

dr inż. Dorota Markowska¹⁾

ORCID: 0000-0002-5504-7725

dr inż. Paweł Wolny^{1)*}

ORCID: 0000-0003-2161-4506

Wpływ czynnika napędowego na skuteczność gaśniczą stałych urządzeń mgłowych wykorzystywanych do ochrony obiektów

Influence of propellant on the extinguishing efficiency of fixed mist systems used to protect facilities

DOI: 10.15199/33.2023.07.08

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych wpływu rodzaju gazu napędowego oraz objętościowego natężenia przepływu wody na skuteczność gaśniczą zaprojektowanego i wykonanego stałego urządzenia mgłowego. Jako gaz napędowy zastosowano powietrze sprężone lub azot. Podczas badań mierzono temperaturę i szybkość jej spadku, czas stłumienia płomienia testowego pożaru oraz stężenie tlenu w pomieszczeniu. Do testów pożarowych użyto stosu belek z drewna sosnowego. Największą skuteczność gaśniczą systemu mgłowego otrzymano w przypadku testu, w którym objętościowe natężenie przepływu wody wynosiło 3 dm³/s i czynnikiem napędowym był azot. Uzyskane wyniki pokazują, że rodzaj zastosowanego gazu w systemie mgłowym ma znaczenie, gdyż bierze on udział w gaszeniu, co podważa zapisy normy NFPA 750, która zakłada, że czas gaszenia wymagany przez normę jest tak krótki, że rodzaj gazu nie ma wpływu na proces stłumienia pożaru.

Słowa kluczowe: mgłowe stałe urządzenia gaśnicze; czynnik napędowy; azot; powietrze; obiekty budowlane.

Abstract. The article presents the results of a laboratory study of the effect of the type of propellant and the volumetric flow rate of water on the extinguishing effectiveness of a designed and manufactured fixed water mist fire protection system. Compressed air or nitrogen was used as the driving gas. During the tests, the temperature and its rate of decrease, the time of suppression of the test fire flame and the oxygen concentration in the room were measured. A stack of pine wood beams was used for the fire tests. The highest extinguishing efficiency of the water mist system was obtained for the test, where the volumetric flow rate of water was 3 dm³/s and the driving agent was nitrogen. The results show that the type of gas used in the water mist fire protection system and takes part in extinguishing, which undermines the provisions of the NFPA 750 standard. The standard assumes that the extinguishing time used by the standard is so short that the type of gas does not affect the fire suppression process itself.

Keywords: water mist fire protection systems; gas extinguishing agent; nitrogen; air; buildings .

Stale urządzenia gaśnicze wykorzystywane do ochrony obiektów budowlanych mogą różnić się budową oraz medium gaśniczym. Niezależnie od zastosowanego rozwiązania ich zadaniem jest jak najszybsze ograniczenie i utrzymanie pożaru pod kontrolą lub ugaszenie pożaru przy minimalizacji strat popożarowych i pogaśniczych w chronionych pomieszczeniach. Obecnie coraz powszechniej stosowane są nowoczesne technologie, takie jak **systemy gaszenia mgłą wodną**, którą stanowi rozpylony strumień wody składający się z kropli o średnicy mniejszej niż 1000 µm, o ściśle określonym składzie objętościowym. W zależności od przyjętej normy objętość kropli w mgłę wodnej powinna wynosić

minimum 90% wg standardu europejskiego EVS-EN 14972 [1] lub 99% w przypadku standardu amerykańskiego NFPA 750 [2]. Mgła wodna, jako woda rozpylona na bardzo drobne kropelki, doskonale odbiera strumień ciepła ze środowiska pożaru, ponieważ charakteryzuje się dużym ciepłem właściwym (4,19 kJ/kgK), ciepłem parowania (2260 kJ/kgK) oraz relatywnie niską temperaturą wrzenia (100°C). Jest to uzasadnione dużą powierzchnią styku gazów pożarowych i wody, przy czym, im mniejsza jest średnica kropli, tym większa efektywność procesu gaszenia [3]. Ponadto zmiana stanu skupienia wody z ciekłego na gazowy powoduje zmniejszenie stężenia tlenu w środowisku pożaru.

