



BADANIA ELEKTRYZACJI OBIEKTÓW PRZELATUJĄCYCH PRZEZ DYMY POŻAROWE

EXAMINATION OF ELECTRIFICATION OF OBJECTS FLYING THROUGH FIRE FUMES

Andrzej DŁUGOŁĘCKI, Andrzej FARYŃSKI, Zbigniew ZIÓŁKOWSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych - *Air Force Institute of Technology*
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, Poland

Author's e-mail: andrzej.farynski@itwl.pl; ORCID: 0000-0003-1232-2747

DOI 10.5604/01.3001.0015.2528

Streszczenie: Najpierw za pomocą specjalnej klatki Faraday'a mierzono własny ładunek elektryczny modelowego źródła dymu pożarowego. Gęstość objętościowa tego ładunku o znaku zmiennym od miejsca do miejsca nie przekraczała $\pm 3 \text{ nC/m}^3$. Następnie przez tak wytworzony obłok dymu strzelano specjalnymi pociskami duralowymi o średniej prędkości około 150 m/s. Pociski kończyły lot w tarczy – elektrodzie połączonej z elektrometrem, której oddawały ładunek elektryczny zebrany w czasie przelotu. Wyznaczona gęstość prądu elektryzacji pocisków, wynosząca $30\div 400 \mu\text{A/m}^2$, sugerowała zbieranie ładunku drogą triboelektryzacji, a nie przez przejmowanie własnego ładunku elektrycznego dymu.

Słowa kluczowe: dymy pożarowe, elektryzacja

1. Wstęp

W prowadzonych, w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych, badaniach (ITWL) [1] wykazano, iż podczas przelotu statku powietrznego przez obłoki pyłów powybuchowych występuje zjawisko silnej elektryzacji (prąd elektryzacji wielokrotnie przekracza prądy występujące przy przelo-

Abstract: Firstly, a special Faraday cage was used to measure the own electric charge for a model source of fire fumes. The spatial density of the charge, having the sign changing from place to place, does not exceed $\pm 3 \text{ nC/m}^3$. Then, special duralumin projectiles were fired through the produced cloud of fumes with the mean velocity of ca. 150 m/s. The projectiles terminated the flight in a target, the electrode connected to an electrometer, which collected the electric charge accepted during the flight. The established density of the electrification current for projectiles was $30\div 400 \mu\text{A/m}^2$ what suggests that the charge was collected in the way of triboelectrification rather than by the interception of the fume's own electric charge.

Keywords: fire fumes, electrification

1. Introduction

Investigations carried out by the Air Force Institute of Technology (AFIT) [1] indicate that an effect of strong electrification occurs during the flight of an aerial vehicle through the clouds of post-explosion dusts (the current of electrification significantly exceeds the currents existing at flying

cie przez chmury). Zebrany ładunek elektryczny może w pewnych warunkach istotnie zakłócić działanie systemów pokładowych statku powietrznego i/lub przenoszonego uzbrojenia.

Wykazano również [2] – [8], że obłoki pyłów powybuchowych posiadają własny dodatni ładunek elektryczny, zaś dominującym mechanizmem elektryzacji ciała, przelatującego przez taki obłok, jest przechwyt (zbieranie) ładunku elektrycznego z obłoku.

W opisanych tam eksperymentach zajmowano się nieco innym mechanizmem elektryzowania pyłów, niż dość szeroko badana triboelektryzacja [9], [10].

Wyznaczona dla obłoków pyłów powybuchowych gęstość objętościowa ładunku elektrycznego zawierała się w zakresie od kilkunastu do kilkuset nC/m^3 . Podczas przelotu przez tego typu obłoki z prędkościami ok. 200 m/s gęstość prądu elektryzacji (zarówno triboelektryzacji jak i przejmowania ładunku z naładowanych cząstek pyłu) może osiągnąć wartość od kilkudziesięciu do kilkuset $\mu A/m^2$.

Nad polem walki oprócz pyłów powybuchowych oraz pyłów wywołanych podmuchami wiatru lub silną cyrkulacją termiczną mogą występować w znacznym stężeniu dymy pożarowe. W związku z tym istotne stało się określenie zagrożeń wynikających z elektryzacji podczas przelotu również przez te dymy.

2. Metoda wyznaczania gęstości objętościowej ładunku elektrycznego dymów pożarowych

Po przeprowadzonych analizach możliwości pomiaru ładunku elektrycznego dymów pożarowych, uwzględniających specyfikę tych pomiarów (głównie duże lokalne różnice w gęstości dymów, łatwe przemieszczanie i zmiany kierunku ruchu z prędkością wiatru) oraz konieczność zminimalizowania wpływu zjawiska triboelektryzacji w proce-

through the clouds). The accumulated electric charge may at certain circumstances interfere strongly with operation of onboard systems of the aerial vehicle and/or with the onboard weapon systems.

It was also shown [2] – [8] that the clouds of post-explosion dusts have own positive electric charge, and the interception (collection) of the electric charge from the cloud is the dominating mechanism of electrification for a body travelling through the cloud.

The experiments presented there deal with a bit different mechanism of electrification of dusts than the triboelectrification which was widely investigated [9], [10].

The spatial density of electric charge determined for the clouds of post-explosion dusts was in the range of a few to few hundred nC/m^3 . When the clouds of such type are crossed with the velocities ca. 200 m/s, then the density of the electrification current (both of triboelectrification and interception of charges from the charged particles of dust) may reach the values from a few dozen to a few hundred $\mu A/m^2$.

The fire fumes of significant intensity may appear over the combat field apart of the post-explosion dusts and the dusts produced by the gusts of wind or by a strong thermal circulation. For this reason it is essential to identify the threats effected by the electrification at travelling across these fumes, as well.

2. Identification Method for Spatial Density of Electric Charge of Fire Fumes

The probing of the cloud of fumes by a Faraday cage with transparent structure was accepted as a suitable method for identification of the spatial density of the electric charge of fire fumes after studying the possibilities for measurements of electric charge of fire fumes, and considering the specificity of these measurements (mainly the great

sie pomiaru - jako metodę pozwalającą na wyznaczenie objętościowej gęstości ładunku elektrycznego dymów pożarowych przyjęto sondowanie obłoku dymów za pomocą puszek (klatki) Faraday'a o ażurowej konstrukcji.

