

**EFFECT OF TEMPERATURE ON ELECTRICAL
CONDUCTIVITY OF FUELS FOR AVIATION TURBINE
ENGINES**

**WPLYW TEMPERATURY NA PRZEWODNOŚĆ
ELEKTRYCZNĄ PALIW DO TURBINOWYCH
SILNIKÓW LOTNICZYCH**

Wojciech Dziegielewski

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
wojciech.dziegielewski@itwl.pl

***Abstract:** Fuel properties have a large impact on its utilization safety throughout practically all phases of fuel's life. This paper describes one of the most important parameters responsible, and presents preliminary results of research of basic dependance connected with static electricity of aviation fuel - the impact of temperature on the electrical conductivity of fuel for turbine aircraft engines. Presented and characterized are the results obtained for domestic products, in use by the Polish Air Force. Innovative attempt was taken to describe the dependance using a mathematical function. In addition, the practical aspects of its use and future directions of research are pointed out.*

***Keywords:** jet fuel, electrical conductivity, temperature, research*

***Streszczenie:** Właściwości paliwa mają duży wpływ na bezpieczeństwo ich eksploatacji praktycznie na wszystkich etapach jego życia. W niniejszym referacie opisany został jeden z najważniejszych parametrów odpowiedzialnych za ten obszar. Przedstawiono wstępne wyniki badań podstawowej zależności związanej z elektrycznością statyczną paliw lotniczych – wpływu temperatury na wartość przewodności elektrycznej paliwa do turbinowych silników lotniczych. Zaprezentowano i scharakteryzowano uzyskane rezultaty uzyskane dla produktów krajowych, eksploatowanych przez polskie siły powietrzne. Podjęto nowatorską próbę opisanie zjawiska za pomocą funkcji matematycznej. Ponadto wskazano na praktyczne aspekty jej wykorzystania oraz dalsze kierunki prowadzenia prac badawczych.*

***Słowa kluczowe:** paliwo lotnicze, przewodność elektryczna, temperatura, badania*

1. Wstęp

Przewodność elektryczna paliwa jest bardzo istotnym parametrem związanym z bezpieczeństwem eksploatacji paliw. Szczególnego znaczenia nabiera w odniesieniu do paliw mających zastosowanie w lotnictwie.

Ciecze o małej przenikalności elektrycznej praktycznie nie są podatne na elektryzację. Zgodnie z prawem Coulomba siła przyciągania między jonami jest znacząca, ale nie mogą one swobodnie dysocjować i przemieszczać się w polu elektrycznym. Praktyczny problem pojawia się, gdy przenikalność elektryczna jest niewielka, a jednocześnie brak jest przewodzenia. Taka właśnie sytuacja ma miejsce w przypadku cieczy węglowodorowych. Są one dielektrykami i jako takie bardzo słabo przewodzą prąd elektryczny. Charakteryzują się jednocześnie dużą zdolnością do wytwarzania ładunków elektryczności statycznej.

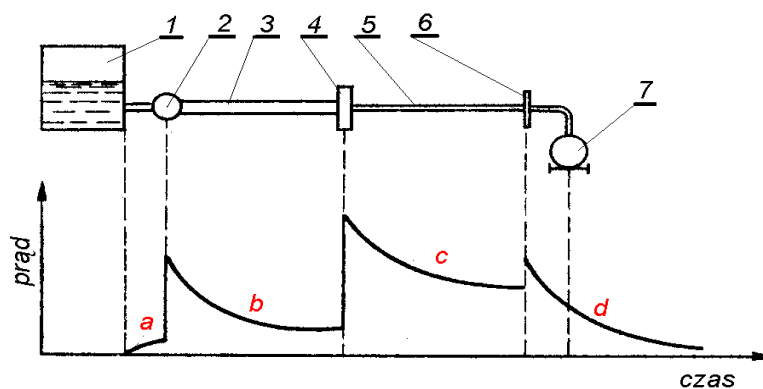
Niebezpieczeństwo pojawienia się w paliwie ładunków elektrycznych występuje na większości etapów życia produktu. Podczas wymuszonego ruchu cieczy, najczęściej na granicy faz, zachodzą różnego rodzaju zjawiska elektrokinetyczne i elektrochemiczne. Dynamiczne procesy powstawania ładunków związane głównie z elektryzacją przepływową powodują, że jej mechanizm jest wieloparametrowy i trudny do opisu ilościowego. Ładunek elektryczny jest więc ładunkiem wypadkowym, stanowiącym wynik częstokroć wielu zjawisk przebiegających jednocześnie. Ciecz praktycznie nieprzewodząca, przepływając przez rurę ładuje się elektrycznie wtedy, gdy rozrywane są granice faz. Powierzchnie międzyfazowe przemieszczają się względem siebie. Część elektrycznej warstwy podwójnej ulega przemieszczeniu, powodując rozkład ładunków na granicy faz, co z kolei powoduje pojawienie się w cieczy nadmiaru ładunków jednego znaku. Na powierzchni materiału stałego odkładają się wyindukowane ładunki jednej biegunowości o stosunkowo silnych wiązaniach, natomiast ładunki przeciwnego znaku (o nierównomiernej gęstości i znacznie słabszych wiązaniach) tworzą warstwę dyfuzyjną w cieczy.