Działanie gaśnicze mgły wodnej polega na:

a) chłodzeniu gazów pożarowych oraz powierzchni paliwa;

b) zmniejszeniu stężenia tlenu w środowisku pożaru;

c) zmniejszeniu zadymienia;

d) redukcji i ekranowaniu promieniowania cieplnego [4].

Systemy mgły wodnej dzielą się na te, które zawierają tylko jeden składnik, jakim jest woda, oraz dwuskładnikowe, gdy do napędzania kropli wody służy powietrze lub gaz inertyny. Amerykańska norma NFPA 750 określa typy mgły wodnej w zależności od ciśnienia roboczego, pod jakim podawana jest woda i dopuszcza stosowanie powietrza lub gazu inertyjnego jako gazu napędowego, zakładając, że to medium nie bierze udziału w gaszeniu [4]. Wykorzystanie gazu napędowego w systemach mgłowych ma sporo zalet, takich jak: skrócenie czasu emisji toksycznych produktów spalania przez gwałtowne obniżenie temperatury pożaru; redukcja promieniowania cieplnego od pożaru w obiek-

¹⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

^{*} Adres do korespondencji: pawel.wolny@p.lodz.pl

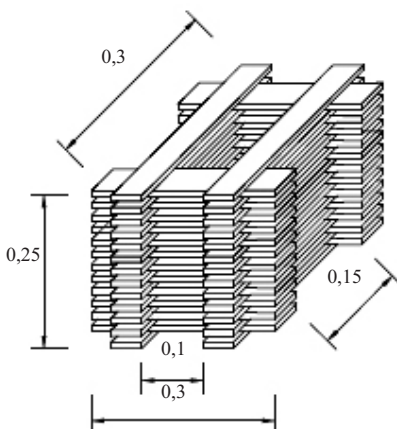
cie budowlanym; wyeliminowanie ryzyka powstania strat związanych z zalaniem powierzchni sąsiadujących oraz redukcja kosztów zużycia wody do celów gaśniczych [5 – 7]. Niektóre systemy bazujące na mgłę wodnej, mimo że są dopuszczone, mają aprobaty do stosowania w zabezpieczeniach pomieszczeń, w których znajdują się urządzenia lub materiały wrażliwe na działanie wody, to nie są chętnie stosowane przez klientów ze względu na stosowane medium gaśnicze.

Zgodnie z normą NFPA 750 czy standardem FM 5560 [8] rodzaj użytego gazu napędowego nie ma wpływu na efektywność gaśniczą systemu mgłowego, ale gdyby doprowadzić sytuację do granic absurdu, to system mgłowy mógłby używać jako czynnika napędowego 99,994% powietrza i 0,006% wody. Taki skład wynika z normy NFPA 770 [9]. Standard ten, który można traktować jako rozwinięcie lub uzupełnienie NFPA 750, określa skład mieszaniny na przynajmniej 99,9% gazu obojętnego i poniżej 0,005% wody, czyli zaproponowany stosunek powinien spełnić wymagania normy NFPA 750.

Przeprowadzone przez nas badania miały na celu **określenie czasu efektywnego tłumienia płomieni pożaru oraz porównanie skuteczności gaśniczej z zastosowaniem kombinacji mgły wodnej i gazu napędowego w różnych proporcjach, a także objętościowego natężenia przepływu wody**. Jako gaz napędowy zastosowano powietrze sprężone lub azot. Sprawdzono, że wbrew deklaracjom producentów dysz mgłowych rodzaj gazu napędowego ma wpływ na czas gaszenia. Przeprowadzono testy laboratoryjne z użyciem zaprojektowanego i wykonanego stałego mgłowego urządzenia gaśniczego napędzanego powietrzem oraz azotem, aby uzyskać dane porównawcze. Do testów pożarowych wykorzystano stos belek z drewna sosnowego. Podczas badań mierzono temperaturę i szybkość jej spadku w wybranych punktach pomieszczenia (ze względu na obiegową opinię dotyczącą efektywności gaśniczej systemów mgłowych, że są one nieefektywne w niskiej temperaturze pożaru), a także czas trwania gaszenia pożaru oraz stężenie tlenu.

