

mł. kpt. inż. **Tomasz Kielbasa**

Jednostka Certyfikująca CNBOP

AEROZOLE GAŚNICZE I ICH GENERATORY

Extinguishing aerosols and their generators

Streszczenie

Artykuł prezentuje tematykę aerozoli gaśniczych oraz ich klasyfikację w ramach układów dyspersyjnych. Przedstawiono budowę i zasadę działania generatorów aerozolu powstającego podczas spalania stałego materiału aerosolotwórczego. Przedstawiono mechanizm powstawania i rozprzestrzeniania się aerozoli gaśniczych, oraz zaprezentowano wyniki dostępnych prac badawczych prowadzonych na świecie w celu wyjaśnienia mechanizmu działania gaśniczego aerozoli.

Summary

The article concerns the extinguishing aerosols and their classification within dispersion systems. A construction and functioning of generators of aerosol produced while combustion of an aerosol forming compound are described. There are presented both a mechanism of generation and transport of extinguishing aerosols and also some available results of worldwide research works, carried out in order to explain mechanism of extinguishing activity of aerosols.

Słowa kluczowe: aerosol, gaszenie, generator, rozprzestrzanie

Key words: aerosol, extinguishment, suppression, generator, transport

Wstęp

Z chwilą odkrycia negatywnego oddziaływania halonów na warstwę ozonową, rozpoczęto ograniczanie ich stosowania postanowieniami Protokołu Montrealskiego¹ z września 1987 roku oraz rozporządzenia Wspólnoty Europejskiej nr 2037/2000², Sytuacja ta stała się przyczyną rozwoju wielu alternatywnych metod i rozwiązań w zakresie gaszenia pożarów, zwłaszcza w tych obszarach, gdzie halony były jedynym dostępnym i skutecznym środkiem gaśniczym. Chociaż produkcja halonów zakończona została oficjalnie w 1994 roku, poszukiwania idealnego zamiennika halonów trwają nieprzerwanie na całym świecie.

Wśród propozycji obiecujących, a jednocześnie przyjaznych dla środowiska, środków gaśniczych, znalazły się również aerozole gaśnicze. Bezpośrednią przyczyną zainteresowania zdolnościami gaśniczymi aerozoli stały się obserwacje poczynione podczas badań w zakresie procesu spalania stałych paliw raketowych, realizowanych w ramach rosyjskiego programu kosmicznego SOYUZ³. Taki stan rzeczy potwierdza dodatkowo fakt, że pierwsze propozycje praktycznego wykorzystania aerozoli gaśniczych, powstających na drodze reakcji spalania stałych mieszanin aeroszotwórczych, do ochrony pomieszczeń na wypadek powstania pożaru, opracowane zostały właśnie w Rosji. Tam też wzięła swój początek koncepcja budowy i stosowania generatorów aerozolu gaśniczego wytwarzanego w procesie spalania specjalnego materiału aeroszotwórczego.

Aerozole gaśnicze znajdują zastosowanie w odniesieniu do grup pożarów A (spalanie na powierzchni materiału stałego), B i C⁴ zgodnie z PN-EN 2. Niemniej podczas planowania ochrony generatorami aerozolu gaśniczego należy mieć na uwadze, że istnieją takie zagrożenia, do zabezpieczenia których przedmiotowe medium gaśnicze nie będzie odpowiednie⁵ oraz, że w określonych okolicznościach zaistnieć mogą dodatkowe zagrożenia wynikające ze stosowania generatorów takie jak: redukcja widoczności wywołana unoszącym się aerozolem, potencjalna toksyczność produktów reakcji spalania stałej mieszaniny aeroszotwórczej, turbulencje powodowane gwałtownym wypływem strumienia aerozolu z generatora oraz zagrożenia termiczne związane z wytwarzaniem aerozolu na drodze reakcji

¹ Protokół montrealski w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową (Dz. U. z 1992, Nr 98, poz. 490)

² Rozporządzenie (WE) NR 2037/2000 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 czerwca 2000 r. w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową (Dz. Urz. WE Nr L 244 z dnia 29.09.2000 r.)