Projektując wspomnianą klatkę pomiarową szczególną uwagę zwracano na uzyskanie maksymalnie możliwej jej „przezroczystości” (tzn. jak największego stosunku powierzchni ściany do pola powierzchni materiału (drutów), z którego zbudowano klatkę).

Opracowana i wykonana pomiarowa klatka Faraday'a (rys.1) składała się z dwóch sześcianów: sześcian o mniejszych wymiarach zawieszony został za pomocą igielitowych (izolacyjnych) tasiemek wewnątrz sześcianu o większych wymiarach, pełniącego rolę ekranu zewnętrznego, uziemionego przez ekran koncentrycznego kabla pomiarowego.

Długość boku sześcianu zewnętrznego wynosiła 26 cm, długość boku sześcianu wewnętrznego - 20 cm, co dawało objętość klatki $V_k \approx 0,008 \div 0,01\text{m}^3$. Krawędzie obu sześcianów wykonano z rurki miedzianej o średnicy zewnętrznej $\varnothing 2\text{ mm}$. Ściany sześcianów stanowiły srebrzone druty miedziane o średnicy $\varnothing 0,2\text{ mm}$, ułożone równoległe ze skokiem 10 mm.

local differences of densities of the fumes, their free movement in changeable directions depending on the velocity of wind) both with a necessity for reducing the influence of triboelectrification effect onto the process of measurement.

Special attention was put at the designing of the mentioned measurement box to getting its possibly highest transparency (i.e. the highest ratio between the surface of the wall to the surface of material (wires) used for building the box).

The Faraday box which was designed and made (Fig. 1) consists of two cubes: a smaller cube was suspended by plastic straps (isolators) inside of a larger cube having the greater size and being the external screen which is grounded by the screening covering of the concentric measurement wire.

The length of external cubic side wall was 26 cm, the length of internal side was - 20 cm, what produces the capacity of the box $V_k \approx 0.008 \div 0.01\text{m}^3$. The edges of two cubes were made of a brass pipe with external diameter $\varnothing 2.0\text{ mm}$. The walls of the cubes were made of copper wires covered by silver with diameter $\varnothing 0.2\text{ mm}$ set in parallel arrangement by 10 mm separation.



Rys. 1. Widok pomiarowej klatki Faraday'a

Fig. 1. View of the Faraday measurement box

Taka konstrukcja klatki pomiarowej pozwalała na łatwe jej wprowadzanie w obłok dymów bez wywoływania większych zawirowań oraz zapewniała minimalną powierzchnię styku cząstek dymów z materiałem klatki (metalem), przez co zminimalizowany został wpływ triboelektryzacji na wynik pomiarów.

3. Pomiar ładunku elektrycznego dymów pożarowych

Badania przeprowadzono na zewnątrz budynku laboratorium w miejscu osłoniętym od wiatru (co nie eliminowało jednak lokalnych niewielkich ruchów powietrza z różnych kierunków).

Dym pożarowy wytwarzano w trakcie spalania ułożonej na ruszcie metalowym mieszaniny następujących materiałów: drewno, papa dachowa, papier, ścinki materiałów włókienniczych, ścinki płytek PCW. Są to materiały spalające się w czasie rzeczywistych pożarów.

W obszar dymu na wysokości ok. 1,5 m wprowadzano powoli (z prędkością ok. 0,5 m/s) zawieszoną na drewnianej listwie pomiarową klatkę Faraday'a. W trakcie jednego pomiaru czynność powolnego wprowadzania w obłok dymu i wyprowadzania klatki pomiarowej z obłoku dymu powtarzano kilkakrotnie.

Klatka połączona była kablem koncentrycznym z elektrometrem pomiarowym ze wzmacniaczem odwracającym o wzmacnieniu $k = 100$ (20 dB), rezystancji wejściowej $R_{IN} = 10 \text{ G}\Omega$ i pojemności wejściowej $C_{IN} = 10 \text{ nF}$.

Sygnal u_{EL} z wyjścia elektrometru w funkcji czasu skanowania obłoku rejestrowano za pomocą oscyloskopu cyfrowego. Elektrometr i oscyloskop posiadały autonomiczne zasilanie bateryjne, zapewniające uniknięcie zakłócającego pomiar przydzwięku sieciowego.

Uzyskane dane pomiarowe przeliczano za pomocą arkusza kalkulacyjnego Excel na wartości objętościowej gęstości ładunku elektrycznego q dymu zawartego wewnątrz pomiarowej

Such design of the measurement box facilitates its deployment in the clouds of fumes without causing serious vortices, and reduces the contacting surface between the material of the box (metal) and the particles of fumes, what makes the influence of triboelectrification on the measurements become minimal.

3. Measurement of the Electric Charge for Fire Fumes

Investigations were carried out outside of the laboratory building in the space protected against the wind (but small local movements of the air in different directions were still present).

The fire fume was produced when a composition containing such materials as wood, roof asphalt-impregnated paper, paper, cuts of fabrics, cuts of PVC plates was burnt on a metallic grate. These materials usually burn at real fires.

The Faraday measurement box was suspended on a wooden stick at ca. 1.5 m above the ground and was introduced slowly (at velocity of ca. 0.5 m/s) into the zone of the fire. One measurement cycle contained a few slow movements into and out of the cloud of fumes.

The box was connected via a concentric wire with the measurement electrometer consisting of a reversible amplifier with amplification of $k = 100$ (20 dB), input resistance $R_{IN} = 10 \text{ G}\Omega$ and input capacity $C_{IN} = 10 \text{ nF}$.

Signal u_{EL} from the electrometer output was recorded on a digital oscilloscope as a time function at scanning the cloud. The electrometer and oscilloscope were powered from autonomous batteries to avoid the interference of the mains with the measurement.