Dotychczas nie powstała dostatecznie ogólna teoria dotycząca elektryzacji przepływowej cieczy węglowodorowych. Wszystkie rozważania są ściśle powiązane z wynikami doświadczeń.

Występowanie ładunków elektrostatycznych w paliwie węglowodorowym, związane jest głównie ze zjawiskami elektrolitycznymi. Paliwo jest słabym elektrolitem. Jego przewodność właściwa wynosi około 10-14 S/m. W praktyce przewodność zawiera się w granicach $10^{-8} + 10^{-13}$ S/m. Świadczy to o tym, że przewodność paliwa polepszają takie domieszki jak woda, dodatki i zanieczyszczenia. Teoretycznie idealnie czyste paliwo nie powinno przewodzić ładunków elektrycznych, ale i zarazem nie powinno się elektryzować. Stan taki nie jest jednak praktycznie możliwy do osiągnięcia. Przenoszenie ładunków elektrycznych w paliwie odbywa się głównie za pośrednictwem jonów, powstałych w wyniku reakcji dysocjacji i hydrolizy soli. Na powierzchniach materiału stykającego się z paliwem przebiegają reakcje elektrolityczne. Jeżeli materiał wykazuje właściwości katody, to na jego powierzchni przebiegają procesy

redukcji, gdy anody - utleniania. Przebiegające reakcje powodują zmianę ilości jonów wodorotlenowych i hydroniowych. [1, 2]

W warunkach statycznych problem nie istnieje. Ze względu na przeznaczenie i specyfikę, ciecz taka jak paliwo, w procesie eksploatacji, jest ciągle przemieszczana. Po wyprodukowaniu jest magazynowana w zbiornikach, następnie tłoczona do zbiorników środków transportowych lub tłoczona dalekosiężnym rurociągiem transportowym, następnie ponownie przetłaczana do zbiorników magazynowych, skąd po pewnym czasie jest dostarczana do urządzeń przygotowujących ją do zatankowania do statków powietrznych. W czasie tych operacji paliwo jest ponadto poddawane wielokrotnemu filtrowaniu. Taka droga dystrybucji wiąże się z powstawaniem znaczącej ilości ładunków elektryczności statycznej. Przykładowy przebieg elektryzacji (tylko w części drogi dystrybucyjnej – z pominięciem zmian zachodzących w napełnianym zbiorniku cysterny) przedstawiono na rys. 1.

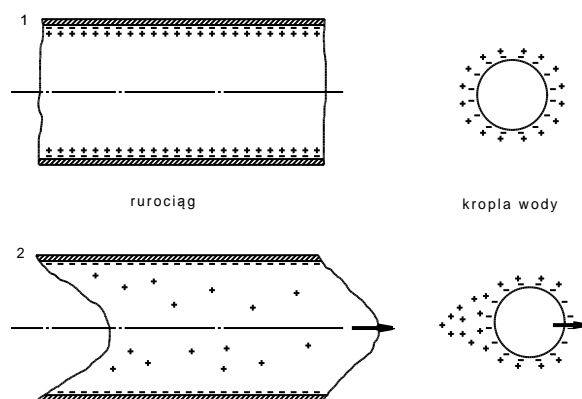


Rys. 1 Schemat poglądowy zmian natężenia prądu elektryzacji na drodze dystrybucyjnej paliwa: 1 – zbiornik, 2 – pompa, 3 – przewód o „dużej” średnicy, 4 – filtr, 5 – przewód o „małej” średnicy, 6 – przepływomierz, 7 – cysterna kolejowa [3]

Również paliwo znajdujące się już w zbiornikach statku powietrznego, poddawane jest procesowi elektryzacji. SP wykonują zadania będąc w ruchu. Może to być powodem generowania ładunków. Szczególnie w samolotach odrzutowych, poruszających się z dużymi prędkościami i posiadających zbiorniki paliwowe umieszczone w skrzydłach, wskutek sił tarcia powstających przy ruchu cząstek atmosfery względem powierzchni skrzydeł, jest wytwarzana znaczna ilość ładunków elektrycznych.