³ G.G. De Parenti: *Aerosol overview*, w: Fire Safety Engineering, July/August 2009, s. 25

⁴ Technical report CEN/TR 15276-1 *Fixed firefighting systems – Condensed aerosol extinguishing systems – Part 1: Requirements and test methods for components*, CEN, January 2009

⁵ P. Zbrożek, *Generatory aerozoli gaśniczych wytwarzanych pirotechnicznie*, w: Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, nr 02/03/04 2006, CNBOP, Józefów 2006, s. 234

spalania i jego uwalnianiem pod wysoką temperaturą z generatora^{6,7}. Sytuacje takie wymagają od producentów oraz dostawców urządzeń gaśniczych aerzolowych lub projektantów podejmowania dodatkowych zabiegów i/lub środków ostrożności w przedmiocie wyżej wymienionych zagrożeń.

Zarówno problematyka stosowania aerzoli na potrzeby ochrony przeciwpożarowej, w tym dotycząca powstawania i rozprzestrzeniania się aerzoli, mechanizmu ich działania gaśniczego, jak również zagadnienia budowy, oraz sposobu i efektów działania generatorów aerzolu gaśniczego, zostały jak dotychczas bardzo skromnie opisane w literaturze krajowej. Co więcej informacje dostępne w literaturze zagranicznej opracowane są w zróżnicowanym stopniu i zakresie, przez co utrudnione jest kompleksowe zapoznanie się z powyższymi zagadnieniami. Natomiast znajomość przywołanych zagadnień ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego rozeznania możliwości gaśniczych tego typu urządzeń.

Powyższa sytuacja stała się inspiracją do zebrania najważniejszych informacji w zakresie aerzoli gaśniczych oraz ich generatorów, w celu zaprezentowania w przedmiotowym artykule.

Aerzole gaśnicze jako układy dyspersyjne

Przez układy dyspersyjne rozumieć należy takie układy, w których małe cząstki jednej substancji rozproszone są w innej substancji⁸. W każdym układzie dyspersyjnym występuje granica faz, warunkującą możliwość wyróżnienia fazy rozproszonej, oraz fazy rozpraszającej, która otacza i oddziela od siebie cząstki fazy rozproszonej. Ponadto w układach dyspersyjnych dwufazowych, które stanowią przedmiot niniejszych rozważań, wyróżnia się następujące rodzaje rozproszenia⁹:

- rozproszenie cząsteczkowe (mieszaniny jednorodne, roztwory właściwe),
- rozproszenie koloidalne (układy niejednorodne, koloidalne),
- rozproszenie makroskopowe (układy niejednorodne, zawiesiny).

W tym wypadku za kryterium podziału przyjmuje się wielkość cząstek substancji rozproszonej. Niestety literatura w tym zakresie podaje rozbieżne wartości służące do klasyfikacji układów dwufazowych. Przyjęcie pewnej wielkości charakterystycznej, pozwala

⁶ AS/NZS 4487 *Pyrogen fire extinguishing systems*, AS/NZS, 1997.

⁷ NFPA 2010 *Standard for Fixed Aerosol Fire Extinguishing Systems*, NFPA, 2005 edition

⁸ P.W. Atkins, *Podstawy chemii fizycznej*, PWN, Warszawa 2002, s. 479

⁹ L. Czarnecki, T. Broniewski, O. Henning, *Chemia w budownictwie*, Wyd. Arkady, Warszawa 1995, s. 50

na dokonanie zgrubnego podziału układów dyspersyjnych. Wielkością taką może być długość fali światła widzialnego, gdyż cechą charakterystyczną koloidów jest to, że nie mogą być obserwowane pod mikroskopem optycznym. Niektóre źródła podają, że cząstki koloidalne to takie, których średnica wynosi nieco poniżej $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{10}$. Mając na uwadze zaproponowany wcześniej podział układów dyspersyjnych ze względu na rodzaj występującego rozproszenia, przyjęć można kryteria klasyfikacyjne układów jak niżej¹¹:

- układy o rozproszeniu cząsteczkowym, zwane powszechnie roztworami właściwymi – wielkości cząstek rozpraszanych $\leq 10^{-10} \text{ m}$
- układy koloidalne - wielkości cząstek rozpraszanych zawierają się w przedziale $10^{-6} \div 10^{-9} \text{ m}$
- układy o rozproszeniu makroskopowym, czyli zawiesiny niejednorodne - wielkości cząstek rozpraszanych $\geq 10^{-6} \text{ m}$

Cechą wyróżniającą powyższego podziału jest niewątpliwie fakt, że nie stoi on w sprzeczności z tezą dotyczącą cząstek rozpraszanych o średnicy odpowiadającej długości fali światła widzialnego.

Podziałowi podlegają następnie same układy koloidalne, które klasyfikuje się przede na podstawie stanu skupienia tworzących je składników. Szczegółowy podział układów dyspersyjnych, w tym układów o rozproszeniu koloidalnym prezentuje tabela nr 1.

Tabela nr 1¹²

Podział układów dyspersyjnych

Faza		Układy jednofazowe (roztwory właściwe)	Układy wielofazowe	
rozprasza- jąca	rozpraszana	rozproszenie cząsteczkowe	rozproszenie koloidalne	rozproszenie makroskopowe
Gaz	gaz	roztwory gazów	nie występuje	nie występuje
	ciecz	roztwory gazów z udziałem par cieczy	aerozole ciekłe – mgły	zawiesiny cieczy w gazie
	ciało stałe	roztwory gazów z udziałem par ciał stałych	aerozole stałe - dymy	zawiesiny stałych cząstek w gazie
Ciecz	gaz	roztwory gazów w cieczach	piany koloidalne	zawiesiny gazu w cieczy (piana)
	ciecz	roztwory cieczy	emulsje koloidalne	zawiesiny cieczy w

¹⁰ P.W. Atkins, *Podstawy chemii fizycznej*, PWN, Warszawa 2002, s. 479

¹¹ L. Czarnecki, T. Broniewski, O. Henning, *Chemia w budownictwie*, Wyd. Arkady, Warszawa 1995, s. 50

¹² Tamże, s. 51-52

				cieczy – emulsje
	ciało stałe	roztwory	zole – roztwory koloidalne	zawiesiny stałych cząstek w cieczy
Ciało stałe	gaz	roztwory gazów w ciałach stałych	stałe piany koloidalne	zawiesiny gazu w ciecie stałym – stała piana
	ciecz	roztwory cieczy w ciałach stałych	stałe emulsje	zawiesiny cieczy w ciecie stałym
	ciało stałe	kryształy mieszane	stałe zole	zawiesiny cząstek ciała stałego w ciecie stałym

Otrzymywanie roztworów koloidalnych, w tym aerozoli, możliwe jest na dwa sposoby - za pomocą metod dyspersyjnych lub kondensacyjnych. Pierwsza z metod polega na zmniejszaniu cząstek większych do momentu otrzymania cząstek o wymiarach koloidalnych. Metody kondensacyjne opierają się natomiast na wzajemnym łączeniu się cząstek znajdujących się w stanie rozproszenia molekularnego, na drodze odpowiednich reakcji chemicznych¹³. Warto przy tym podkreślić, że powstawanie układów koloidalnych determinowane jest przede wszystkim stopniem rozdrobnienia fazy rozpraszanej, choć nie bez znaczenia pozostaje odpowiedni dobór substancji rozpraszanej jak i rozpuszczalnika.

