

Stefan Głuchowski

INIEKCJE JONOWE A DRZEWIENIE WODNE

1. Wprowadzenie

Mechanizm inicjacji drzewienia wodnego w polietylenie, podobnie jak mechanizm inicjacji drzewienia elektrycznego, nie jest dostatecznie rozpoznany [1]. W szeregu publikacjach dyskutuje się trzy hipotezy, które według różnych autorów mogą prowadzić do drzewienia wodnego[1]:

- 1/ Dielektroforeza lub elektroforeza ;
- 2/ Dyfuzja cząstek wody do polimeru wskutek znacznej różnicy potencjałów chemicznych pomiędzy tworzywem a wtrąciną zawierającą roztwór wodny ;
- 3/ Wyładowania niezupełne /na poziomie niemierzalnym/, wywołujące parowanie wody, wzrost ciśnienia w szczelinie do wartości niszczącej łańcuchy polimerów. Z czasem następuje wnikanie wody w ten zgenerowany obszar.

Wszystkie przedstawione powyżej hipotezy nie pozwalają wytłumaczyć zależności wpływu częstotliwości napięcia wymuszającego na powstanie drzewienia. Zależność ta jest jedną z najbardziej charakterystycznych cech drzewienia wodnego zarówno w wypadku drzewienia wodnego strimerowego jak i bow-tie. Jak wiadomo, czas do osiągnięcia przez drzewienie wodne pewnej określonej długości silnie maleje z częstotliwością napięcia probierczego dla określonej grubości izolacji, do pewnej wartości tej częstotliwości, po czym zaczyna rosnąć. Na przykład dla izolacji o grubości 4 mm ta graniczna częstotliwość napięcia, od której rozpoczyna się wzrost czasu do inicjacji, wynosi 2,5 kHz [1] .

dr inż. Stefan Głuchowski. Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej.

Tak więc np. zjawiska elektroforezy i dielektroforezy nie zależą od częstotliwości napięcia wymuszającego [1]. Podobnie jak i dla pierwszej hipotezy, tak i w wypadku drugiej na różnicę potencjałów chemicznych nie ma wpływu częstotliwość napięcia probierczego. Tym niemniej podaje się, że różnica potencjałów związana z przenikalnością roztworu wodnego może wzrastać z częstotliwością wskutek zmniejszania się konduktywności roztworu [2]. Między innymi podaje się, że dla częstotliwości ok. 2 kHz roztwór wodny jest cieczą dielektryczną o przenikalności zbliżonej do wody destylowanej.

Nie potwierdzają tego jednak badania wpływu stężenia wodnego roztworu szeregu metali alkalicznych na przenikalność dielektryczną elektrolitu przy częstotliwości napięcia 2 kHz [3]. Zgodnie z danymi przedstawionymi w pracy Little ϵ tych elektrolitów jest znacznie mniejsza od przenikalności wody destylowanej i maleje ze stężeniem roztworu zgodnie ze wzorem:

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 - k c) \quad /1.1/$$

gdzie: ϵ - przenikalność elektrolitu;
 ϵ_0 - przenikalność wody destylowanej;
 k - stała wynosząca ok. 1.4 dla słabo stężonych elektrolitów /poniżej 1 g/l /;
 c - stężenie soli w litrze roztworu.

Nie potwierdza to założeń przyjmowanych dla drugiej z prezentowanych tutaj hipotez.

Jednocześnie w pracy Little podaje się, że pomiary ϵ dla wodnych roztworów poniżej 1,5 kHz nie są możliwe z uwagi na silne gazowanie elektrolitu nawet przy jego minimalnych stężeniach /znacznie poniżej 1 g/l /. Prawdopodobnie gazowanie takie powinno również występować w układach modelowych drzewienia wodnego dla częstotliwości poniżej 1,5 kHz. Zgodnie natomiast z trzecią hipotezą należałoby się spodziewać odwrotnej charakterystyki częstotliwościowej.