Elektryzacja paliw związana jest z dwoistością ładunków elektrycznych. Wygenerowane ładunki elektrostatyczne mają tendencję do rozdzielania się na dodatnie i ujemne, a następnie do grupowania się ładunków jednoimiennych. Proces ten jest ułatwiony, jeżeli w paliwie znajdują się ciała polarne, np. substancje powierzchniowo czynne. Może nastąpić wówczas ich adsorbowanie na wewnętrznych ściankach elementów instalacji magazynowo – dystrybucyjnej, ale również na powierzchniach odrębnych faz występujących w paliwie (np. wody,

produktów korozji itp.). Jeden koniec cząsteczki, posiadający ładunek elektryczny, zostaje przyczepiony do powierzchni ciała mającego kontakt z paliwem, a drugi, o ładunku przeciwnym, pozostaje swobodny. Mechanizm ten przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Mechanizm rozdzielania ładunków elektrycznych w paliwie:
1 – w spoczynku, 2 – przy ruchu względnym [4]

W ten sposób utworzony zostaje pewnego rodzaju kondensator, którego jedną okładką jest element urządzenia dystrybucyjnego, a drugą warstwa paliwa. W warunkach statycznych jony jednego znaku równoważą jony drugiego znaku i ciecz pozostaje w zasadzie elektrycznie obojętna. W czasie ruchu paliwa, jony znajdujące się w dyfuzyjnej warstwie fazy stałej (metal), przemieszczają się względem pozostałych warstw fazy stałej. Jony zaadsorbowane pozostają na powierzchni stykającej się z fazą paliwową. Podczas ruchu paliwa, następuje rozdział ładunków i ich przemieszczenie. Powstają w ten sposób pola elektryczne o pewnych potencjałach. Wartość potencjału zależy m.in. od grubości warstwy adsorbowanej. W obszarze "kondensatora" mogą wystąpić wolne elektrony oraz zorientowane molekuly dipolowe. Okładki kondensatora mogą znajdować się po jednej lub dwu stronach granicy rozdziału faz.

Przypadek jednostronnego "kondensatora" występuje podczas filtracji przez metalową siatkę. Nadmierny ładunek posiada tylko paliwo. Inaczej jest podczas filtracji przez dielektryczny materiał porowaty. W przeciwieństwie do przewodników, powstają dwie warstwy dyfuzyjne: w paliwie i na powierzchni warstwy siatki porowatej. Nadmiar ładunków odkłada się w paliwie oraz na materiale filtracyjnym. Ładunki mogą również powstawać w wyniku zjawiska indukcji elektrycznej.

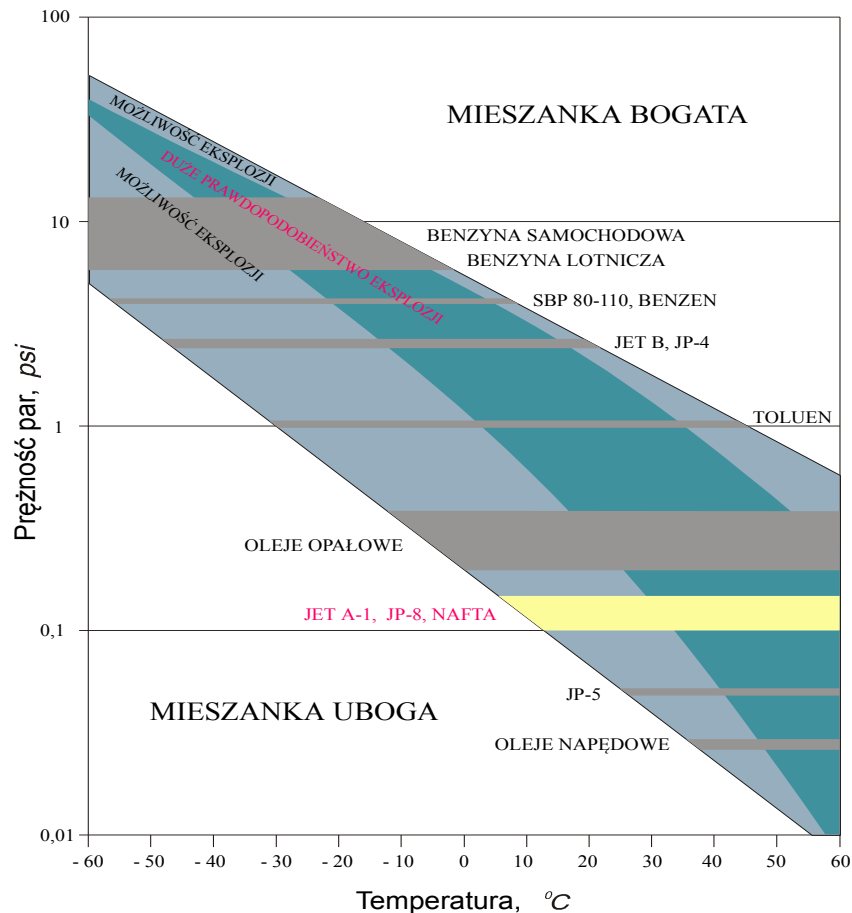
W miarę trwania ruchu strugi paliwa, gęstość ładunków wzrasta i rośnie energia pola elektrycznego. Przy sprzyjających warunkach, energia ta może wzrosnąć do takiej wartości, że nastąpi wyładowanie elektryczne w postaci przeskoku iskry pomiędzy polami o różnych potencjałach. Wartość różnicy potencjałów może

