THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF JET FUELS F-34 AND F-35 (JET A-1) IN DISTRIBUTION

PRZEWODNOŚĆ ELEKTRYCZNA PALIW DO TURBINOWYCH SILNIKÓW LOTNICZYCH F-34 I F-35 (JET A-1) W ŁAŃCUCHU DYSTRYBUCYJNYM

Tomasz Bialecki

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
tomasz.bialecki@itwl.pl

Abstract: *The paper presents a changeability of electrical conductivity of jet fuels in distribution. Author described the methods used to prevent the formation of the dangers of static electricity. Research was carried out on two basic fuels used worldwide to power engines in civil (Jet A – 1) and military aircrafts (F – 34), during real fuel supplies in aviation military unit. Results of influence of temperature on the electrical conductivity of jet fuel are presented.*

Keywords: *static electricity, electrical conductivity, jet fuels, static dissipator additives*

Streszczenie: *Tematem publikacji jest zmienność przewodności elektrycznej paliw do turbinowych silników lotniczych w łańcuchu dystrybucyjnym. W publikacji przedstawiono metody zapobiegające powstawaniu niebezpieczeństw elektryczności statycznej. Badania, do których wykorzystano paliwa powszechnie stosowane do zasilania silników cywilnych (Jet A – 1) jak i wojskowym statków powietrznych (F – 34), prowadzone były w trakcie rzeczywistego zabezpieczenia paliwowego statków powietrznych w lotniczej jednostce wojskowej. Przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury na wartość przewodności elektrycznej paliwa do turbinowych silników lotniczych.*

Słowa kluczowe: *elektryczność statyczna, przewodność elektryczna, paliwa do turbinowych silników lotniczych, dodatek antyelektrostatyczny*

1. Wstęp

Paliwo lotnicze, jako źródło zasilania turbinowych silników statków powietrznych, musi spełniać wymagania jakościowe stawiane przez międzynarodowe specyfikacje (ASTM D 7566; DEF STAN 91 – 91, Issue 7 oraz AFQRJOS, Issue 28). Wśród parametrów normatywnych w wyżej wyszczególnionych dokumentach znajdują się takie, które nie mają bezpośredniego wpływu na proces spalania w turbinowym silniku lotniczym, ale składają się na bezpieczeństwo eksploatacji statków powietrznych. Jednym z tych parametrów jest przewodność elektryczna.

Celem niniejszej pracy było określenie zmian przewodności elektrycznej paliw do turbinowych silników lotniczych (TSL) w łańcuchu dystrybucyjnym.

2. Elektryczność statyczna

Ciecze węglowodorowe są złymi przewodnikami elektryczności – dielektrykami. Ich przewodność elektryczna jest znikoma. Jednocześnie posiadają właściwości generowania i gromadzenia ładunków elektryczności statycznej. Ładunki elektryczności statycznej powstają przede wszystkim podczas prowadzenia różnych operacji związanych z dystrybucją paliwa, tj.: przepływu przez rurociąg, filtry, pompy, rozbryzgiwanie w czasie tankowania, ruchów paliwa podczas transportu w cysternach oraz zbiornikach statków powietrznych, itp. Te z kolei mają skłonność do grupowania się i tworzenia w ten sposób pól elektrycznych. W miarę trwania ruchu paliwa, gęstość ładunków wzrasta i rośnie energia pola elektrycznego. Przy sprzyjających warunkach oraz gdy odprowadzenie ładunków z cieczy jest utrudnione lub wręcz niemożliwe, następuje nadmierny wzrost energii pól elektrycznych. Jeśli wystąpi różnica potencjałów między przewodnikami (paliwem i rurociągiem), to powstaje niebezpieczeństwo wyładowania elektrostatycznego w postaci iskry. Jeżeli energia wyładowania jest wystarczająco duża, może nastąpić zapłon łatwopalnych par paliwa.

Dynamiczne procesy powstawania ładunków elektrostatycznych podczas transportu mediów powodują, że jej mechanizm jest wieloparametrowy i trudny do opisu ilościowego. Ładunek elektryczny jest więc ładunkiem wypadkowym, stanowiącym wynik częstokroć wielu zjawisk przebiegających jednocześnie [1].