Materiał i stanowisko badawcze

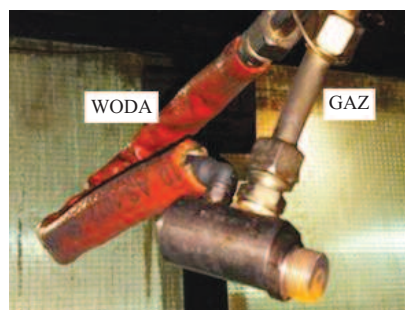
Materiałem palnym użytym w badaniach laboratoryjnych było drewno sosnowe (rysunek 1). Stos drewna składał się z ułożonych naprzemiennie przetar-



Rys. 1. Zastosowany materiał palny [4]
Fig. 1. Combustible material used [4]

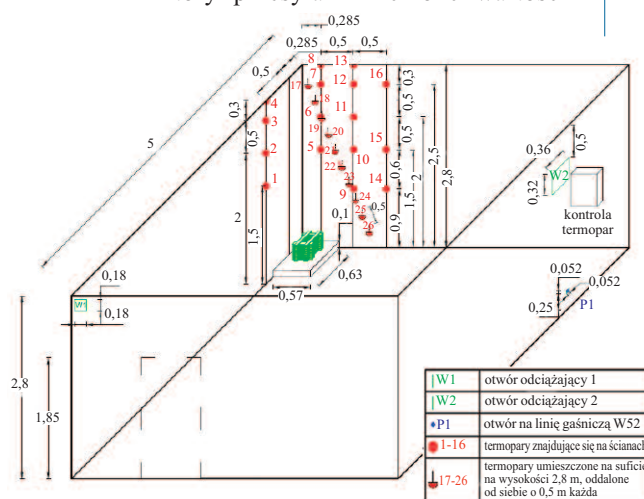
tych 50 desek o wilgotności 5 – 15% i gęstości ok. 550 kg/m³, co umożliwiło swobodny dopływ powietrza do spalnego materiału i szybki rozwój spalania płomieniowego między ułożonymi deskami. Masa stosu wynosiła 4,5 kg. Taka ilość drewna sosnowego pozwalała na wytworzenie pożaru testowego o średniej mocy ok. 100 kW (badania kalorymetryczne). W celu uzyskania spalania płomieniowego drewna, do tacy metalowej, na której umieszczano stos, wlało ok. 250 ml nafty o niskiej temperaturze wrzenia.

Badania wpływu rodzaju gazu napędowego na skuteczność gaśniczą systemu mgły wodnej zostały wykonane w pomieszczeniu o wymiarach 5 x 2,8 m, znajdującym się w laboratorium Technicznych Systemów Zabezpieczeń Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Zaprojektowano i wykonano system dwufazowej instalacji mgłowej. Składał się on z dysz 110,5 i 110,1 FEN T (fotografia), rurociągu gazowego i wodnego, pompy wysokociśnieniowej wody, zbiornika wody, zbiornika gazu pod ciśnieniem, reduktora ciśnienia



Dysza 110,1 FEN T
110.1 FEN T nozzle

gazu i manometrów, zaworów odcinających. W pomieszczeniu badawczym rozmieszczono 26 termopar typu TKP CZAKI (rysunek 2) o długości 2,5 cm i średnicy 1 mm oraz zainstalowano czujniki stężenia tlenu firmy Gazex – model DG P9 E/N umieszczone na wysokości od poziomu podłogi 2,1 m oraz 1,7 m. Czujniki tlenu podłączone do pomiarowego modułu MDP-16, który przesyłał zmierzone wartości



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia termopar [4]
Fig. 2. Diagram of thermocouple arrangement [4]

do komputera. Parametry techniczne dysz przedstawiono w tabeli 1.