dochodzić nawet do 10 000 volt. Jeżeli energia wyładowania jest wystarczająco duża, może nastąpić zapłon łatwopalnych par paliwa. [5, 6]

Elektryczność statyczna może stanowić zagrożenie, jeżeli:

- w lotniskowej instalacji magazynowo – dystrybucyjnej lub zasilającej SP, istnieje czynne źródło generujące ładunki elektrostatyczne,
- w objętości paliwa nagromadził się znaczny ładunek elektryczny,
- nad powierzchnią paliwa w zbiorniku znajduje się mieszanka par paliwa z powietrzem o proporcjach pozwalających na zapłon (na rys. 3 przedstawiono poglądowo granice wybuchowości paliw, w tym również paliw lotniczych),
- istnieją pola elektryczne o energii dostatecznej do wywołania zapłonu mieszanki par paliwa z powietrzem.

Jeżeli w czasie manipulacji paliwem wystąpi jednocześnie kilka z tych czynników, może nastąpić zapłon lub wybuch.



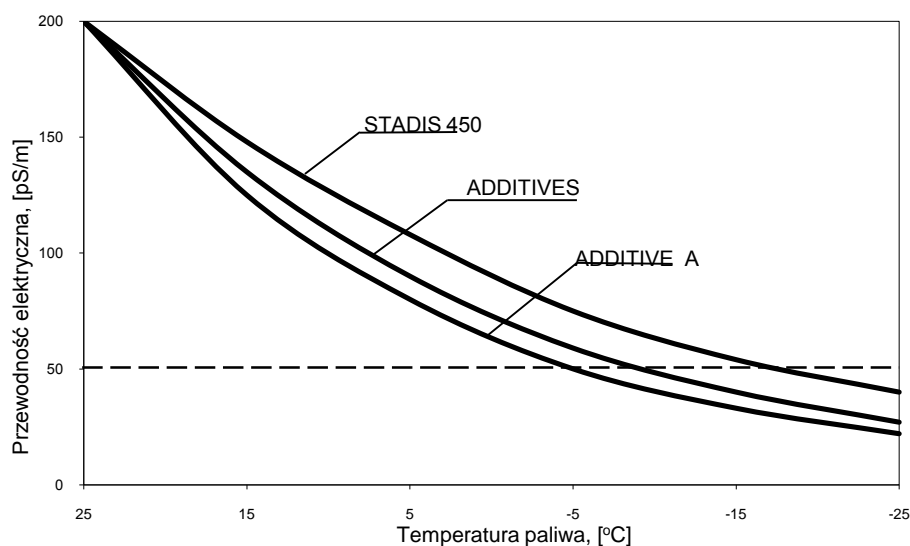
Rys. 3. Palność mieszanek paliwowo – powietrznych [7]

2. Wpływ temperatury na przewodność elektryczną paliw do turbinowych silników lotniczych

Wraz ze zmianą temperatury paliwa zmienia się również jego przewodność elektryczna. Wiąże się to z lepkością, ponieważ prędkość rozchodzenia się ładunków w cieczach zależy m.in. od lepkości.

Problemem praktycznym jest forma postawionego w dokumentach normatywnych wymagania dotyczącego tego parametru. Choć wiadomo, że jego wartość jest wprost uzależniona od temperatury paliwa w chwili pomiaru, to ani przy stawianiu wymagania normatywnego, ani w metodyce badania tej właściwości nie określono temperatury odniesienia. Prowadzi to do sytuacji, że aby produkt spełniał wymagania musi w chwili pomiaru (w temperaturze pomiaru równej temperaturze otoczenia, czyli w praktyce od około -30 do ponad $+30^{\circ}\text{C}$) posiadać przewodność elektryczną na właściwym poziomie. Temperatura nie ma teoretycznie żadnego wpływu na ocenę jego jakości. Ponadto istnieje wymóg prowadzenia badania bezpośrednio po pobraniu próbki (np. w czasie przygotowywania paliwa do tankowania). Takie podejście z jednej strony utrudnia ocenę produktu zwłaszcza w aspekcie jego oceny do długotrwałego przechowywania oraz eksploatacji w różnych warunkach temperaturowych, z drugiej – powoduje, że istnieje gwarancja zabezpieczenia właściwej ochrony przed elektrycznością statyczną w momencie napełniania zbiornika SP.