Dodatkowo w jednej z ostatnich prac naukowców kanadyjskich dotyczącej między innymi drzewienia wodnego w próbkach polietylenu z nakłutą szczeliną, zwraca się uwagę na fakt, że szybkość drzewienia dla próbek bez wnęki gazowej w obszarze styku elektrolitu z PE /brak wnz na poziomie powyżej 10^{-14} pC/ jest identyczna jak w próbkach przygotowanych metodą Ashcrafta [4]. Stanowi to istotny argument przeciwko inicjującej roli wyładowań niezupełnych w drzewieniu wodnym.

Według autora zjawisko drzewienia wodnego może być wynikiem nierozpartrywanych dotychczas w tym zagadnieniu tzw. iniekcji jonowych. Mechanizm generacji drzewienia wodnego byłby wówczas następujący : z elektrolitu, jakim są roztwory wodne stosowane w tych badaniach, wskutek dużej wartości pola elektrycznego zachodziłoby wstrzykiwanie jonów do polimeru. Silnie spolaryzowane cząsteczki wody podążałyby za wstrzykniętymi jonami. Prowadziłoby to do równomiernego nasycania wodą kontaktowej warstewki polimeru. Możliwość udziału przewodnictwa jonowego w formowaniu drzewienia wodnego potwierdza zakres pól elektrycznych, przy których rozpoczyna się iniekcja jonowa /ok. 10^7 V/m /, porównywalny do wartości pól elektrycznych wywołujący drzewienie wodne. Jednocześnie wartość gęstości prądu jonowego wstrzykiwanego do polimeru, zgodnie ze wzorem /1.2/ [5], zależy eksponencjalnie od różnicy $\frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{\epsilon_1}$ i pola elektrycznego.

$$j_0 = q \mu N E \exp \left[\frac{q^2}{2kT} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{\epsilon_1} \right) + \frac{q^2 \delta E}{2kT} \right] \quad /1.2/$$

gdzie : q, μ, N, r - kolejno oznaczają : ładunek, ruchliwość, koncentrację, promień jonów ;

ϵ_2, ϵ_1 - przenikalności : elektrolitu i dielektryka ;

δ, k - stałe : pierwsza uwzględnia rodzaj elektrolitu, a druga jest stałą Boltzmana ;

E - natężenie pola elektrycznego ;

T - temperatura.

Wartość ta zależy również od koncentracji jonów w elektrolicie.

Równanie /1.2/ pozwala na wyjaśnienie dlaczego drzewienie zależy od stężenia elektrolitu poprzez uwzględnienie wielkości N . Dalej wiąże wpływ rodzaju elektrolitu na powstanie drzewienia przez czynnik $\frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{\epsilon_1}$, od którego zależy praca wyjścia jonów z roztworu do tworzywa.

Prąd jonowy wstrzykiwany do polimeru jest, prawdopodobnie jak w wypadku prądów elektronowych, ograniczony ładunkiem przestrzennym [5, 6]. W wypadku napięcia przemiennego zmalałby udział tego ładunku, czyniąc mechanizm iniekcji znacznie wydajniejszym. Ograniczeniem w tym przypadku jest taka częstotliwość pola, za którego zmianami jony nie nadążają.

Można przypuszczać, na podstawie prac nad iniekcjami jonowymi w cieczach dielektrycznych, że częstotliwość ta wynosi ok. 2 kHz [7]. Potwierdzałoby to również wcześniej wspomnianą prawidłowość - maleńie szybkości rozwoju drzewienia dla wyższych częstotliwości.

Przedstawione tutaj rozważania o mechanizmie inicjacji drzewienia wodnego są tylko hipotezą i wymagają przeprowadzenia szeregu eksperymentów. Pierwsza część tych prac obejmuje sprawdzenie wpływu na stan zawilgoceńia izolacji rodzajów elektrofiltrów, dla których wcześniej wyznaczono charakterystyki prądów jonowych. Drugi etap obejmowałby pomiary prądów płynących przez izolację przy napięciach przemiennych metodą Lempkego /próbki przygotowane wg Ashcrafta/.