The received measurement data was recalculated by using Excel calculating sheets on values of the spatial density of the electric charge q included inside the Faraday

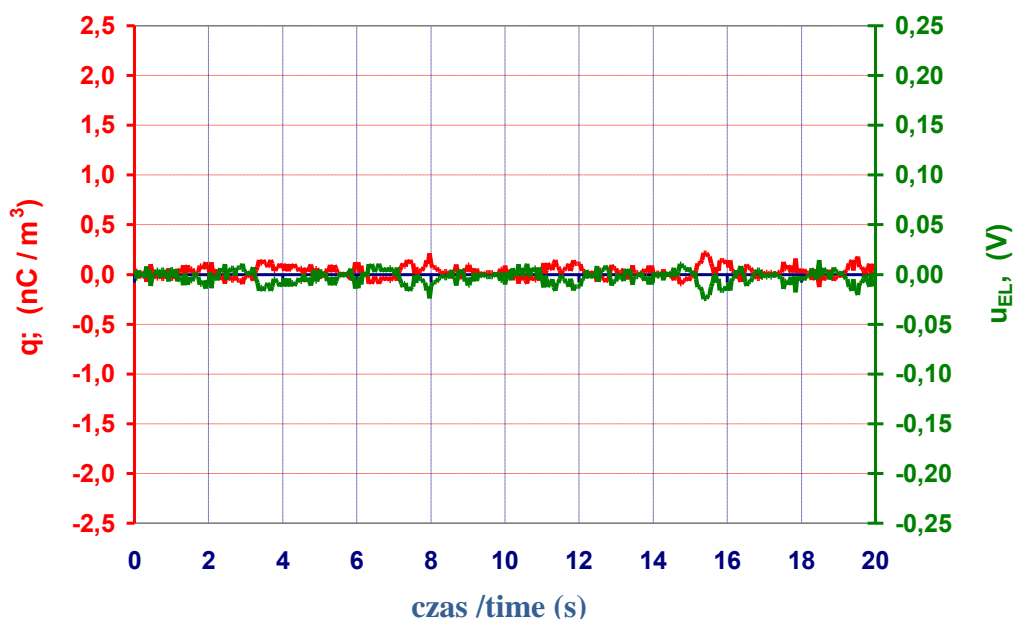
klatki Faraday'a według wzoru:

measurement box according to formula:

$$q = C_{IN} \times u_{EL} / V_k / k.$$

Wyniki obliczeń zobrazowano na rys. 2–7.

Results of measurements are shown in figures 2–7.



Rys. 2. Sygnał rejestrowany w trakcie przemieszczania pomiarowej klatki Faraday'a i obliczona gęstość ładunku w czystym (niezadymionym) powietrzu

Fig. 2. Signal recorded at displacement of the Faraday measurement box and calculated density of the charge for clear (without any fumes) air

Początkowe pomiary w czystym (niezadymionym) powietrzu, których przykładowy wynik przedstawia rysunek 2, dały wartość $|q| < 0.25 \text{ nC/m}^3$, zawierającą się w granicach dokładności toru pomiarowego – rejestrowane sygnały miały poziom porównywalny z własnym szumem zestawu pomiarowego.

Następna seria badań dotyczyła obszaru dymów o średnim zagęszczeniu; oceniana wizualnie przezroczystość obłoku dymu o grubości w kierunku obserwacji ok. 1,5 m wynosiła ok. 50%.

Przykładowe wyniki pomiarów u_{EL} , uzyskanych w tej serii badań i obliczone na ich podstawie gęstości ładunku w czasie skanowania obłoku pokazano na rys. 3–7.

Gęstość ładunku elektrycznego w obło-

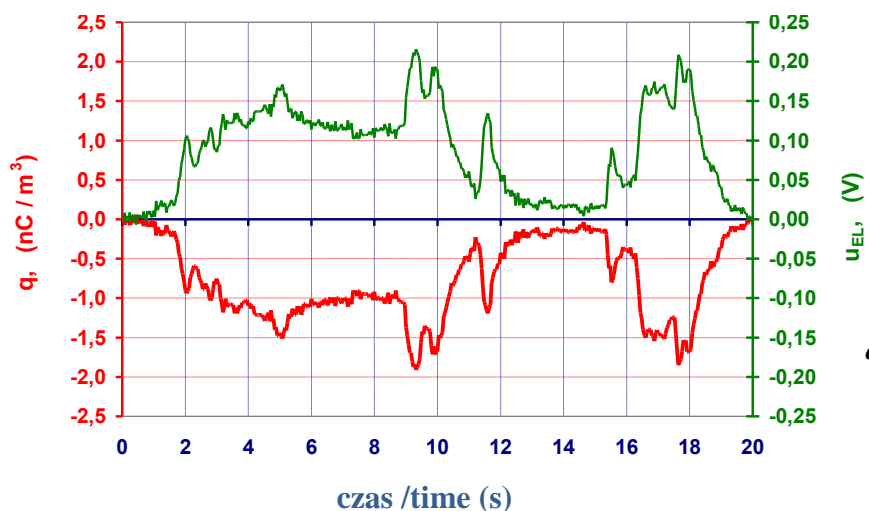
Initial measurements of the clear (without any fumes) air, illustrated by an exemplary result shown in Fig. 2, gave the value of $|q| < 0.25 \text{ nC/m}^3$ equal to the accuracy of the measurement channel – the recorded signals were on the level of own noises of the measurement system.

Next series of tests was made for the fumes of medium density, when optically evaluated transparency of fumes having the thickness of ca. 1.5 m along the direction of observation was about 50%.

Some exemplary results of measurements u_{EL} received in this series of tests at scanning the cloud and charge densities calculated on the basis of them are shown in figures 3–7.