Producenci dodatków antyelektrostatycznych (SDA) deklarują, że wprowadzenie ich do paliwa zmniejsza wpływ niskich temperatur na przewodność. Jednak jak widać z rysunku 4 inhibitowanie nie rozwiązuje problemu.



Rys. 4 Zależność przewodności elektrycznej od temperatury oraz zastosowanego dodatku [8]

Nawet po zastosowaniu dodatku Stadis 450, po schłodzeniu paliwa, którego przewodność elektryczna w temperaturze 25 °C wynosi około 200 pS/m, do temperatury około -20 °C, wartość tego parametru uległa obniżeniu do wysokości eliminującej produkt z dalszego użycia. Stąd też zachodzi konieczność co najmniej zabezpieczenia odpowiednio wysokiej wartości wyjściowej.

3. Badania laboratoryjne

Przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych, które miały na celu określenie faktycznych przebiegów zmian przewodności elektrycznej wraz ze zmianą temperatury paliwa. Badaniu poddano różne paliwa:

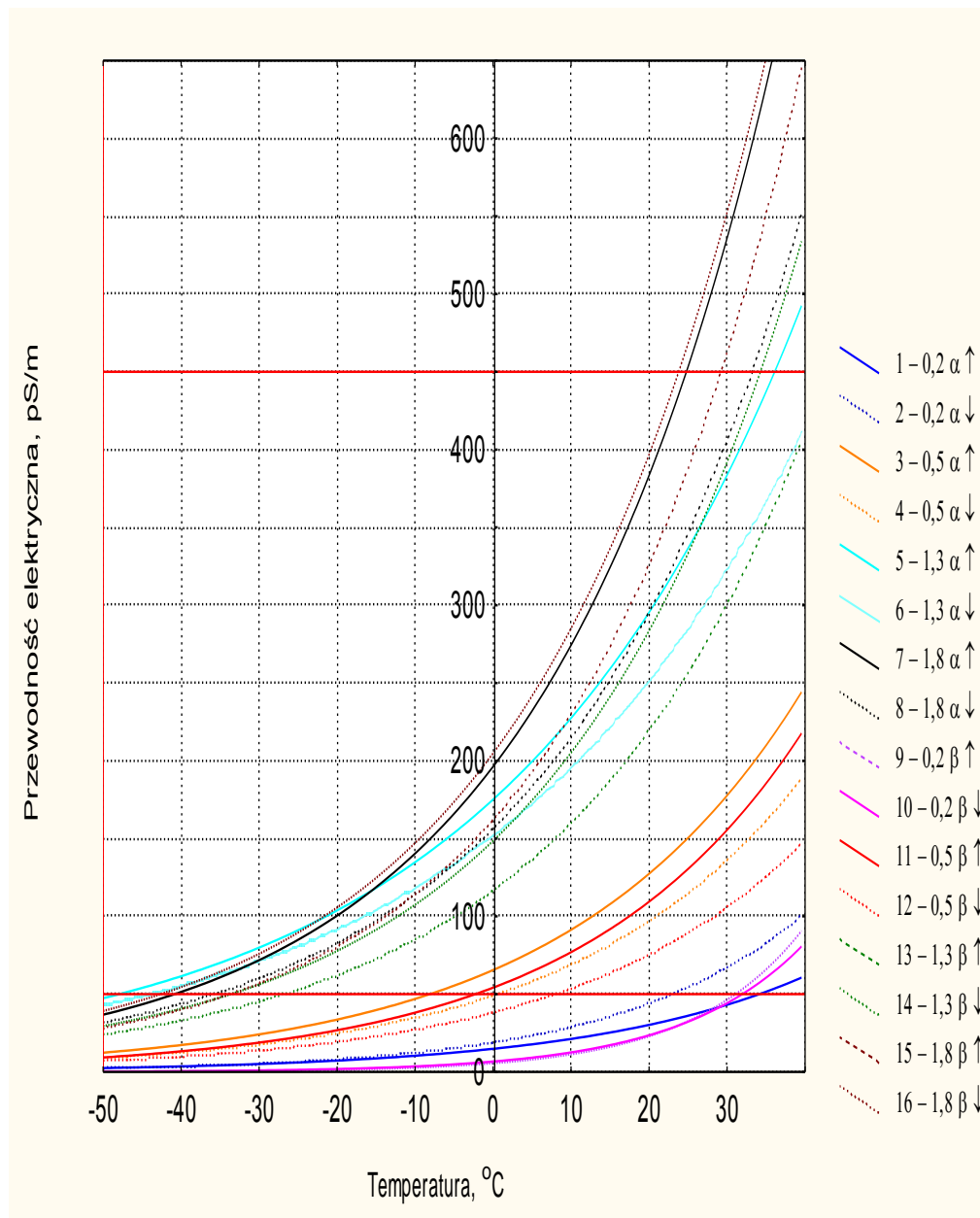
- pochodzące od różnych dostawców i produkowane wg różnych technologii,
- zawierające różną zawartość dodatku antyelektrostatycznego (SDA), a co za tym idzie różną „przewodność wyjściową”,
- zawierające wodę w różnej postaci lub inne zanieczyszczenia.