Badania rozpoczynano w momencie osiągnięcia temperatury 200°C na dowolnej termoparze, a kończono z chwilą całkowitego zgaszenia ognia.

Wyniki badań i ich analiza

Stosując sprężone powietrze i azot, wykonano łącznie osiemnaście testów pożarowych, osiem przy objętościowym natężeniu przepływu wody 3 dm³/min oraz dziesięć przy objętościowym natężeniu przepływu 1,5 dm³/min. We wszystkich próbach stos drewna usytuowany był w rogu pomieszczenia (ga-

Tabela 1. Parametry techniczne dysz 110,5 FEN T i 110,1 FEN T [4, 9]

Table 1. Technical parameters of nozzles 110.5 FEN T and 110.1 FEN T [4, 9]

Parametry techniczne	Czynnik napędowy	Woda
Ciśnienie na doprowadzeniu	4 ± 0,5 bara	4 ± 0,5 bara
Objętościowe natężenie przepływu mediów: 110,5 FEN T 110,1 FEN T	0,5 ± 0,1 m ³ /min 1 ± 0,2 m ³ /min	1 ± 0,1 dm ³ /min 2 ± 0,2 m ³ /min
Czystość mediów	cząstki stałe d < 40 μm gęstość cząstek < 10 mg/m ³	filtr 300 μm
Masa głowicy	0,4 kg	
Zasięg efektywny strumienia mgły	2,5 m	
Zasięg maksymalny strumienia mgły	3,5 m	
Temperatura pracy	od 10 do 700°C	
Rozmiar kropeł	od 4 do 200 μm	

szczenie kubaturowe). Otrzymane średnie wyniki zestawiono w tabeli 2. Na ich podstawie stwierdzono, że pomimo prób zapewnienia tego samego scenariusza pożaru (ta sama ilość tego samego rodzaju drewna sosnowego ułożonego w taki sam sposób, ta sama ilość cieczy łatwopalnej, ta sama lokalizacja materiału palnego), wartości czasu Start znacznie się różnią. Wpływ na to mogły mieć różne czynniki, np. lokalne przepływy powietrza, nierównomierne spalanie materiału palnego, wilgotność, zawartość żywicy w drewnie, które powodują, że pożar powstały w tym samym pomieszczeniu z tym samym wyposażeniem i zapoczątkowany w tym samym miejscu może rozwijać się z różną prędkością, a jego powtórzenie jest praktycznie niemożliwe. Czas gaszenia przy objętościowym natężeniu przepływu wody 3 dm³/min (testy nr 11 i 12) jest prawie dwa razy krótszy niż przy objętościowym natężeniu przepływu 1,5 dm³/min (test nr 13) w przypadku zastosowania powietrza. W teście nr 11 osiągnięto najkrótszy czas gasze-

Tabela 2. Uśrednione wyniki z eksperymentów dotyczących czasu tłumienia pożarów testowych

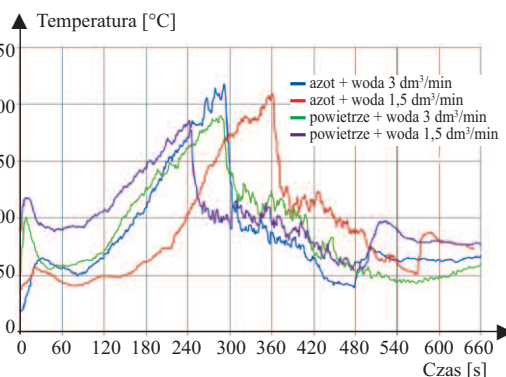
Table 2. Averaged results from fire suppression time experiments test

