Janusz Rybiński, Dariusz Baranowski, Anna Szajewska, Michał Bednarek, Grzegorz Kotulek, Barbara Ościłowska, Eligiusz Starzyński

TEST POŻAROWY AUTOBUSU W PEŁNEJ SKALI

W artykule opisano próbę pożarową autobusu przeprowadzoną w pełnej skali. Opisano dynamikę rozwoju pożaru i przebieg akcji gaśniczej. Przedstawiono fotografie ilustrujące przebieg testowego pożaru. Zamieszczono wykresy przebiegu temperatury podczas procesu spalania w wybranych punktach pojazdu. Określono czas na przeprowadzenie ewakuacji. Wyznaczono średnią wartość mocy pożaru.

WSTĘP

W ostatnich latach wzrasta liczba pożarów autobusów komunikacji miejskiej. W Polsce odnotowuje się około 60 pożarów autobusów rocznie. W ciągu 10 lat ilość pożarów autobusów podwoiła się. Podobnie jest w innych krajach europejskich.

Pożar autobusu jest zjawiskiem bardzo groźnym dla pasażerów. Mają oni niewiele czasu na opuszczenie pojazdu Dramat może zaistnieć w przypadku zablokowania ewakuacji pasażerów np. przez osoby niesprawne fizycznie. Spektakularne pożary tych pojazdów spowodowały, że mieszkańcy miast nazywają płonące autobusy „rydwanami ognia". Podczas dotychczasowych zdarzeń nie doszło do tragedii. Pasażerowie, w tym dzieci jadące do szkoły, w porę opuszczali pojazd, ale potencjalne zagrożenie jest duże. Przypadkiem skrajnie utrudniającym ewakuację pasażerów jest przewrócenie się autobusu na prawy bok. Powoduje to odcięcie drogi ewakuacji poprzez drzwi pojazdu (wszystkie drzwi wyjściowe autobusu znajdują się na prawym jego boku). Zjechanie tego typu pojazdem na nieutwardzone pobocze z reguły kończy się jego przewróceniem właśnie na prawy bok pojazdu. Powstanie pożaru na skutek uszkodzeń spowodowanych tego typu zdarzeniem drogowym jest bardzo prawdopodobne.

W Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie prowadzone są badania rozwoju pożaru samochodów. Przeprowadzono ponad 20 prób pożarowych w warunkach poligonowych. Badano dynamikę pożaru samochodów osobowych różnych typów i napędzanych paliwem różnego rodzaju [5, 6, 7, 8]. Badano wpływ sposobu i miejsca inicjacji pożaru na przebieg procesu spalania. Przeprowadzono eksperymenty na samochodach napędzanych ciekłym gazem LPG, w których dochodziło do powstania pożaru strumieniowego.

Celem eksperymentów jest dogłębne poznanie technicznych aspektów pożarów samochodów. Eksperymenty prowadzone są przy obecności studentów SGSP i słuchaczy studiów podyplomowych. Studenci SGSP aktywnie uczestniczą w badaniach. Wykonują prace dyplomowe inżynierskie i magisterskie w zakresie badań dynamiki rozwoju pożaru. Niektóre eksperymenty prowadzone są we współpracy z Jednostkami Ratowniczo Gaśniczymi PSP i OSP w ramach systemu szkoleń.

Zdobyta wiedza jest niezbędna dla strażaków gaszących pożary oraz dla biegłych sądowych przygotowujących ekspertyzy dla potrzeb organów dochodzeniowych. Biegli sądowi powinni posiadać dogłębną wiedzę o wszystkich aspektach pożaru w zakresie większym niż potrzebny do bezpiecznego i sprawnego gaszenia pożarów.

Naukowym aspektem badań jest wyznaczanie parametrów pożaru. W pożarze samochodu ważnymi parametrami są: moc pożaru, temperatury gazów w różnych miejscach pojazdu, temperatury maksymalne, temperatury powierzchni karoserii, czas pożaru, czas przejścia frontu ognia między wydzielonymi częściami pojazdu.