Stwierdzono, że w/w. czynniki mają wpływ na wartość ostateczną parametru. Mają one jednak charakter dość przypadkowy, co powoduje, że niemożliwe jest precyzyjne i jednoznaczne ustalenie uniwersalnej zależności opisującej badaną zależność. W razie konieczności ustalenie jej dla konkretnego paliwa, uzasadnione jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych.

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań dla paliwa stosowanego powszechnie w lotnictwie polskim [9, 10]. Próbki paliw o różnej przewodności elektrycznej umieszczano w łaźni termostatującej, w której zmieniano temperaturę w zakresie od -50 °C do +30 °C co 10 °C. Po termostatowaniu próbki przez 30 min., prowadzono pomiar przewodności elektrycznej. Badania prowadzono w dwóch kierunkach tzn. najpierw schładzając paliwo od temperatury +30 °C do temperatury -50 °C, a następnie ogrzewając je do temperatury +30 °C. Przykładowy przebieg tych zmian przedstawiono na rys. 5.

Z uzyskanych wyników widać, że:

- przewodność elektryczna paliwa maleje wraz ze spadkiem temperatury, aby następnie podczas ogrzewania wzrosnąć,
- przebieg tych zmian w obydwu przypadkach jest nieco różny. Daje się zauważyć tendencję, że podczas schładzania, wartości przewodności elektrycznej są niższe niż podczas ogrzewania. Zjawisko takie może być spowodowane tym, że spowalnianie ruchu ładunków elektrycznych podczas obniżania temperatury jest wolniejsze niż ich przyspieszenie w czasie ogrzewania paliwa,



Rys. 5 Wpływ temperatury na przewodność elektryczną paliwa do TSL (oznaczenia krzywych: liczba – zawartość dodatku SDA w ppm, \uparrow - ogrzewanie próbki, \downarrow - chłodzenie próbki, α - paliwo bez wody, β - paliwo z wodą rozpuszczoną i zawieszoną)

- przebieg zmian dla wszystkich paliw, bez względu na przewodność elektryczną ma podobny charakter, choć bezwzględne różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi w tej samej temperaturze, są większe dla paliw o wyższej przewodności elektrycznej. Jeżeli jednak rozpatruje się różnice względne, takich rozbieżności stwierdzić nie można. Ocenia się jednak, że występowanie tych różnic nie ma praktycznego znaczenia, ponieważ w rzeczywistości zmiany temperatury nie są ani tak regularne (jak w czasie prowadzenia badań laboratoryjnych), ani nie przebiegają w takim tempie. Faktycznie są one znacznie wolniejsze, jak również temperatura zarówno rośnie jak i maleje. Stąd też większe znaczenie praktyczne mogą mieć wyniki przedstawione na rys. 6, które są wartościami średnimi z pomiarów uzyskanych podczas zmian temperatury w obydwu kierunkach.

Na rys. 6 przedstawiono przebiegi zmian w odniesieniu do wartości średnich przewodności elektrycznej (zmierzonych podczas chłodzenia oraz ogrzewania). Otrzymano funkcję wykładniczą opisującą przebieg zmian przewodności elektrycznej (p) w zależności od temperatury (t) :

$$p(t) = (0,9 + 0,07 \cdot p_{20}) \cdot \exp(0,35 \cdot t) + \varepsilon ,$$

gdzie: p_{20} – przewodność elektryczna paliwa w temperaturze 20 °C, ε – losowy błąd związany z pomiarem.