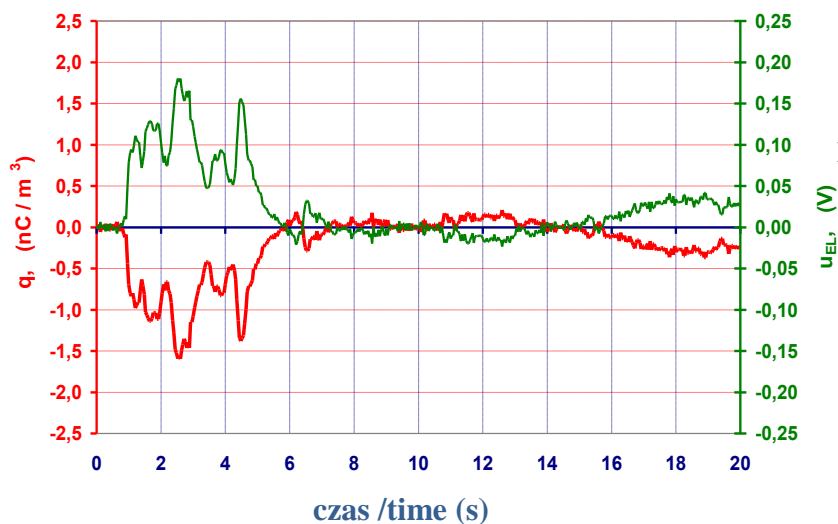
kach dymów pożarowych, wyznaczona w oparciu o wyniki pomiarów, nie przekraczała wartości $\pm 3 \text{ nC/m}^3$ (uśrednionej po objętości ok. $0,01 \text{ m}^3$).

Density of the electric charge included in the fire fumes identified on the base of the measurement results does not exceed $\pm 3 \text{ nC/m}^3$ (mean value of volume ca. 0.01 m^3).



Rys. 3. Sygnał z elektrometru i gęstość ładunku przy skanowaniu obłoku dymu

Fig. 3. Signal from electrometer and density of the charge at scanning the cloud of fume

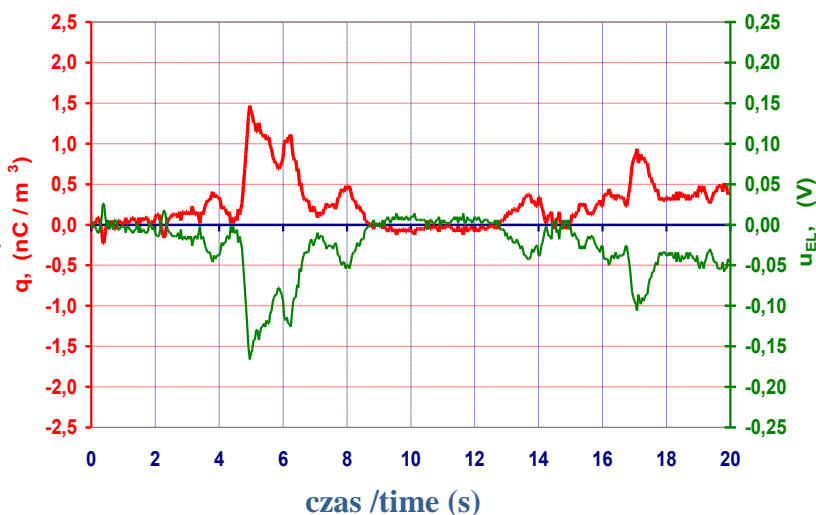


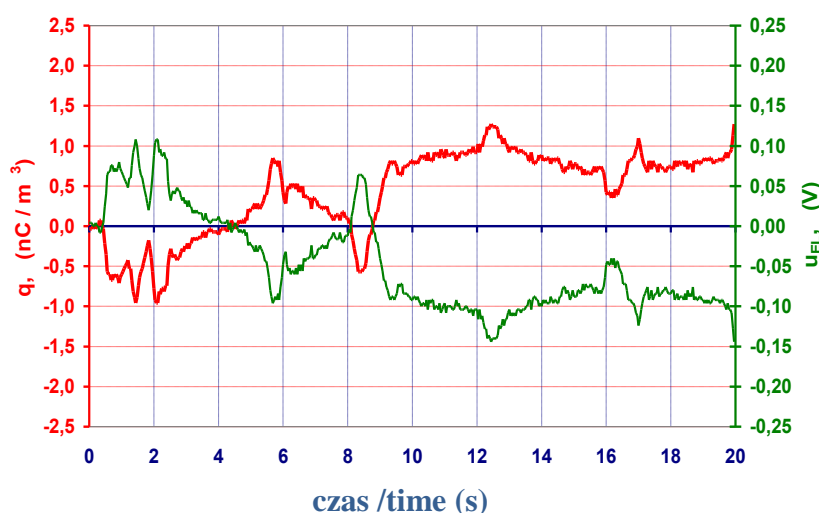
Rys. 4. Sygnał z elektrometru i gęstość ładunku przy skanowaniu obłoku dymu

Fig. 4. Signal from electrometer and density of the charge at scanning the cloud of fume

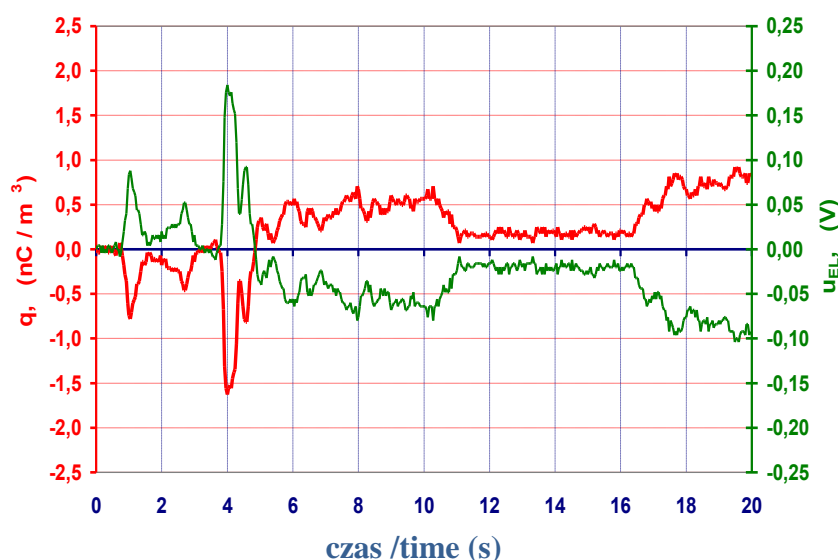
Rys. 5. Sygnał z elektrometru i gęstość ładunku przy skanowaniu obłoku dymu