Niniejszy artykuł zawiera omówienie wyników badań pierwszego etapu prac. Dyskutuje się wyniki pomiarów prądu jonowego płynących przez folię PE dla wybranych elektrolitów. Następnie omawia się wyniki pomiarów prądów resorpcji zestarzonych odcinków kabli, w elektrolitach, dla których wcześniej określono zachowanie się prądu jonowego. Na tym etapie prac potwierdzony jest mechanizm iniekcji jonowej jako inicjatora wnikania wody do polietylenu.

2. Stanowisko pomiarowe i sposób wykonania badań.

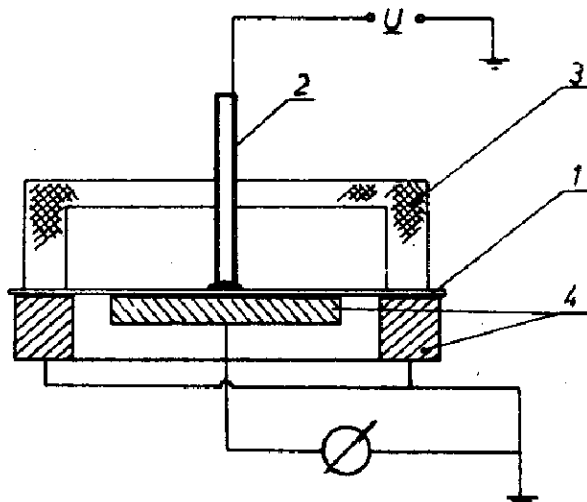
Pomiary wartości prądów jonowych wstrzykiwanych do polietylenu dla wybranych elektrolitów wykonano w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 2.1.

Badania te wykonano na folii PE o grubości 20 μ m. Jedna strona folii miała naniesioną elektrodę srebrną. Z drugiej strony folii elektrodę stanowiła kropla elektrolitu /pomiaru wykonywano podobnie jak w pracy Sażina [5]. Obszar styku kropli z powierzchnią folii wynosił 0,01 cm².

Na elektrolity stosowano następujące roztwory :

- wodę po jednokrotnej destylacji /roztwór wzorcowy/ ;
- 1 n roztwór NaCl i KCl - typowe elektrolity stosowane w badaniach drzewienia wodnego ;
- 10% roztwór KCl, w którym rozpuszczalnik stanowiło 90% dioksanu, 10% wody destylowanej. Zgodnie z danymi [5], roztwór taki ma przy częstotliwości $2 \cdot 10^6$ Hz ϵ ok. 3. Jeśli więc iniekcja jonowa decyduje o przenikalności wilgoci do izolacji, to z uwagi na ϵ tego roztworu /zaletność

1.2/ powinna być ona dużo efektywniejsza niż dla 1n roztworów wyciek soli.



Rys.2.1. Schemat układu pomiarowego do badań wpływu roztworu elektrolitu na wartość prądów płynących przez folię PE. gdzie : 1/ folia PE z naniesionymi elektrodami srebrnymi ; 2/ metalowa rurka zawierająca elektrolit ; 3/ pierścień teflonowy dociskający folię do elektrod uziemiających ; 4/ elektrody uziemiające.

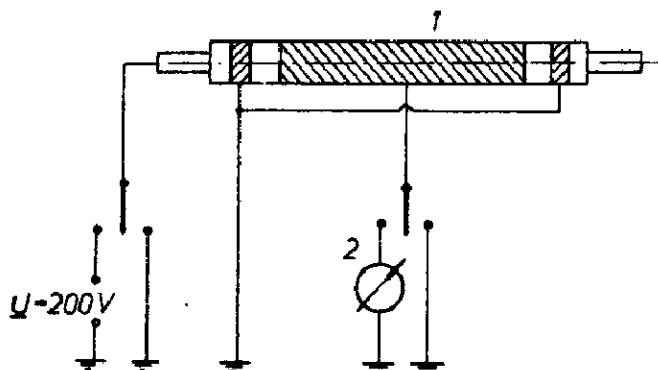
Pomiary prądów wykonano przy użyciu elektrometru typu 219A. Źródłem napięcia był stabilizowany zasilacz napięcia stałego typ ZMN4.