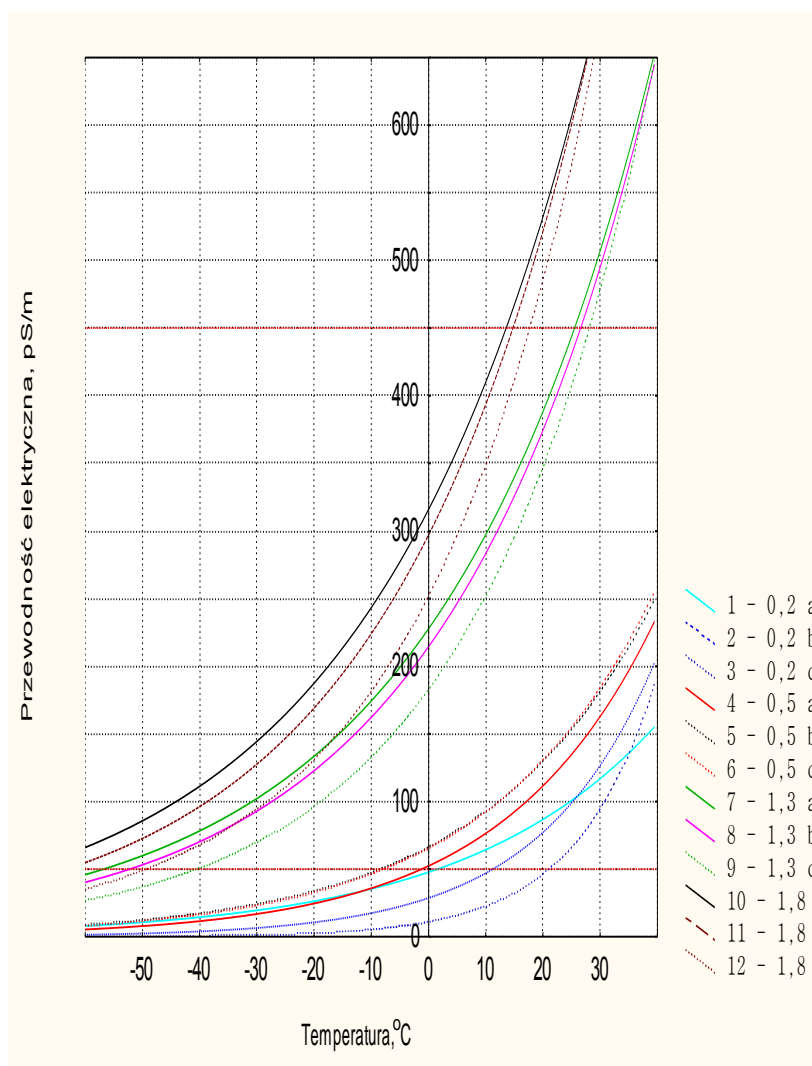
Należy jednakże zaznaczyć, że poprawność tej zależności potwierdziła się dla paliw jednakowego pochodzenia. Dla innej technologii, przebieg był nieco różny. Ponadto zależność ta nie potwierdziła się w pełni dla paliwa wykonanego wg tej samej technologii ale poddanego długotrwałemu przechowywaniu. Należy więc przyjąć, że powyższa zależność nie ma charakteru ogólnej, przez co w praktyce staje się mało przydatna. Stanowi jednakże podstawę do rozwinięcia problemu i dążenia do sprecyzowania zależności na poziomie możliwie jak najbardziej uniwersalnym.

4. Podsumowanie

Dopuszczenie paliwa do stosowania uwarunkowane jest spełnieniem przede wszystkim wymagań normatywnych. Dla przewodności elektrycznej jest to najczęściej zakres od 50 pS/m do 600 pS/m. Nasuwa się zatem pytanie kiedy zostaną one spełnione w każdym przypadku spotykanym w eksploatacji? Po przeanalizowaniu wyników, można stwierdzić, że:

- przy spadku temperatury poniżej $-30 \div -40$ °C, w każdym przypadku przewodność elektryczna zbliża się do granicy dopuszczalnej normą,

- a większości przypadków w temperaturze $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ spada poniżej wartości granicznej,
- dopiero zawartość dodatku SDA ponad 1 ppm zabezpiecza odpowiednią przewodność elektryczną w całym zakresie temperatury (na podstawie wykresów: rys. 5.6 i 5.7). Wydaje się zatem, że taka powinna być minimalna zawartość SDA dla badanej bazy paliwowej. Paliwa o niższej zawartości SDA nie gwarantują odpowiednich warunków eksploatacji.