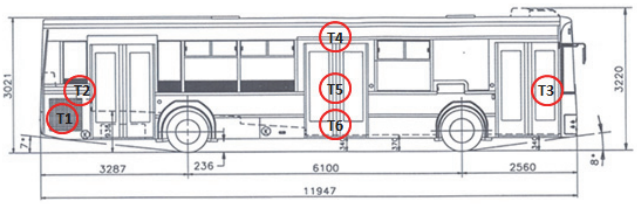
1. STANOWISKO BADAWCZE

Próbę pożarową przeprowadzono na placu w bezpiecznej odległości od zabudowań. Obiektem badań był autobus miejski, pojedynczy klasy maxi, marki Jelcz z silnikiem Iveco Nef Euro 4, o masie własnej 11500 kg, przeznaczony do przewozu maksymalnie 104 pasażerów. Widok autobusu przedstawiono na rysunku 1.

Rys.1. *Fotografia autobusu przeznaczonego do badań*

Warunki pogodowe były następujące:
niebo bezchmurne,
prędkość wiatru 8 km/h, bez porywów,
wilgotność względna 30%,
temperatura 25°C.

W wybranych miejscach zamontowano termopary. Temperaturę mierzono w sposób ciągły za pomocą termopar. Na rysunku 1. przedstawiono schemat autobusu z zaznaczonymi miejscami, w których mierzono temperaturę.



Rys. 2. *Rysunek autobusu z zaznaczonymi miejscami, w których mierzono temperaturę.*

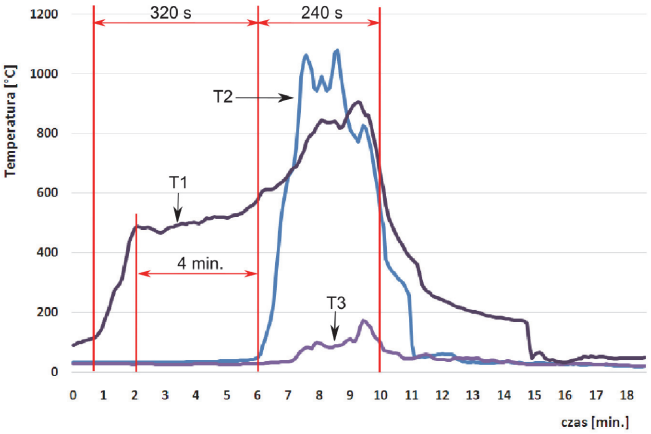
Termopary rozmieszczono w następujących miejscach:
T1 - w komorze silnika, pośrodku, nad głowicą,
T2 - w tylnej części przedziału pasażerskiego, przy przegrodzie oddzielającej komorę silnika, pośrodku, na wysokości zagłówka,
T3 - w przedziale kierowcy, nad kierownicą,
T4 - w środkowej części przedziału pasażerskiego, pośrodku, pod sufitem,
T5 - w środkowej części przedziału pasażerskiego, pośrodku, na wysokości zagłówka,
T6 - w środkowej części przedziału pasażerskiego, pośrodku, nad podłogą.
Przebieg pożaru rejestrowano za pomocą kamery cyfrowej i aparatów cyfrowych. Umożliwiało to śledzenie przebiegu spalania i dawało możliwość określenia czasu, w którym następowały zdarzenia ważne dla dynamiki pożaru.

2. SPALANIE

Najczęstszymi przyczynami pożaru są: wycieki paliwa na rozgrzane elementy silnika, awarie w układzie zasilania, zwarcie instalacji elektrycznej, usterki w układzie hamulcowym, stan awaryjny niezależnego układu ogrzewania autobusu zasilanego olejem napędowym. Zwykle wynikają one z niewłaściwej obsługi. W większości przypadków pożar zaczyna się od silnika. Z tego względu w przeprowadzonym teście pożarowym spalanie zainicjowano w komorze silnika. Na silnik wylano 100 ml nafty i podpalono przy użyciu zapalnika pirotechnicznego.
W komorze silnika rozpoczął się proces spalania. Z tej części pojazdu wydobywał się dym. Początkowo produkty spalania nie wnikały do przedziału pasażerskiego. Spalanie występowało wyłącznie w komorze silnika. Trwało to około 6 minut. W pierwszych 2 minutach pożar w komorze silnika znajdował się w fazie wzrostu. Wydzielała się niewielka ilość dymu. Taki dym może nie być zauważony przez pasażerów, natomiast powinien być zauważony w lusterku przez kierowcę autobusu.
Ogień objął silnik. Z komory silnika wydobywał się dym. Początkowo dym nie wnikał do przedziału pasażerskiego. Paliła się tylko komora silnika. Trwało to około 6 minut. W pierwszych 2 minutach pożar w komorze silnika znajdował się w fazie wzrostu. Wydzielała się niewielka ilość dymu. Fotografię autobusu w początkowej fazie spalania przedstawiono na rysunku 3.