Fig. 5. Signal from electrometer and density of the charge at scanning the cloud of fume





Rys. 6. Sygnał z elektrometru i gęstość ładunku przy skanowaniu obłoku dymu
Fig. 6. Signal from electrometer and density of the charge at scanning the cloud of fume



Rys. 7. Sygnał z elektrometru i gęstość ładunku przy skanowaniu obłoku dymu
Fig. 7. Signal from electrometer and density of the charge at scanning the cloud of fume

W obłokach tych występowały obszary obdarzone zarówno dodatnim, jak i ujemnym nierównowagowym ładunkiem elektrycznym. Wyjaśnienie przyczyn tego zjawiska wymagałoby przeprowadzenia szerszych badań wykraczających poza zakres niniejszej pracy.

Z uwagi na stwierdzone występowanie w obłoku dymów pożarowych obszarów różniennego ładunku elektrycznego oraz niewielką gęstość objętościową tego ładunku (w porównaniu z pyłami powybuchowymi, dla

There were areas contained in these clouds with both positive and negative prevailing electric charges. Detailed investigation of this phenomenon could require more extensive studies which are beyond the scope of the paper.

As the presence of areas within the cloud of fire fumes with differently loaded electric charges was confirmed both with the low spatial density of the charge (comparing to post-explosion dusts hav-

których $q < 10^3 \div 10^4 \text{ nC/m}^3$) można przypuszczać, iż podczas przelotu przez tego typu dymy dominującym mechanizmem elektryzacji przelatującego ciała byłaby triboelektryzacja.

4. Badania elektryzacji obiektów przelatujących przez dymy pożarowe

Z uwagi na brak możliwości prowadzenia tego rodzaju badań w warunkach rzeczywistych (przelot samolotu przez dymy pożaru w skali naturalnej) i niewspółmierne koszty takiego przedsięwzięcia, eksperymenty prowadzono w skali modelowej.

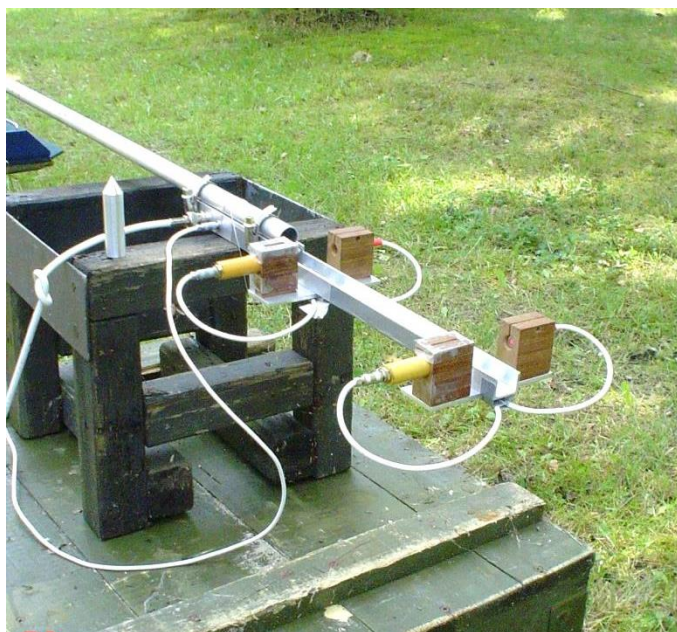
Obiektem przelatującym przez obłok dymu pożarowego był pocisk wykonany z duraluminium o średnicy 15 mm, wystrzeliwany z akceleratora pneumatycznego, który pozwalał rozpędzać pociski do prędkości z zakresu 150 \div 200 m/s, zbliżonej do prędkości przelotowej samolotów. Na wylocie lufy akceleratora zamontowano laserowe bariery optyczne, pozwalające na wyznaczenie prędkości wylotowej pocisków (rys. 8). Przykładowy zapis sygnału z tych barier pokazano na rys. 9.

ing $q < 10^3 \div 10^4 \text{ nC/m}^3$) then it may be assumed that triboelectrification would be a dominating mechanism of the electrification during the flying across such fumes.

4. Testing the Electrification of Objects Flying across Fire Fumes

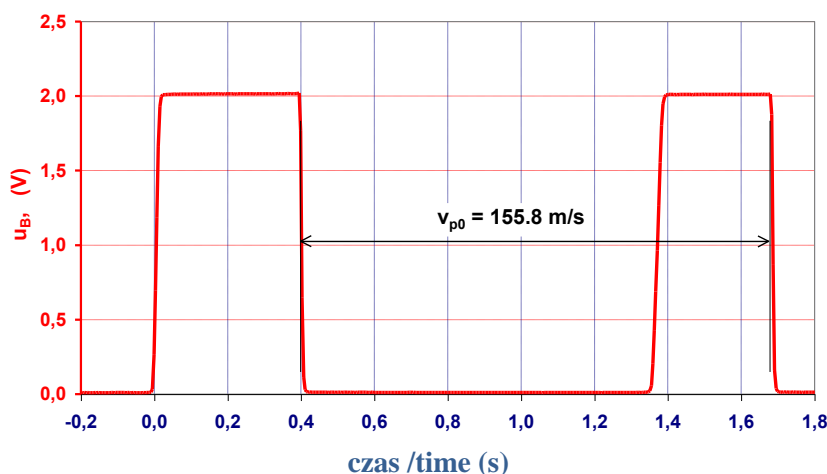
The experiments were carried out with the scaled down models as the tests cannot be performed in real conditions (flight of a plane through the fire fumes in real scale) and their cost could be enormously high.

A projectile made of duralumin with diameter of 15mm was projected with a pneumatic system providing the velocities of 150 \div 200 m/s, which are similar to flying velocities of planes, for the object crossing the cloud of fire fumes. The laser optical barriers are fixed at the muzzle of the barrel to measure the velocities of projectiles leaving the barrel (Fig. 8). An exemplary record of the signal received from these barriers is shown in Fig. 9.