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). 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. 1 [2].

Rys. 1 Mechanizm rozdzielania ładunków elektrycznych w paliwie [2].

Zdolność paliwa do rozpraszania ładunków elektrycznych, tworzących się podczas dystrybucji (pompowania, filtrowania, itp.) jest określana jego przewodnością elektryczną, którą oznacza się w simensach na metr [S/m]. Jeżeli przewodność paliwa jest mniejsza niż 1 pS/m, co ma miejsce w przypadku bardzo wysokiej czystości, to zjawisko elektryzacji praktycznie nie występuje. Stan ten jest bardzo trudny do osiągnięcia i utrzymania, ponieważ każde paliwo zawiera cząstki odrębnej fazy w ilości powodującej jej elektryzację. Przenoszenie ładunków elektrycznych w cieczach węglowodorowych odbywa się głównie za pośrednictwem jonów, powstałych w wyniku reakcji dysocjacji i hydrolizy soli.

3. Przeciwdziałanie elektryczności statycznej

W celu uniknięcia niebezpieczeństw związanych z elektrycznością statyczną wykorzystuje się następujące środki:

- polegające na odprowadzeniu poza paliwo lub rozładowaniu ładunków:
  - uziemienie instalacji dystrybucyjno – magazynowej;
  - neutralizatory indukcyjne;
  - neutralizacja w czasie (czas relaksacji);
  - nanoszenie dodatków antyelektrostatycznych (środków powierzchniowo czynnych) na powierzchnię wewnętrzną instalacji, np. zbiornika;
- polegające na modyfikacji paliwa poprzez polepszenie przewodnictwa prądu elektrycznego i poprawę w ten sposób warunków odprowadzania ładunków:
  - wprowadzenie dodatków antyelektrostatycznych.

Dodatkowo gromadzenie ładunków elektryczności statycznej można ograniczyć poprzez:

- ograniczenia szybkości przepływu paliwa;
- zastosowanie odpowiedniej instalacji dystrybucyjno – magazynowej (rurociągi przewodzące, wprowadzanie rurociągów do zbiorników tuż nad dnem, eliminacja zbędnych zwężeń i reduktorów);
- zapobieganie zawadnieniu paliwa;
- eliminowanie zjawisk i procesów generujących ładunki statyczne (rozbryzgiwanie paliwa, tankowanie do całkowicie opróżnionych zbiorników).

Zastosowanie dodatku antyelektrostatycznego to jedyny znany sposób rozładowania ładunków statycznych w paliwie samolotu będącego w powietrzu (bez kontaktu z ziemią). Jego działanie polega na zwiększeniu objętościowej, właściwej przewodności elektrycznej paliwa, co polepsza odprowadzanie ładunków z całej jego objętości. Są to środki powierzchniowo czynne, mające strukturę ambiwalentną tj. zawierającą część hydrofilową i hydrofobową. Jednakże działanie środków antystatycznych nie jest dokładnie wyjaśnione.

Dokumenty normatywne stosowane w Siłach Zbrojnych RP (NO-91-A258-2 oraz NO-91-A258-4) dotyczące jakości paliw do turbinowych silników lotniczych wskazują na zachowanie przewodności elektrycznej w przedziale 50 – 450 pS/m dla F – 35 oraz 50 – 600 pS/m dla F – 34. Przewodność elektryczna paliwa większa niż 50 pS/m, gwarantuje właściwe odprowadzanie ładunków z paliwa. Natomiast wartość tego parametru powyżej 600 pS/m może powodować zakłócenia w działaniu urządzeń pokładowych zawierających elementy półprzewodnikowe. Dodatkowo stwierdzono również, że przedozowanie dodatku może wpłynąć negatywnie na wskaźnik wydzielania wody (MESP).