Rys. 3. *Fotografia autobusu w początkowej fazie pożaru (w drugiej minucie)*

Na rysunku 4. przedstawiono wykresy temperatury. W fazie początkowej, trwającej 2 minuty, temperatura w komorze silnika wzrastała do 500°C. Natomiast temperatura wewnątrz przedziału pasażerskiego nie ulegała żadnym zmianom. W warunkach atmosferycznych panujących w czasie testu (przedział pasażerski znajdował się po stronie nawietrznej) pasażerowie prawdopodobnie nie poczuliby zapachu spalania. W tej fazie pożar w żaden sposób nie oddziaływałby na pasażerów.



Rys. 4. *Wykresy temperatury gazów pożarowych w wybranych miejscach wewnątrz autobusu:*
T1 - temperatura w komorze silnika, nad głowicą silnika,
T2 - temperatura w przedziale pasażerskim, w części tylnej autobusu, na wysokości zagłówka,
T3 - temperatura w kabinie kierowcy, nad kierownicą.

W komorze silnika po 2. minutach od inicjacji pożaru nastąpiło przejście do fazy w pełni rozwiniętego pożaru. Przez następne 4 minuty pożar rozwijał się wyłącznie w komorze silnika. Była ona bardzo dobrze oddzielona od przedziału pasażerskiego. Do przedziału nie przenikał dym i nie wzrastała w nim temperatura. Temperatura w komorze silnika przekroczyła wartość 500°C. Płomienie objęły tylną część autobusu. Wydzielało się bardzo dużo czarnego dymu, ale przedział pasażerski pozostawał nietknięty (rysunek 5.). W tej fazie pasażerowie i oczywiście kierowca powinni zauważyć pożar. Przez 4 minuty następowało intensywne spalanie materiałów ropopochodnych. Temperatura gazów pożarowych powoli rosła od około 500°C do około 600°C.

Rys. 5. *Fotografia autobusu w piątej minucie spalania, gdy ogień jeszcze nie przeniknął do przedziału pasażerskiego*

Dopiero w 5. minucie od zainicjowania pożaru strefa spalania zaczęła rozprzestrzeniać się do przedziału pasażerskiego. Nastąpiło to na skutek pęknięcia tylnej szyby pojazdu. Czynnikiem sprzyjającym rozprzestrzenieniu się strefy spalania do przestrzeni pasażerskiej było wykonanie tylnej pokrywy komory silnika z tworzywa sztucznego. Jej szybkie przepalenie spowodowało możliwość bezpośredniego oddziaływania na tylną szybę pojazdu i jej pęknięcie. Kolejnym czynnikiem sprzyjającym rozprzestrzenieniu się strefy spalania było wykonanie poszycia dachu z tworzywa sztucznego. Ogień przedostał się do przedziału pasażerskiego, powodując szybki wzrost temperatury. Wzrost temperatury spowodował pękanie i wypadanie szyb. Do wnętrza dostało się powietrze powodując gwałtowny wzrost dynamiki spalania i przejście do fazy w pełni rozwiniętego pożaru. Przedział pasażerski stał się strefą śmierci. Najpierw popękała i wypadła tylna szyba z lewej strony. Następnie pękały i wypadały kolejne szyby, powodując przesuwanie się frontu pożaru w kierunku kabiny kierowcy. Ułatwiała to cyrkulacja powietrza. Przednie drzwi autobusu były w połowie otwarte.

Gorące gazy przedostawały się do kabiny kierowcy, powodując niewielki wzrost temperatury (wykres T3 na rysunku 5.).