Rys. 8 Wygląd bariery optycznej do pomiarów prędkości wylotowej pocisków sondujących

Fig. 8. View of the optical barrier for measurement of probing projectile muzzle velocity



Rys. 9. Przykładowy zapis sygnałów wyjściowych bariery optycznej

Fig. 9. Exemplary record of the optical barrier output signals

Dym pożarowy wytwarzano w odległości ok. 2 m od wylotu lufy w trakcie spalania ułożonej na ruszcie metalowym mieszanki drewna, papy dachowej, papieru, ścinków materiałów włókienniczych oraz płytek PCW.

Po przelocie przez dym pocisk trafił w umieszczoną w osłonie ekranującej tarczę-elektrodę pomiarową wykonaną z folii Al. Umieszczona na wspornikach izolacyjnych tarcza połączona była z wejściem elektrometru używanego w punkcie 3.

Sygnały z wyjścia elektrometru rejestrowane były za pomocą oscyloskopu cyfrowego.

Oscyloskop był wyzwalany sygnałem z bariery optycznej, co umożliwiło wyznaczenie czasu przelotu pocisku na drodze 4.2 m (odległość od wylotu lufy do tarczy) a tym samym średniej prędkości v_p pocisku-sondy.

Widok opisywanego stanowiska badawczego pokazano na rys. 10.

Przykładowy zarejestrowany sygnał z wyjścia elektrometru pokazano na rys. 11. Moment uderzenia pocisku w tarczę – elektrodę odpowiada na nim punktowi przejścia szybkiego narastania krzywej w ustaloną wartość napięcia; rosnące napięcie przed tym punktem jest wynikiem indukowania ładunku w elektrodzie przez zbliżający się pocisk.

Ponieważ pojemność wejściowa elektrometru była o kilka rzędów wielkości większa od pojemności pocisku-sondy, ładunek elektryczny uzyskany przez pocisk podczas prze-

The fire fume was produced at the distance of ca. 2 m from the muzzle by burning a composition of wood, asphalt roof covering, cuts of fabrics and plates of PVC.

After crossing the fume, the projectile hits the measurement electrode-target made of an aluminium foil placed in a protective screen. The target is fixed with the isolating suspension and is connected to the input of the electrometer used in chapter 3.

Signals from the electrometer output were recorded by a digital oscilloscope.

The oscilloscope was triggered by a signal from the optical barrier, what enabled determination of the time for covering the distance of 4.2 m (distance from the muzzle to the target) and by the same the mean velocity v_p for the probing projectile.

The view of the described testing setup is shown in Fig. 10.

An exemplary signal recorded on the output of electrometer is shown in Fig. 11. Moment of hitting the target-electrode by the projectile is determined there by a point where the rapidly growing signal changes into a settled value of voltage as the building up voltage before that point is effected by the induction of the charge onto the electrode by the incoming projectile. As the capacity of the electrometer input was greater by a few orders than the capacity of the projectile-probe then the electric charge accepted by the

lotu przez obszar dymów można wyznaczyć z zależności:

projectile at travelling through the area of fumes may be identified by dependence:

$$Q_p = C_{IN} \times U / k,$$

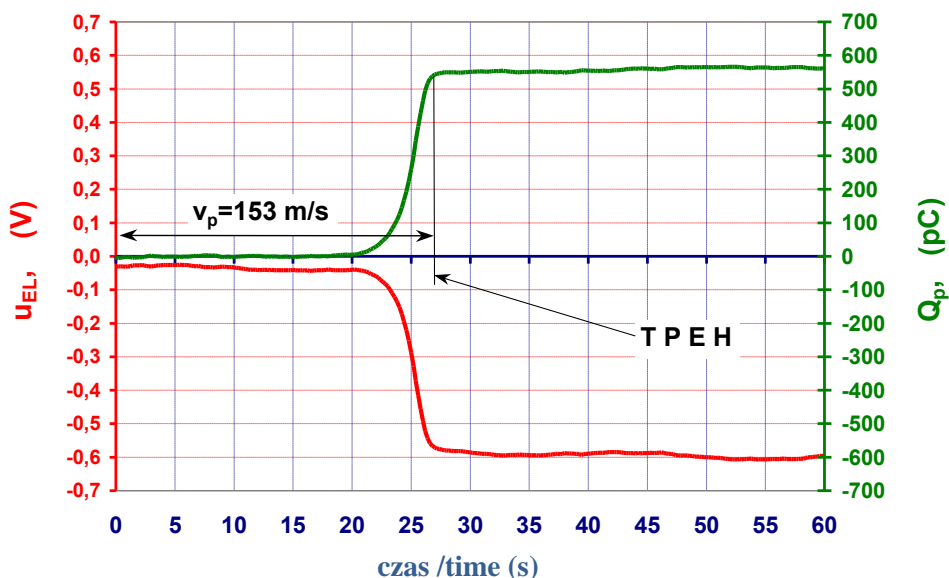
gdzie U – amplituda zarejestrowanego sygnału odpowiadającego ładunkowi przekazanemu przez pocisk elektrodzie pomiarowej.

where U – amplitude of recorded signal corresponding to the charge transferred from the projectile into the measurement electrode.