Nr testu	Rodzaj użytego gazu	Objętościowe natężenie przepływu wody [dm ³ /min]	t _{1P} , start pomiarów [s]	t _{2P} , stop pomiarów [s]	t _{gr} = t _{2P} - t _{1P} , czas gaszenia pożaru [s]
13	powietrze	1,5	169	608	439
11-12	powietrze	3	255	497	242
4 – 10, 16 – 17	azot	1,5	310	520	210
1-3, 14, 15, 18	azot	3	307	513	206

nia z udziałem powietrza, który wyniósł ok. 242 s. Natomiast w testach pożarowych z udziałem azotu czas gaszenia przy objętościowym natężeniu przepływu 1,5 dm³/min jest niewiele dłuższy od czasu gaszenia uzyskanego przy objętościowym natężeniu przepływu 3 dm³/min. Skrócenie czasu ekspozycji na ogień i promieniowanie cieplne (zarówno pomieszczenia, jak i znajdujących się w nim elementów wyposażenia) ogranicza straty pożarowe, a także emisję toksycznych produktów spalania do atmosfery.

Zmiana temperatury w pomieszczeniu w czasie była najlepiej widoczna na termoparze nr 17 zamocowanej na suficie, bezpośrednio nad miejscem usytuowania pożaru testowego. Jej reakcja na gaszenie była najszybsza, gdyż ze względu na położenie termopara nr 17 odznaczała się największą wrażliwością na zmiany zachodzące w strefie spalania. Z tego powodu do analizy porównawczej przebiegu temperatury ze względu na rodzaj gazu przyjęto wartości temperatur zmierzone przez tę termoparę. Na rysunku 3 przedstawiono wykres temperatury w pomieszczeniu podczas tłumienia testowego pożaru mgłą wodną napędzaną azotem lub powietrzem.

Zmiana średniej temperatury we wszystkich testach charakteryzowała się zbliżonym przebiegiem, niezależnie od zastosowanego gazu i natężenia przepływu wody (przebieg temperatury na wykresach jest zgodny z trzema fazami rozwoju pożaru w pomieszczeniu – wzrostu, gaszenia oraz powolnego wychładzania). W wyniku przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzo-



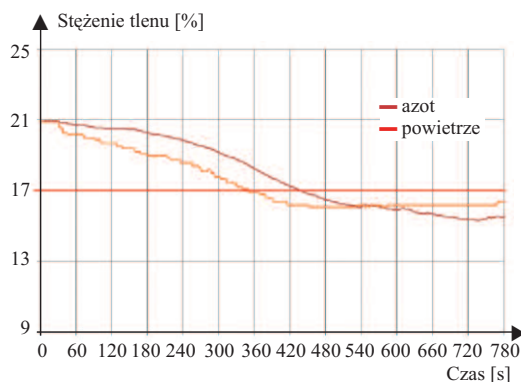
Rys. 3. Przebieg temperatury podczas gaszenia mgłą wodną napędzaną azotem lub powietrzem przy objętościowym natężeniu przepływu wody równym 1,5 i 3 dm³/min

Fig. 3. Temperature waveform during extinguishing with water mist water driven by nitrogen or air at a volumetric flow rate of water equal to 1.5 and 3 dm³/min

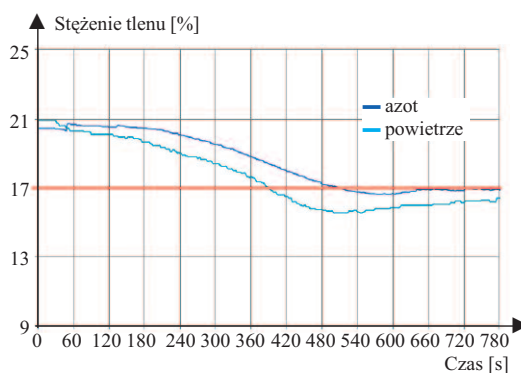
no, że spadek temperatury, a w efekcie osiągnięcie temperatury 100°C, przebiega znacznie szybciej w przypadku zastosowania azotu jako gazu napędowego niż powietrza. Najlepszy wynik, ze względu na szybkość spadku temperatury, uzyskano w przypadku próby z użyciem azotu i wody o objętościowym natężeniu przepływu 3 dm³/min, a najgorszy w przypadku mieszaniny powietrza i wody o objętościowym natężeniu przepływu 1,5 dm³/min.