Rys. 6 Wpływ temperatury na przewodność elektryczną paliwa do TSL (oznaczenia krzywych: liczba – zawartość dodatku SDA, ppm, a – paliwo bez wody, b – paliwo z wodą rozpuszczoną i zawieszoną, c – paliwo z wodą wolną)

Praktyka wykazuje, że w zbiornikach magazynowych, które w wojsku są najczęściej zbiornikami podziemnymi, temperatura paliwa wynosi około $5 \div 10$ °C. W okresie zimowym może ona się obniżyć, ale nie osiągnie wartości niższej niż -10 °C. W tych warunkach przewodność elektryczna paliwa zawierającego ponad 1 ppm SDA jest wyższa od dolnej granicy wymagań. Nawet jeżeli temperatura spadnie poniżej -20 °C, co może mieć miejsce np. podczas wydawania paliwa zimą na płycie lotniska, to przewodność elektryczna i tak jest wyższa niż 50 pS/m. Zgodnie z obowiązującymi zasadami, ostatnim punktem, w którym badane jest paliwo i w którym musi ono spełniać wymagania normatywne, jest pistolet nalezczy. W tym miejscu paliwo, które zawiera ponad 1 ppm SDA spełnia ten warunek. Nawet w temperaturze -50 °C jest to paliwo zgodne z normą i zabezpiecza jednocześnie właściwą przewodność elektryczną paliwa w czasie lotu SP. Nie ma praktycznego zagrożenia w zachowaniu się paliwa w warunkach lotniczych. Przy określeniu górnej granicy przewodności elektrycznej na poziomie 600 pS/m nie powinno dochodzić do przekroczenia tego parametru.

Zależność przewodności elektrycznej od temperatury jest zależnością pośrednią, związaną przede wszystkim z zależnością przewodności elektrycznej od lepkości oraz lepkości od temperatury. W eksploatacji jest to uproszczenie bardzo użyteczne. W praktyce, w warunkach kontroli lotniskowej, bardzo trudno zmierzyć lepkość produktu, natomiast bardzo łatwo jest zmierzyć jego temperaturę. Opisane powyżej wyniki badań mogą więc zostać wykorzystane do przybliżonego prognozowania przewodności elektrycznej w żądanej temperaturze w oparciu o przewodność elektryczną uzyskaną w temperaturze pomiaru pod warunkiem rozszerzenia badań w celu uzyskania większego stopnia uśrednienia, uwzględniającego większą ilość wymuszeń mających potencjalny wpływ na intensywność i charakter zmian.

5. Literatura

- [1] Schulze H.: Gefahren durch statische Aufladung in VK-Lagertanks. Dechema – Monografien nr 1370 – 1409, t. 12, ss. 375 ÷ 379, 1973
- [2] Harten H.U.: Ladungsübertritt an der Grenzfläche organischer Flüssigkeiten. Dechema – Monografien nr 1370 – 1409 t. 72 ss. 333 ÷ 342, 1973
- [3] Gajewski A.S.: Elektryczność statyczna – poznanie, pomiar, zapobieganie, eliminowanie. Instytut Wydawniczy Związków Zawodowych, Warszawa, 1987
- [4] Gacek Z., Maźniewski K.: Opis narażeń elektryzacyjnych w wybranych rurociągach przemysłowych. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, seria Elektryka, s. 164, Gliwice 1999
- [5] Howard J.C.: Elect. Eng. 77 (7), s. 610 (1958)

- [6] The effect of aviation fuels containing low amounts of static dissipater additive on electrostatic charge generation. Coordinating Research Council, Inc, CRC Report No. 590, Atlanta, USA, 1994
- [7] Antistatic additive for liquid hydrocarbons ASA-3. TB/M/3, W. Brytania, 1985
- [8] Stadis®450 Conductivity Additive (DINNSA Stabilizer). Octel America, 1998
- [9] Borgoń J., Dzięgielewski W.: Ocena zmian przewodności elektrycznej paliwa lotniczego w czasie przechowywania i dystrybucji, VI International Conference Aircraft and Helicopters` Diagnostics, Airdiag`99, Warszawa 1999, s. 111 – 117
- [10] Ocena wpływu zanieczyszczeń na przewodność elektryczną paliw do turbinowych silników lotniczych, Rozprawa doktorska, ITWL Warszawa, 2001



dr inż. Wojciech Dzięgielewski, absolwent Wojskowej Akademii Technicznej, w latach 1989-2000 pracownik badawczo – techniczny WOBR Sł. MPS. Od 2000 do 2005 zastępca dyrektora WOBR Sł. MPS. Aktualnie pracownik badawczo – techniczny ITWL. Doktor nauk technicznych. Przewodniczący KT 176 ds. Techniki Wojskowej i Zaopatrzenia. Specjalista w zakresie paliw i płynów eksploatacyjnych, szczególnie paliw lotniczych i biopaliw.