Badania wykonano przy napięciu równym 4 kV.

Starzenie odcinków kabla polietylenowego typ ZHDAXX I x 120 20 kV /bez ekranu zewnętrznego/, w elektrolitach podanych wyżej przeprowadzono przy napięciu przemiennym o wartości 4,5 kV i częstotliwości 2000 Hz. Odcinki kabla starzono na długości 5 cm. Czas starzenia wynosił 50 h. Następnie na zestarzony odcinek nanoszono elektrody srebrne i wykonywano pomiary prądu resorpcji - rysunek 2.2. Jak wiadomo, wnikanie wody do izolacji PE można najprościej zidentyfikować poprzez porównanie krzywych resorpcji [8] .

Przebieg badań był następujący :

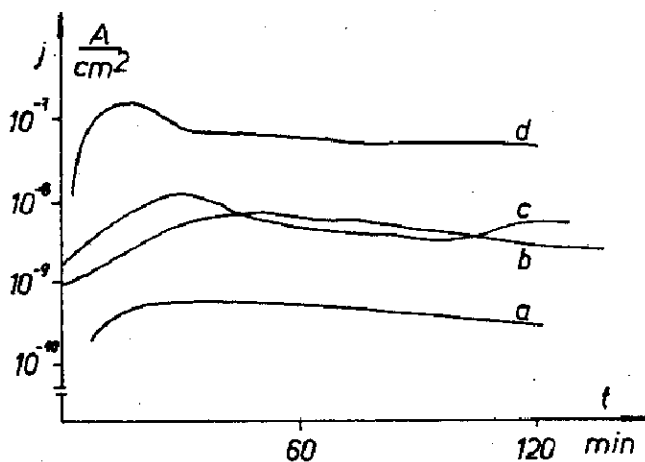
do danego odcinka przykładano na przeciąg 1 h napięcie stałe o wartości 200 V. Po tym czasie dołączano źródło napięcia i po 1 min. włączono w obwód rozładowania próbki elektrometr. Czas pomiaru prądu resorpcji wynosił 1 h.



Rys.2.2. Schemat układu do pomiaru prądu resorpcji ;
gdzie : 1/ odcinek kabla z naniesionymi elektrodami ;
2/ Elektrometr typ 219A.

3. Wyniki badań i wnioski

Zmiany czasowe prądów wstrzykiwanych z elektrofiltrow do polimeru przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys.3.1. Zmiany czasowe prądów płynących przez folię PE przy napięciach 4 kV.

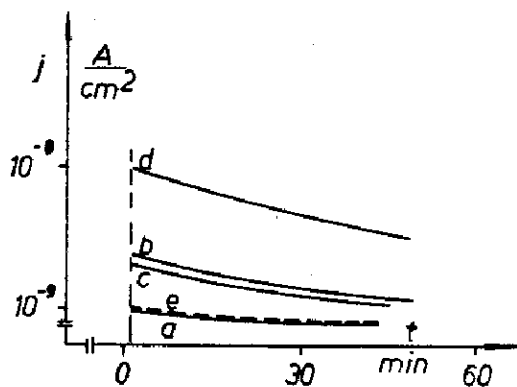
gdzie : a/ woda po jednokrotnej destylacji ; b/ 1 n roztwór NaCl;
c/ 1 n roztwór KCl ; d/ 10% roztwór KCl w dioksanie /90% / +
+ woda /10% /.