Aby odpowiedzieć na pytanie, czy założenia przyjęte w NFPA 750, że gaz napędowy nie bierze udziału w procesie gaszenia pożaru są słuszne, dokonano eksperymentu z analogicznym ustawieniem stosu testowego w mgłę wodnej w rogu pomieszczenia. Uzyskane wyniki stężenia tlenu w pomieszczeniu w przypadku zastosowania azotu i powietrza oraz wszystkich analizowanych objętościowych natężeń przepływu wody przedstawiono na rysunkach 4 i 5 oraz w tabeli 3. Za poziom krytyczny stężenia tlenu w pomieszczeniu przyjęto 17% obj. Jest ono uznawane za stężenie jeszcze bezpieczne dla człowieka, ale utrudnia już zapłon. W przypadku stężenia poniżej 15% dochodzi do osłabienia funkcji umysłowych i fizjologicznych człowieka, utrata przytomności jest następstwem spadku poziomu tlenu poniżej 10%, a śmierć przez uduszenie może wystąpić przy stężeniu poniżej 8% [11].

W pierwszej fazie pożarów testowych przy objętościowym natężeniu przepływu 1,5 dm³/min, do czasu 540 s jego trwania, spadek stężenia tlenu następo-



Rys. 4. Stężenie tlenu w pomieszczeniu w przypadku zastosowania azotu lub powietrza przy objętościowym natężeniu przepływu wody 1,5 dm³/min
Fig. 4. Oxygen concentration in the room in case of using nitrogen or air at the volumetric water flow rate of 1.5 dm³/min



Rys. 5. Stężenie tlenu w pomieszczeniu w przypadku zastosowania azotu lub powietrza przy objętościowym natężeniu przepływu wody 3 dm³/min
Fig. 5. Oxygen concentration in the room in case of using nitrogen or air at the volumetric water flow rate of 3 dm³/min

Tabela 3. Parametry charakteryzujące stężenie procentowe tlenu w przypadku azotu i powietrza w mgie wodnej oraz wszystkich analizowanych objętościowych natężeń przepływu wody

Table 3. Parameters characterizing the percentage concentration of oxygen for nitrogen and air in the water mist and all the analyzed volumetric water flow rates

Natężenie przepływu wody [dm ³ /min]	Rodzaj gazu	Początkowe stężenie tlenu [%]	Najmniejsze stężenie [%]	Czas osiągnięcia 17% [s]
1,5	azot	20,9	14,9	121
3	azot	20,6	16,3	431
1,5	powietrze	20,9	16,1	185
3	powietrze	20,9	15,6	153

wał szybciej w przypadku mieszania z powietrzem, natomiast po tym czasie stężenie tlenu utrzymywało się na stałym poziomie 16,1%. Stężenie graniczne 17% zostało osiągnięte po 354 s od rozpoczęcia pożaru. W przypadku mieszania z azotem stężenie tlenu spadło do wartości 14,9%, a efektywność wypierania tlenu w przypadku azotu była większa niż w przypadku powietrza. Przy objętościowym natężeniu przepływu wody 3 dm³/min, wzrost szybkości