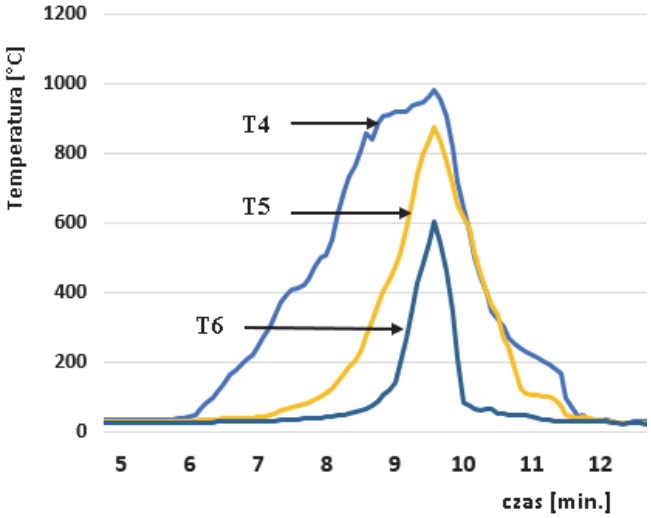
3. GASZENIE

Proces gaszenia rozpoczęto po czasie 9 minut 40 s od momentu zainicjowania spalania. Do gaszenia użyto dwóch prądów gaśniczych wodnych. Na rysunku 6. przedstawiono fotografię akcji gaśniczej w chwili po jej rozpoczęciu. Pożar został stłumiony w ciągu jednej minuty. Dogaszanie trwało jeszcze 10 minut.

Rys. 6. *Fotografia* akcji gaśniczej w kilkanaście sekund po jej rozpoczęciu.

4. TEMPERATURA

Na rysunku 7. przedstawiono wykresy temperatury wewnątrz autobusu, na różnych wysokościach. Najwyższa temperatura jest na górze, pod sufitem. Najniższa jest na dole, nad podłogą. Różnica jest znaczna, wynosi około 400°C. Taki rozkład temperatury jest typowy dla pożarów wewnętrznych. Z punku widzenia pasażerów najistotniejsza jest temperatura na wysokości zagłówka.



Rys.7. *Wykresy temperatury gazów pożarowych wewnątrz przedziału pasażerskiego:*
T4 -temperatura w środku przedziału pasażerskiego, pod sufitem,
T5 - temperatura w środku przedziału pasażerskiego, na wysokości zagłówka,
T6 - temperatura w środku przedziału pasażerskiego, nad podłogą.

Najwyższa temperatura panowała w przedziale pasażerskim. W tym przedziale pożar mógł się swobodnie rozwijać dzięki dużej pojemności i dobrej wentylacji po zniszczeniu szyb. Najwyższą temperaturę $T2_{max}$ = 1080°C odnotowano w przedziale pasażerskim w części tylnej autobusu, na wysokości zagłówka. Tak wysoka temperatura powoduje wypalanie się wszystkich materiałów palnych. W komorze silnika maksymalna temperatura była niższa, wynosiła $T1_{max}$ = 905°C. Pojemność tej komory jest niewielka, więc pożar nie mógł się tam rozwijać. Podobnie jest w przypadku samochodów osobowych. W przeprowadzonych próbach pożarowych temperatura w komorze silnika była zazwyczaj o około 200°C niższa niż w przedziale osobowym. Temperatura maksymalna odnotowana w innych miejscach autobusu osiągnęła wartości: $T3_{max}$ = 168°C, $T4_{max}$ = 982°C, $T5_{max}$ = 874°C, $T6_{max}$ = 543°C.
Z przeprowadzonej analizy wynika, że pasażerowie mają czas na ewakuację od około 4 minut do około 6 minut, w zależności od momentu zauważenia pożaru i reakcji kierowcy.

5. MOC POŻARU

Moc pożaru (Heat Release Rates), jest najważniejszym parametrem pożaru. Jest to energia cieplna w wydzielana w jednostce czasu podczas procesu spalania. Wyznacza się ją w kalorymetrze stożkowym [1]. W przypadku dużych obiektów wyznaczenie mocy pożaru jest trudne do wykonania. Zhao B. i Kruppa J. [9] wyznaczyli moc pożaru samochodu osobowego posługując się okapem kalorymetrycznym o wymiarach umożliwiających pomieszczenie dwóch samochodów osobowych. Moc pożaru wyznaczyli również inni badacze [3, 4].

Moc pożaru można wyznaczyć z zależności:

$$HRR = \alpha \cdot \dot{m} \cdot Q_c \quad (1)$$

gdzie:
α - współczynnik niekompletności spalania
$\dot{m}$ - szybkość ubytku masy (kg/s),
Q_c - efektywne ciepło spalania (MJ/kg)

Średnią moc pożaru można wyznaczyć z zależności:

$$HRR_{śr} = \frac{\alpha \cdot \Delta m \cdot Q_c}{\Delta t} \quad (2)$$

gdzie:
Δm - ubytek masy,
Δt - czas spalania.