Dozowanie dodatku antyelektrostatycznego do paliw do TSL odbywa się na etapie produkcji paliwa w rafinerii. Stężenie dodatku w nowo wyprodukowanych partiach paliwa nie powinno przekraczać 3,0 mg/dm³. Niemniej jednak w przypadku stwierdzenia obniżenia wartości tego parametru poniżej dolnej granicy normy NO-91-A258, dopuszczalnym jest uzupełnianie dodatku u użytkownika w ilości 2,0 mg/dm³.

4. Przewodność elektryczna paliw na drodze dystrybucji

W celu sprawdzenia przewodności elektrycznej paliw na drodze dystrybucji przeprowadzono badania tego parametru w lotniczej jednostce wojskowej w następujących systemach:

- pomiar w warunkach laboratoryjnych po dostawie cysterny do jednostki;
- codzienny pomiar na płaszczyźnie postoju cystern – dystrybutorów paliwowych, na drodze dystrybucji paliwa od czasu przyjęcia do jednostki aż do wydania do zbiorników statków powietrznych.

Dostawy paliw do TSL do jednostki wojskowej realizowane były z następujących źródeł zaopatrzenia:

- dostawca cywilny – paliwo F-35 (Jet A-1) przeznaczone do bezpośredniego zużycia;
- dostawca wojskowy:
  - skład materiałowy – paliwo F – 34 przeznaczone do przechowywania;
  - inna jednostka wojskowa – paliwo F-34 + dodatek S – 1745 przeznaczone do bezpośredniego zużycia.

Charakterystyczną cechą jednostki wojskowej, w której prowadzono badania jest fakt, że nie posiada ona lotniskowego składu paliw, natomiast paliwo lotnicze od chwili dowozu do czasu wydania do zbiorników statków powietrznych jest przechowywane w cysternach dystrybutorach paliwowych. Powoduje to większy wpływ czynników zewnętrznych na paliwo (np. temperatury, wilgotności powietrza, zanieczyszczeń), niż ma to miejsce w przypadku zbiorników podziemnych.

Pomiar przewodności elektrycznej w warunkach laboratoryjnych po transporcie cysterny do jednostki wojskowej

W czasie dostaw paliw do turbinowych silników lotniczych do jednostki wykonywano pomiar przewodności elektrycznej w warunkach laboratoryjnych, według następującej metodyki:

- miejsce pomiaru: lotniskowe laboratorium służby materiałów pędnych i smarów;
- pomiar: do 30 minut od momentu pobrania próbki;
- urządzenie pomiarowe: cyfrowy miernik przewodności model 1152;
- naczynie pomiarowe: metalowy pojemnik o pojemności 1 litra.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów przewodności elektrycznej w trakcie dostaw paliw do TSL do jednostki wojskowej (rys. 3, rys. 4) oraz w odniesieniu do wartości tego parametru określonego przez dostawcę na dokumencie jakości (rys. 2), wykonane w latach 2011 – 2014.

Rys. 2 Wartości przewodności elektrycznej w czasie dostaw paliw do jednostki w odniesieniu do wartości tego parametru deklarowanego przez dostawcę

The electrical conductivity of jet fuels F-34 and F-35 (JET A-1) in distribution
Przewodność elektryczna paliw do turbinowych silników lotniczych F-34 i F-35...

Na podstawie powyższego można stwierdzić, że:

- 89% dostaw paliw F – 34 oraz 81% F – 34 + dodatek S – 1745 wykazywało w jednostce wojskowej wyższą przewodność elektryczną niż określał to dokument jakości dostawcy;
- 86% dostaw paliw F – 34 wykazywało niską przewodność elektryczną dostawcy (nie wyższą niż 75 pS/m), przy czym w przypadku 49% dostaw wartość ta była w zasadzie na granicy dopuszczalności (52 pS/m), co w przypadku paliw przeznaczonych do przechowywania wydaje się wartością niską.

Rys. 3 Histogram rozrzutu wartości przewodności elektrycznej paliwa (zmierzonej w jednostce).

Rys. 4 Histogram rozrzutu wartości przewodności elektrycznej (wg deklaracji dostawcy).