spadku tlenu w pomieszczeniu był zauważalny po rozpoczęciu gaszenia pożaru mgłą wodną. Wartość minimalną wynoszącą 15,6% tlenu osiągnięto w 502 s od rozpoczęcia badania w przypadku mieszania wodno-powietrznej, a następnie zaobserwowano wzrost stężenia tlenu w pomieszczeniu. Po wskazanym czasie w przypadku mieszania z azotem stężenie tlenu zmniejszyło się do 17,8%.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że im większy jest dodatek wody w mieszaniu z azotem, tym wypieranie tlenu jest powolniejsze i ilość tlenu w pomieszczeniu jest większa. Natomiast w przypadku mieszania z powietrzem dodatek wody nie ma istotnego wpływu na zmianę stężenia tlenu.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że rodzaj gazu napędowego oraz wartość objętościowego natężenia przepływu wody mają wpływ na skuteczność gaśniczą stałych urządzeń mgłowych. Spadek temperatury w pomieszczeniu, a w efekcie osiągnięcie temperatury 100°C przebiega znacznie szybciej w przypadku zastosowania azotu jako gazu napędowego niż powietrza. Ponadto użycie mieszania wodno-azotowej zapobiegało (po ugaszeniu płomieni) przekroczeniu temperatury krytycznej 60°C na każdej wysokości. Najlepszy wynik, ze względu na szybkość spadku temperatury, uzyskano w przypadku próby z użyciem azotu i wody o objętościowym natężeniu przepływu 3 dm³/min, a najgorszy mieszania powietrza i wody o objętościowym natężeniu przepływu 1,5 dm³/min. Niezależnie od ilości użytej wody czas gaszenia był krótszy, kiedy użyto azotu jako gazu napędowego, co ma bezpośredni wpływ na czas emisji gazów pożarowych.

Największą skuteczność gaśniczą systemu mgłowego otrzymano w przypadku testu, gdzie objętościowe natężenie przepływu wody wynosiło 3 dm³/s i czynnikiem napędowym był azot. Stosowanie powietrza jako gazu napędowego zapewnia stały dopływ tlenu do pożaru w ilości ok. 21% objętości dostarczonego gazu, dlatego też nie może być obojętne w procesie spalania i choć systemy dwuskładnikowe, w których używane jest powietrze, spełniają wymagania dotyczące czasu ugaszenia lub stłumienia płomieni, to i tak będzie to czas dłuższy niż przy zastosowaniu gazów inertnych. Po przeprowadzeniu badań stwierdzono większy wpływ gazu obojętnego na właściwości gaśnicze niż powietrza. Udowodniono, że wbrew założeniom normy NFPA 750, **rodzaj użytego gazu ma wpływ na skuteczność gaśniczą stałych urządzeń mgłowych wykorzystywanych do ochrony obiektów budowlanych.**

Literatura

[1] EVS-EN 14972-1:2021 Fixed firefighting systems – Water mist systems – Design and installation.
 [2] NFPA 750: 2023 Standard on Water Mist Fire Protection Systems.
 [3] Roguski J, Zbrożek P, Czerwieńko D. Selected aspects of using water fog extinguishing devices in buildings. Monografie CNBOP-PIB, 2012.
 [4] Wolny P. Analysis of the extinguishing efficiency of hybrid systems using water mist with an operating medium in the form of inert gases, dissertation. The Main School of Fire Service. Warsaw 2019.
 [5] Raia P, Gollner MJ. Literature Review on Hybrid Fire Suppression Systems. University of Maryland, Fire Protection Research Foundation, College Park (Maryland), 2014.
 [6] Liu Z, Kim AK. A review of water mist fire suppression systems – fundamental studies. Journal of Fire Protection Engineering. 2000, 10 (3): 32 – 50.
 [7] Mawhinney JR. A review of water mist fire suppression research and development, H. Associates, Baltimore (Maryland). 1996.
 [8] FM Approval 5560, Water Mist Systems. Norwood (MA) 20172021.
 [9] NFPA 770:2011 2021 Standard on Hybrid (Water and Inert Gas) Fire-Extinguishing Systems.
 [10] Gałaj J, Drzymała T, Wolny P. Analysis of the impact of selected parameters of the hybrid extinguishing system on the fire environment in a closed room. Sustainability. 2019; <https://doi.org/10.3390/su11236867>.
 [11] Klapsa W, Suchecki S, Bąk D, Dziechciarz A. Czynniki narażenia podczas pożarów [w:] red. Guzowski P., Małozieć D., Wróblewski D., Czerwona Księga Pożarów: Wybrane problemy pożarów oraz ich skutków. Tom 1, Wyd. CNBOP, Józefów 2016.

Przyjęto do druku: 31.06.2023 r.