Spaleniu ulegają smary, oleje, paliwo napędowe, materiały wyposażenia wnętrza. Materiały wyposażenia wnętrza w większości wykonane są z palnych tworzyw sztucznych wysokim cieple spalania. Można je znaleźć w Załączniku A do Normy Polskiej PN-B,-02852. Oto przykładowe wartości ciepła spalania Q_c (MJ/kg): smary 41 MJ/kg, oleje gazowe napędowe mineralne do łożysk 44 MJ/kg, polietylen i wyroby (PE) 42 MJ/kg, polipropylen (PP) 43 MJ/kg, polistyren i wyroby (PS) 42 MJ/kg, poliuretany (PU) 25 MJ/kg, poliwęglany (PC) 29 MJ/kg, tworzywa ABS 36 MJ/kg, pleksiglas (szkło-organiczne) (PMN) 27 MJ/kg, płyta wiórowa 18 MJ/kg, opony gumowe 32 MJ/kg, guma (średnio) 40 MJ/kg. Na podstawie powyższych danych przyjęto do obliczeń średnią wartość ciepła spalania $Q_c \approx$ 42 MJ/kg. Wzięto pod uwagę, że w początkowej fazie palą się ropopochodne materiały i wyroby o wysokim cieple spalania.
Autobus zważono przed spaleniem i po ugaszeniu. Ubytek masy wynosił Δm= 200 kg. Na podstawie analizy wykresów temperatury, przedstawionych na rysunku 4., przyjęto Δt=560 s.

$$HRR_{śr} = \frac{\alpha \cdot \Delta m \cdot Q_c}{\Delta t} = \frac{1 \cdot 200kg \cdot 42MJ/kg}{560\,s} \approx 15MW \quad (3)$$

Po przejściu strefy spalania do przedziału pasażerskiego wzrosła dynamika spalania. Załóżmy, że masowa szybkość spalania wzrosła n - razy po przejściu strefy spalania do przedziału pasażerskoego. Wówczas możemy napisać:

$$\frac{\Delta m_2}{\Delta t_2} = \frac{n \cdot \Delta m_1}{\Delta t_1} \quad (4)$$

Δm_1 - ubytek masy podczas spalania wyłącznie komory silnika,
Δm_2 - ubytek masy podczas spalania łącznie silnika i przedziału pasażerskiego,
Δt_1 - czas spalania w komorze silnika do przejścia ognia do przedziału pasażerskiego,
Δt_2 - czas trwania spalania po przejściu ognia do przedziału pasażerskiego.

$$\Delta m = \Delta m_1 + \Delta m_2 \quad (5)$$

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$HRR_1 = \frac{Q_c \cdot \Delta m}{\Delta t_1 + n\Delta t_2} \quad (6)$$

Po podstawieniu: $Q_c \approx$42 MJ/kg, Δm=200 kg, Δt_1=320 s, Δt_2=240 s, n=3, otrzymujemy: $HRR_1 \approx$7,7 MW, $HRR_2 \approx$23 MW.

Otrzymane wyniki są zbliżone do wartości mocy pożaru autobusu zawartych w publikacjach [2, 3].

PODSUMOWANIE

Pożar autobusu jest zdarzeniem bardzo groźnym. Podstawowym zadaniem jest przeprowadzenie szybkiej i sprawnej ewakuacji pasażerów. Decydującą rolę do odegrania ma kierowca. Kierowca musi mieć odpowiednie przeszkolenie i świadomość swojej odpowiedzialności za pasażerów. Autobus musi być technicznie przygotowany do przeprowadzenia szybkiej ewakuacji. O ile w przypadku autobusów miejskich występuje duża ilość dwuskrzydłowych drzwi wejściowych i ta ewakuacja nie powinna stanowić problemu w przypadku zatrzymania się autobusu, o tyle w przypadku autobusów turystycznych (wysokopokładowych), które z reguły posiadają tylko dwoje drzwi jednoskrzydłowych ta ewakuacja jest utrudniona, szczególnie w warunkach zagrożenia - kiedy dochodzi do paniki wśród pasażerów.
Pożar w komorze silnika rozwija się bardzo szybko. W przypadku pożaru silnika najważniejsza jest odporność grodzi pomiędzy komorą silnika a przedziałem pasażerskim. W przeprowadzonej próbie strefa spalania ograniczała się do komory silnika przez pierwsze 6 minut trwania pożaru. Intensywne spalanie i wysoka temperatura w komorze silnika nie miały w tym czasie żadnego wpływu na warunki panujące w przedziale pasażerskim. Dopiero przepalenie się pokrywy komory silnika, a w konsekwencji pęknięcie tylnej szyby autobusu doprowadziło do dynamicznego rozwoju pożaru.
W przedziale pasażerskim nie było widać zadymienia, nie wzrastała temperatura. W zbliżonych warunkach pogodowych pożar na pewno byłby zauważony w ciągu pierwszych dwóch minut. Do przeprowadzenia ewakuacji pozostałyby 4 minuty. Czas ten wystarcza na opuszczenie pojazdu, jeśli nie zachodzą jakieś niesprzyjające okoliczności.
Pożarowi autobusu towarzyszy bardzo wysoka temperatura, przekraczająca 1000°C. W takiej temperaturze spalają się wszystkie przedmioty wykonane z materiałów palnych. Części podzespołów wykonane ze stopów aluminiowych ulegają stopieniu lub nadtopieniu. Rozwój pożaru i czas jego trwania istotnie zacierają ślady jakie powstają w miejscu źródła pożaru. W związku z powyższym prowadzenie dochodzeń popożarowych i określenie faktycznej przyczyny powstania pożaru w komorze silnika jest znacząco utrudnione, a niekiedy w przypadku całkowitego wypalenia się wszystkich materiałów palnych niemożliwe.