Poniżej przedstawiono wyniki opisowe analizy statystycznej dla dwóch wyżej rozpatrywanych przypadków.

Tabela 1. Statystyki opisowe wyników pomiarów przewodności elektrycznej (dla wszystkich pomiarów).

Zmienna	Liczba zdarzeń	Średnia	Granice przedziału ufności dla wsp. ufności 0,95		Mediana	Minimum	Maksimum	Rozstęp	Odchylenie standardowe	Błąd standardowy
			dolna	górną						
Przewodność dostawcy	200,3	171,2	229,4	183,0	52,0	478,0	426,0	135,0	14,6	200,3
Przewodność zmierzona	230,5	206,1	254,9	235,0	50,0	544,0	494,0	113,1	12,3	230,5

Mając na uwadze, że zgodnie z dokumentami normatywnymi stosowanymi w Siłach Zbrojnych RP (NO-91-A258-2 oraz NO-91-A258-4) oznaczanie przewodności elektrycznej wykonuje się w temperaturze otoczenia, natomiast w świadectwie jakości podaje się temperaturę pomiaru i wartość przewodności, podjęto próbę sprawdzenia korelacji pomiędzy tymi zmiennymi. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Korelacje przewodności elektrycznej paliwa od temperatury (dla wszystkich pomiarów z różnych dostaw tej samej partii).

Partia paliwa [przewodność elektryczna]	Zmienna	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik korelacji Pearsona	Współczynnik determinacji	Obliczony poziom istotności dla testu	Liczba zdarzeń
52 pS/m w 19°C	przewodność	22,633	4,412				
	temperatura	135,000	42,966	0,065	0,004	0,798	18
75 pS/m w 9°C	przewodność	17,929	3,222				
	temperatura	93,214	21,466	0,390	0,152	0,169	14
264 pS/m w 18°C	przewodność	20,500	1,225				
	temperatura	273,500	24,263	0,192	0,037	0,716	6

Z wartości współczynnika korelacji Pearsona wynika, że nie wystąpiła zależność przewodności elektrycznej od temperatury paliwa. Na powyższe mogły mieć wpływ: czas przechowywania w zbiornikach magazynowych, ilość wykonanych manipulacji, w tym transport paliwa do jednostki wojskowej, a także potencjalne zanieczyszczenie lub/i zawodnienie paliwa.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów przewodności elektrycznej w trakcie dostaw paliwa do TSL do jednostki – partia o przewodności elektrycznej 52 pS/m w temperaturze 19°C.

The electrical conductivity of jet fuels F-34 and F-35 (JET A-1) in distribution
Przewodność elektryczna paliw do turbinowych silników lotniczych F-34 i F-35...

Rys. 5 Wartość przewodności elektrycznej w momencie dostawy paliwa do jednostki.

Biorąc pod uwagę dostawy paliwa do turbinowych silników lotniczych pochodzących z jednej partii produkcyjnej można stwierdzić, że występują rozbieżności w deklarowanej przez dostawcę wartości przewodności elektrycznej od wartości zmierzonych w jednostce, a także pomiędzy poszczególnymi pomiarami z kolejnych dostaw.

Codzienny pomiar przewodności elektrycznej na płaszczyźnie postoju cystern dystrybutorów paliwowych w łańcuchu dystrybucji

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów przewodności elektrycznej w trakcie dystrybucji paliwa w jednostce – partia o przewodności elektrycznej 138 pS/m w temperaturze 27°C.

Rys. 6 Zmiana przewodności elektrycznej paliwa na drodze dystrybucji.

Pomiaru przewodności paliw do TSL w łańcuchu dystrybucji, od momentu przyjęcia do jednostki wojskowej do czasu wydania do zbiorników statków powietrznych, wykonywano według następującej metodyki:

- miejsce pomiaru: płaszczyzna postoju cystern dystrybutorów paliwowych;
- pomiar: do 3 minut od momentu pobrania (w ramach lotniskowej kontroli czystości paliw);
- urządzenie pomiarowe: cyfrowy miernik przewodności model 1152;
- naczynie pomiarowe: metalowy pojemnik o pojemności 1 litra;
- mieszanie partii paliw: po przyjęciu dostawy nie mieszano paliw między zbiornikami, a pomiar przewodności elektrycznej odbywał się do całkowitego opróżnienia zbiornika cysterny paliwowej.