Rys. 10. Widok stanowiska do badań elektryzacji obiektów przelatujących przez dymy

Fig. 10. View of the setup for investigations of electrification of objects flying across the fumes
ekran – screen, tarcza – target, elektrometr – electrometer, ognisko – fire,
akcelerator pneumatyczny – pneumatic accelerator

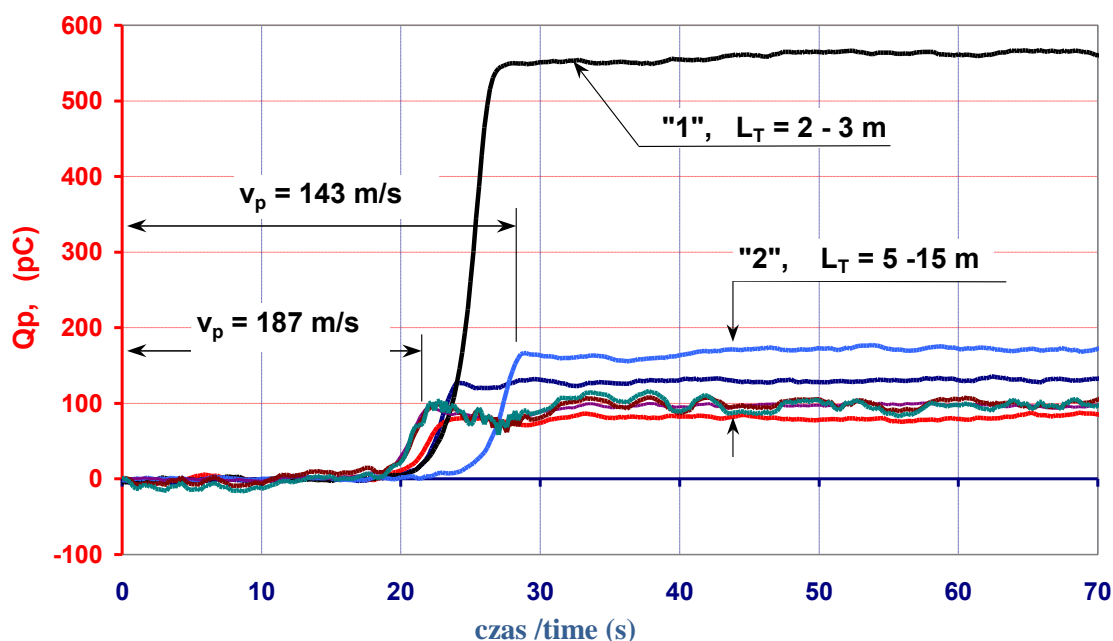


Rys. 11. Sygnał z wyjścia elektrometru i wyznaczony ładunek elektryczny pocisku; przelot przez gęsty dym: drewno + papa + PCV + tekstylia; TPEH – moment uderzenia pocisku w elektrodę

Fig. 11. Signal on the electrometer output and the identified electric charge at flying across the dense fumes: wood + roof asphalt cover + PVC + textiles. TPEH – time of projectile electrode hitting

Wyznaczone przebiegi w funkcji czasu (i wartości końcowe) ładunku elektrycznego uzyskanego przez pociski-sondy podczas przelotu przez dymy pożarowe, które to wartości końcowe zależały przede wszystkim od gęstości i rozmiaru obłoku dymu, pokazano zbiorczo dla 7 strzałów w formie graficznej na rys.12.

The identified values of the electric charge (and the final values) intercepted by projectiles-probes at flying through the fire fumes, whereas the final values depend most of all on the density and the size of the fume cloud, were aggregated for 7 shots and the graphs are shown in Fig. 12.



Rys. 12. Ładunki elektryczne uzyskiwane przez pociski-sondy po przelocie przez obszar zadymiony

Fig. 12. Electric charges accepted by projectiles-probes after flying through the area of fumes

W trakcie prób napotkano dwa problemy, które uwidacznia ten rysunek.

Pierwszy – to rozrzut średniej prędkości pocisków, wynikający stąd, że moment strzału wybierano w chwili, gdy lokalny powiew był minimalny; oczekiwanie na dogodny moment spowodowało, iż ciśnienie powietrza w akceleratorze pocisków ulegało spadkowi w stopniu zależnym od długości oczekiwania.

Drugi – to określenie gęstości (w sensie zawartości zawiesin) dymu. Z powodu braku urządzenia mierzącego tę gęstość w sposób obiektywny posłużono się określeniem wizualnym – odległością L_T , w jakiej przez

During the trials two problems, illustrated by the picture, were spotted.

The first one is a spread of the mean value of projectiles velocities which was caused by the fact that the shots were fired in the instance when the local gust of wind was minimal, and the waiting for a suitable moment made the air pressure in the projectile throwing system fall down in a degree depending on the time of waiting.

The second one concerns the identification of fume density (referred to the content of particles). As any device for indifferent measurement of the density was not available then an optical determination of distance

wytworzony obłok dymu widać wyraźnie znajdujące się za nim przedmioty. I tak, na rys.12 mała wartość L_T (krzywa „1”) dotyczy dymu gęstego, duża wartość L_T (grupa krzywych „2”) dotyczy dymu rzadkiego.

Obłok dymu miał w czasie oddawania strzału w przybliżeniu symetrię cylindryczną o podobnej od strzału do strzału średnicy $l \approx 1,5$ m, którą przyjęto jako drogę pocisku przy przelocie przez obszar pyłów. Przyjmując wartość prędkości pocisku $v_p \approx 150$ m/s, otrzymujemy czas przelotu przez ten obszar, wynoszący $t_p \approx 0,01$ s. Zakładając stałą gęstość objętościową pyłów w takim obłoku, średnią wartość prądu elektryzacji obliczamy z zależności:

$$I_{\text{elect}} = Q_p / t_p$$

Tak więc przy przelotach przez obszary zadymione, wartości prądów elektryzacji pocisków duraluminiowych o kalibrze 15 mm zawierały się w zakresie $I_{\text{elect}} = 5 \div 70$ nA i silnie zależały wprost od gęstości dymu; stąd uwzględniając pole przekroju poprzecznego pocisku otrzymano gęstość prądu elektryzacji $j_{\text{elect}} = 30 \div 400$ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ (przy występujących w badaniach gęstościach obłoków dymów). Zbliżone wartości prądów elektryzacji występowały przy przelocie przez obszary pyłów piaskowych [2].

5. Wnioski

Opracowana metoda wyznaczania gęstości objętościowej ładunku elektrycznego obłoku dymów pożarowych pozwalała na określenie lokalnej nierównowagowej gęstości objętościowej ładunku elektrycznego dymów w obszarach o rozmiarach porównywalnych z rozmiarami sondującej pomiarowej klatki Faraday’a (ok. 0.01 m^3).