BIBLIOGRAFIA

1. Babrauskas V., Heat Release Rates, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Chapter 1, Section 3, p. 1-59, 2008.
2. Chojnacki K., Fabryczewska A., *Bezpieczeństwo pożarowe w tunelach,* Górnictwo i Geoinżynieria, t. 21, nr 3/1, 2005, s. 145-156.
3. Fabryczewska A., Chojnacki K., *Bezpieczeństwo pożarowe w tunelach*, „Geoinżynieria i Tunelowanie, 01/2005,nr 04, s. 24-27.
4. Okamoto K., Otake T., Miyamoto H., Honma M., *Burning behavior of minivan passenger cars*, “Fire Safety Journal”, 2013, tom 62, s. 272-280.
5. Rybiński J., Skalny M., Szajewska A., *Test fire of a passenger car*, „Technika Transportu Szynowego”, 2012,nr 9, s. 1453-1459.

6. Rybiński J., Szajewska A., Świder R., *Determining the temperature of a passenger car fire ,"*Measurement Automation Monitoring", 2015, tom 61, nr.6, s. 275-277.
7. Szajewska A., Rybiński J., *Przemieszczanie się strefy spalania w pożarze samochodu*, „Autobusy. Technika. Eksploatacja. Systemy Transportowe," 2016, nr 9., s.116-11.
8. Szajewska A., Rybiński J., *Próby pożarowe zbiorników instalacji LPG*, „Logistyka", 2015, nr 4, s. 8366-8372.
9. Zhao B. Kruppa J., Structural behaviour of an open car park under real fire scenarios, "Fire Mater". 2004, vol. 28, s. 269-280.

The Full Scale Bus-Fire Test

The article describes the full scale bus fire test. The dynamics of the development bus-fire was described Time to the evacuation was designated. The average value heat release rate was determined.

Autorzy:

dr hab. **Janusz Rybiński** prof. Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Bezpieczeństwa Pożarowego Katedra Nauk Ścisłych, Zakład Fizyki i Chemii, email: j.rybinski@interia.pl, jrybinski@sgsp.edu.pl, tel.: 781211455

kpt. inż. **Baranowski Dariusz**, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Bezpieczeństwa Pożarowego, Zakład Badania Przyczyn Pożarów, email: dbaranowski@sgsp.edu.pl

dr inż. **Anna Szajewska**, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Bezpieczeństwa Pożarowego Katedra Nauk Ścisłych, Zakład Fizyki i Chemii, email: aszajewska@sgsp.edu.pl, tel.: 603273509

dr **Michał Bednarek**, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Bezpieczeństwa Pożarowego Katedra Nauk Ścisłych, Zakład Fizyki i Chemii, email: mbednareki@sgsp.edu.pl.pl

mł. bryg. mgr inż. **Grzegorz Kotulek**, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Bezpieczeństwa Pożarowego, Zakład Analiz i Rozpoznawania Zagrożeń, email: gkotulek@sgsp.edu.pl

st. bryg. dr. **Barbara Ościłowska**, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Podstaw Procesów Spalania, Wybuchu i Gaszenia, Zakład Badania Przyczyn Pożarów, email: email: barbaraosc@op.pl

bryg. mgr inż. **Eligiusz Starzyński**, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie, Wydział Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Podstaw Procesów Spalania, Wybuchu i Gaszenia, Zakład Badania Przyczyn Pożarów, email: e.starzynski@vp.pl