Analiza wyników wykazuje, że w trakcie dystrybucji paliw w jednostce wojskowej przewodność elektryczna charakteryzowała się dużymi wahaniami. Niemniej jednak w 93% dostaw paliw parametr ten w ostatnim dniu badania był mniejszy niż w momencie dostawy (pierwszy pomiar w jednostce).

Poniżej przedstawiono wyniki opisowe analizy statystycznej dla wszystkich pomiarów z różnych dostaw tych samych partii.

Tabela 3. Korelacje przewodności elektrycznej paliwa od temperatury (dla wszystkich pomiarów z różnych dostaw tych samych partii).

Partia paliwa [przewodność elektryczna]	Zmienna	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik korelacji Pearsona	Współczynnik determinacji	Obliczony poziom istotności dla testu	Liczba zdarzeń
138 pS/m w 27°C	przewodność	13,909	5,416				
	temperatura	115,333	27,381	0,799	0,638	0,000	33
183 pS/m w 20°C	przewodność	15,368	3,316				
	temperatura	187,579	58,299	0,517	0,267	0,001	38
198 pS/m w 17°C	przewodność	15,615	3,827				
	temperatura	165,038	42,175	0,871	0,758	0,000	26
320 pS/m w 24°C	przewodność	19,667	3,464				
	temperatura	266,000	31,008	0,364	0,133	0,335	9
381 pS/m w 24°C	przewodność	20,700	2,541				
	temperatura	407,100	62,848	-0,126	0,016	0,728	10

Poniżej przedstawiono wyniki opisowe analizy statystycznej – badania dla poszczególnych dostaw przy pominięciu przewodności dostawcy.

Tabela 4. Korelacje przewodności elektrycznej paliwa od temperatury (badania dla poszczególnych dostaw przy pominięciu przewodności dostawcy).

Partia paliwa [przewodność elektryczna]	Zmienna	Średnia	Odczylenie standardowe	Współczynnik korelacji Pearsona	Współczynnik determinacji	Obliczony poziom istotności dla testu	Liczba zdarzeń
198 pS/m w 17°C	przewodność	16,200	2,775				
	temperatura	183,400	22,165	0,933	0,871	0,020	5
138 pS/m w 27°C	przewodność	13,250	1,893				
	temperatura	89,500	10,724	0,156	0,024	0,844	4
381 pS/m w 24°C	przewodność	20,333	2,398				
	temperatura	410,000	65,947	-0,068	0,005	0,862	9
183 pS/m w 20°C	przewodność	15,769	2,803				
	temperatura	168,000	73,454	0,637	0,405	0,019	13
198 pS/m w 17°C	przewodność	15,556	4,586				
	temperatura	173,889	43,349	0,878	0,770	0,002	9
320 pS/m w 24°C	przewodność	19,125	3,271				
	temperatura	259,250	25,104	0,087	0,007	0,839	8
183 pS/m w 20°C	przewodność	16,125	2,588				
	temperatura	227,500	62,113	0,450	0,203	0,263	8
183 pS/m w 20°C	przewodność	13,400	3,134				
	temperatura	181,200	34,208	0,642	0,412	0,045	10
198 pS/m w 17°C	przewodność	15,273	4,027				
	temperatura	146,455	44,939	0,952	0,907	0,000	11
138 pS/m w 27°C	przewodność	13,125	5,276				
	temperatura	123,000	28,596	0,954	0,911	0,000	8
183 pS/m w 20°C	przewodność	14,800	4,025				
	temperatura	178,800	25,859	0,999	0,997	0,000	5
138 pS/m w 27°C	przewodność	11,571	2,637				
	temperatura	94,000	10,083	0,740	0,547	0,057	7
138 pS/m w 27°C	przewodność	12,286	5,823				
	temperatura	122,571	23,860	0,962	0,925	0,001	7

W literaturze [1,2] wskazuje się na istnienie zależności przewodności elektrycznej od temperatury paliwa. Jednakże codzienny pomiar parametru na płaszczyźnie postoju cystern – dystrybutorów paliwowych w łańcuchu dystrybucji paliw nie potwierdził tej zależności. Niezaprzeczalnym jest, że w przypadku wybranych dostaw paliw do jednostki stwierdzono silną korelację pomiędzy tymi zmiennymi, jednakże taka zależność nie jest normą.