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono występowanie w obłokach dymów pożarowych obszarów z dodatnim i ujemnym

L_T allowing for clear visibility of objects placed behind the produced cloud of fumes was used. According to it, in Fig. 12 the low value of L_T (graph „1”) refers to a dense fume, and the high value of L_T (a set of graphs „2”) concerns a tiny fume.

The cloud of fumes had an approximate form of a cylinder symmetry, and its diameter of $l \approx 1,5$ m remained similar between the shots and was accepted as the distance the projectile travels across the area of fumes. Accepting the velocity of projectile $v_p \approx 150$ m/s we get the time of crossing the area equal to $t_p \approx 0.01$ s. Assuming the constant density of dusts inside the cloud the mean value of the electrification current can be calculated by dependence:

The values of electric currents at electrification of 15 mm calibre duralumin projectiles flying across the fumes were on the range $I_{\text{elect}} = 5 \div 70$ nA and have a straight dependence on the fume density, and therefore taking into account the cross-section of the projectile the density of the electrification current was received on the level $j_{\text{elect}} = 30 \div 400$ $\mu\text{A}/\text{m}^2$ (at densities of fumes occurring during the tests). Similar values of electrification currents existed at flying across sand dust areas [2].

5. Conclusions

The developed measurement method for spatial density of the electric charge of fire fumes may be used for identification of a local unbalance of the fumes electric charge spatial density in areas comparable with the dimensions of the probing measurement Faraday box (ca. 0.01 m^3).

The performed experiments show that there are both areas of positive and negative electric charges inside the clouds of fire fumes.

ładunkiem elektrycznym.

Pomierzona gęstość objętościowa ładunku elektrycznego w obłokach dymów pożarowych nie przekraczała wartości $\pm 3 \text{ nC/m}^3$ (dla obszarów o objętości ok. 0.01 m^3), wartość ta jest ponad dziesięciokrotnie mniejsza od gęstości objętościowej ładunku elektrycznego pyłów powybuchowych [1];

Wyznaczona duża wartość gęstości prądu elektryzacji ($30 \div 400 \text{ } \mu\text{A/m}^2$) podczas przelotu przez obszar dymów pożarowych przy jednocześnie niewielkiej gęstości objętościowej własnego ładunku elektrycznego dymów oraz występowaniu w obłoku dymów obszarów o dodatni i ujemnym nierównowagowym ładunku elektrycznym świadczy o tym, iż podczas przelotu przez tego typu dymy dominującym mechanizmem elektryzacji przelatującego ciała jest triboelektryzacja, podobnie jak to stwierdzono podczas przelotu przez obszary pyłów piaskowych.

The measured spatial density of the electric charge inside the clouds of fire fumes does not exceed $\pm 3 \text{ nC/m}^3$ (for areas with capacities of ca. 0.01 m^3), and this value is more than ten times lower than the spatial density of electric charge of post-explosion dusts [1];

The high value of the electrification current density ($30 \div 400 \text{ } \mu\text{A/m}^2$) at flying across fire fumes which have a low spatial density of own electric charge, and the presence of areas of unbalanced positive and negative electric charges at the same time, proves that the triboelectrification is the dominating mechanism of electrification for objects travelling through such fumes, similarly to what was stated at flying across the areas of sand dusts.

Literatura / Literature

- [1] A. Faryński, L. Lorocho, W. Milewski, Z. Ziółkowski, Pomiary gęstości prądu elektryzacji samolotu w locie – VI International Conference „Aircraft and Helicopter Diagnostics” – AIRDIAG’99, 2-3.12.1999, Warszawa
- [2] A. Faryński, L. Lorocho, Z. Ziółkowski, Poligonowe pomiary prądu elektryzacji ciał w pyłach powybuchowych przy prędkościach poddźwiękowych – IV Konferencja „Metody i Technika Badań Statków Powietrznych w Locie”, 14 - 16. 06. 2000 Mrągowo
- [3] A. Faryński, L. Lorocho, Z. Ziółkowski, Elektryczny ładunek obłoku pyłów powybuchowych jako potencjalne źródło zakłóceń elektromagnetycznych - „Pola elektrostatyczne i elektromagnetyczne – nowe materiały i technologie” - V Międzynarodowe Sympozjum EL-TEX 2002, 14 – 15. 11. 2002 Łódź
- [4] A. Długołęcki, A. Faryński, R. Kamiński, Z. Ziółkowski, Badania elektryzacji pyłów po wybuchach ładunków o średnim wagomiarze - V Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa „Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia” Waplewo, 6-8.10.2004
- [5] A. Faryński, L. Lorocho, Z. Ziółkowski, Badania zjawisk elektryzowania się obiektów poruszających się z prędkością poddźwiękową w zapyłonej atmosferze pod kątem ich wpływu na bezpieczeństwo użycia bojowych środków lotniczych, Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej (Wyd. ITWL) tom 5, 2004
- [6] A. Faryński, R. Kamiński, Z. Ziółkowski, Elektryzacja drobin piasku w procesie ich mechanicznego kruszenia - VI Międzynarodowe sympozjum „Pola elektrostatyczne i elektromagnetyczne - nowe materiały i technologie”, Łódź, 25-26.11.2004
- [7] A. Faryński, R. Kamiński, Z. Ziółkowski, Skala zjawisk elektrostatycznych w obłokach

pyłów powybuchowych - VI Międzynarodowe sympozjum „Pola elektrostatyczne i elektromagnetyczne - nowe materiały i technologie”, Łódź, 25-26.11.2004

- [8] A. Faryński, R. Kamiński, Z. Ziółkowski, Wyznaczanie ładunku elektrycznego pyłów powybuchowych w zamkniętej komorze wybuchowej - VIII Międzynarodowe sympozjum „Pola elektrostatyczne i elektromagnetyczne - nowe materiały i technologie”, Łódź, 26-27.11.2008
- [9] C.E. Krauss, M. Horanyi, S. Robertson, Modeling the Formation of Electrostatic Discharges on Mars – Journal of Geophysical Research, Vol.III, E02001, 2006
- [10] Shuaihang Pan, Zhinan Zhang, Fundamental Theories and Basic Principles of Triboelectric Effect: A Review – Friction 7 (1), 2019

