robert Striegel und Dr Ing Heinrich Winkelnkemper

E. T. Zeitschrift 18 Dezember 1961

٢– Trocknung und Impregnierung von Oel–Papier–Dielktrikum

Siemens–Halske 1963 Dr. Ing. Mohammadi und Dr rer Urbach