Wartości gęstości prądu są największe dla cieczy, w której przy koncentracji jonów mniejszej niż dla roztworów jednonormalnych, ϵ porównywalny jest z przenikalnością polietylenu /porównaj krzywe 3.1a z 3.1b i c/. Potwierdza to zależność /1.2/. Tym samym można przypuszczać, że w tym przypadku przepływ prądu jest wywołany wetrzykiwaniem jonów.

Jednocześnie charakter zmian czasowych wskazuje na występowanie ograniczenia wartości ładunkiem przemiennym [5]. Prawidłowość ta dotyczy wszystkich przebadanych roztworów. Na tej podstawie można sądzić, że elektrolit, w którym rozpuszczalnikiem jest woda, może być źródłem prądów jonowych. Istnieje więc możliwość występowania iniekcji jonowych i w wypadku drzewienia wodnego.

Zmiany czasowe prądów jonowych w wypadku dwóch różnych elektrofiltrów o zbliżonych koncentracjach jonów są różne. Może to też potwierdzać zależność obserwowana przy drzewieniu wodnym, związana z rodzajem elektrolitu.

Badania zmian prądów resorpcji odcinków kabla polietylenowego potwierdzają przypuszczenia, że dla elektrolitów, które wywołują większe prądy jonowe, prądy resorpcji są większe /rys. 3.2/.



Rys. 3.2. Prądy resorpcji kolejno dla próbek starzonych w elektrolitach jak na rys. 3.1. Wykres "e" dotyczy kabla niestarzonego

Tak więc np. nie zaobserwowano zmian prądu resorpcji w odcinku kabla starzonego w wodzie destylowanej. Wartości i zmiany czasowe prądów resorpcji odcinków kabli starzonych w roztworach soli różnią się wyraźnie od próbek niestarzonych. Otrzymano jednocześnie, w porównaniu do wartości pozostałych elektrofiltrów, bardzo dużą wartość prądu resorpcji dla próbek starzonych w roztworze z dioksanem. Próbkę tę były następnie cięte

na mikrotonie i gotowane w błękitie metylowym. Nie stwierdzono w nich jednak widocznych zmian uszkodzenia izolacji. Zasadniczym wnioskiem z tych pomiarów jest stwierdzenie, że zastosowanie czynnika, który pozwoli na zmniejszenie przenikalności elektrolitu /w tym przypadku dioksanu/ powinno prowadzić do dużo szybszych wzrostów drzewienia wodnego niż stosowanie roztworów o znacznym stężeniu. Może to umożliwić szybszą ocenę odporności tworzywa na drzewienie wodne.

Takie badania zostały rozpoczęte. Próbkki /odcinki kabli/ z nakłutymi szczelinami /wg Ashcrafta/ będą starzone w roztworach wodnych zawierających dioksan.

Wyniki tych badań wraz z pomiarami prądów płynących przez te próbki przy napięciach zmiennych będą w najbliższym czasie przedstawione w osobnej publikacji.

Literatura

1. Tanaka T. : Review of Water Tree Processes and Related Problems. Proceedings of the 14-th Symposium on Electrical Insulating Materials. Tokio 1981.
2. Matsuba H. : Thermodynamical Explanation of Water Tree Mechanism. *ibid.*
3. Little V. : The measurement at low frequencies of the Dielectric Constant of Conducting Liquids. Proc.Phys.Soc. nr 3, 1958.
4. Densley J. i inni : Light Emission from Polyethylene Subjected to Highly Divergent Fields. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 1982.
5. Sazın W. i inni : Jonnye inekcionnye toki v polimernych dielektrikach. Wysokomolekularnye Soedinenija. tom XII, nr 11, 1970.
6. Hofstein S. : Space Charge Limited Ionic Currents in Silicon Dioxide Films. Appl.Phys.Letters, nr 10, 1967 r.
7. Felici N.J. : Conduction mechanisms in liquid dielectric modern concepts. World Electrotechnical Congress, June 21 - 25, 1977, Moskwa 1977.
8. Isshiki S. i inni : Water Trees and Detecting device. Proc. of the 14-th Symposium on Electrical Insulation Materials. Tokio 1981.