Nie podjęto próby powiązania przewodności elektrycznej badanych paliw od innych zmiennych, np. czasu przechowywania (kolejny dzień pomiaru) czy ilości paliwa w zbiorniku (manipulacje produktem), ze względu na fakt, że pomiary wykonywane były w różnych temperaturach, a tym samym warunki przechowywania były różne.

5. Podsumowanie

Dopuszczenie paliw do tankowania statków powietrznych jest poprzedzane kontrolami jakości (laboratoryjnymi, magazynowymi i lotniskowymi), które mają zapewnić dostarczenie produktu spełniającego wszystkie wymagania zgodnie z dokumentami normatywnymi.

Przedstawione wyniki badań wykazały, że przewodność elektryczna paliw na całej drodze dystrybucji w jednostce wojskowej zawierała się w przedziale, pozwalającym na stosowanie go w lotnictwie. Było to wynikiem zastosowania odpowiedniej ilości dodatku antyelektrostatycznego.

Dodatkowo po wykonanej analizie wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

- zmiany przewodności przechowywanych paliw są duże i nieregularne;
- 72% dostaw charakteryzowało się wyższą przewodnością elektryczną paliw w miejscu dostawy niż deklarował to dostawca;
- paliwa pochodzące ze składu materiałowego (przeznaczone do przechowywania) posiadały najniższe wartości przewodności elektrycznej;
- nie stwierdzono zależności pomiędzy przewodnością elektryczną a temperaturą paliw. Nie oznacza to jednak, że takiej zależności nie ma. Na taki wynik mogły mieć wpływ następujące czynniki: wilgotność powietrza (obecność wody w paliwie), zawartość dodatku antyelektrostatycznego, ilość przeprowadzonych manipulacji, czas od chwili pobrania próbki do wykonania pomiaru oraz warunki wykonania pomiaru.

Dalszy kierunek badań nad przewodnością elektryczną paliw do turbinowych silników lotniczych należałoby skierować na pomiar tego parametru w łańcuchu dystrybucyjnym, z uwzględnieniem tego samego rodzaju i czasu operacji. Ze względów praktycznych takie badania eksploatacyjne są nierealne, ze względu na m. in. różny czas tankowania statków powietrznych (spowodowany potrzebą uzupełniania konkretnej ilości paliwa). W związku z powyższym wskazanym byłoby przeprowadzenie takich badań w warunkach modelowych, wyznaczając jedną cysterną dystrybutor paliwowy, do wykonywania tych samych manipulacji na różnych partiach produktu.

6. Literatura

- [1] Dzięgielewski W.: Wpływ temperatury na przewodność elektryczną paliw do turbinowych silników lotniczych, Journal of Konbin 1(17) 2011.
- [2] Górská K., Górski W.: „Napędy lotnicze. Materiały Pędne i Smary”, WKiŁ, Warszawa, 1986.
- [3] Norma Obronna NO-91-A258-2 Materiały pędne i smary – Paliwo do turbinowych silników lotniczych – Paliwo kod NATO F – 34.
- [4] Norma Obronna NO-91-A258-4 Materiały pędne i smary – Paliwo do turbinowych silników lotniczych – Paliwo kod NATO F – 35.

***mjr mgr inż. Tomasz Bialecki**, absolwent Wojskowej Akademii Technicznej, w latach 2010 – 2014 r. Szef Służby Materiałów Pędnych i Smarów w lotniczej jednostce wojskowej. Od 2014 r. pracownik Zakładu Materiałów Pędnych i Smarów ITWL.*