Roztwory koloidalne posiadają pewne cechy wyróżniające je spośród pozostałych układów dyspersyjnych. Podstawową ich cechą jest bardzo silne rozwinięcie powierzchni fazy rozproszonej w porównaniu z powierzchnią, jaka wyróżnia tę samą ilość substancji w fazie zwarte. Oprócz omówionych cech fizycznych układy koloidalne charakteryzuje występowanie m.in. zjawisk takich jak ruchy Browna, efekt Tyndalla, foto-, elektro-, i termoforeza¹⁴.

Po uwzględnieniu powyższych informacji przystąpić można do sformułowania definicji aerozolu gaśniczego. Pod pojęciem tym rozumieć należy taki układ dyspersyjny, w którym fazą rozpraszającą jest powietrze atmosferyczne lub inny gaz stanowiący wypełnienie strefy występowania aerozolu wraz z gazowymi produktami spalania materiału aeroszotwórczego, a fazą rozproszoną stanowią ciekłe i stałe produkty spalania tegoż materiału. Cechą wyróżniającą aerozole gaśnicze są ich właściwości inhibicyjne, które powodują przerwanie procesu spalania zachodzącego w fazie płomieniowej, po uprzednim dostarczeniu aerozolu do przestrzeni, w której dany płomień występuje.

Aerozole to układy polidyspersyjne, w których drobiny rozpraszanej fazy ciekłej i stałej przybierają zróżnicowaną wielkość i kształt. W przypadku aerozoli gaśniczych w powszechnym użyciu stosowane jest pojęcie średniej masowej średnicy aerodynamicznej

¹³ Tamże, s. 54

¹⁴ Tamże, s. 55

MMAD (ang. mass median aerodynamic diameter). Przez średnicę aerodynamiczną rozmiar należy średnicę kulki o jednostkowej gęstości $\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$, o tej samej granicznej prędkości opadania, co dana cząstka¹⁵. Według nomenklatury amerykańskiej¹⁶ MMAD jest to średnica, która wraz ze standardowym odchyleniem geometrycznym, używana jest do opisu statystycznego rozkładu wielkości cząsteczek aerozolu, bazując na wadze i wielkości geometrycznej tych cząsteczek. Przyjmuje się, że 50% cząstek występujących w aerozolu jest mniejszych, a pozostałe 50% jest większych od MMAD.

Z danych literaturowych¹⁷ wynika, że wielkość cząstek fazy rozproszonej aerozoli gaśniczych zawiera się zwykle w przedziale od 0,1 do 5 μm . Norma¹⁸ definiując aerozol gaśniczy podaje, że średnica występujących cząsteczek fazy rozpraszanej nie przekracza 10 μm . Badania wybranych konstrukcji generatorów aerozolu gaśniczego¹⁹ wskazują, że średnice modalne (tj. takie które mają największy udział w rozkładzie wielkości) cząstek aerozolu wytwarzanych podczas procesu spalania materiału aerosolotwórczego, wynoszą 5,54 μm (wg masy), 0,85 μm (wg liczności) oraz 2,52 μm (wg pola powierzchni cząstek).

Informacje te wskazują, że wynikiem pracy generatorów nie są wyłącznie aerozole, jak podano na etapie propozycji przyjęcia podziału dwufazowych układów dyspersyjnych, lecz dwu- lub trójfazowe układy o rozproszeniu makroskopowym, a więc zawiesiny kropelek cieczy i/lub cząstek ciał stałych w gazie (patrz tabela nr 1).

Wy tłumaczeniem zaistniałej sytuacji jest fakt, że problematyką cząstek aerosolowych zainteresowanych jest wiele dziedzin wiedzy. Wpływa to na rozproszenie informacji i omawianie przedmiotowych zagadnień z różnych punktów widzenia. Próby pogłębienia wiedzy w tym zakresie, nie pozwalają wyjaśnić zaistniałych wątpliwości. Bowiem wedle nazewnictwa stosowanego w literaturze przedmiotu wybuchów pyłów²⁰, aerozole gaśnicze winny być raczej określane mianem np. oparów (*ang. fumes*), lub dymów (*ang. smoke*), bądź pyłów, a tu w uszczegółowieniu na pyły drobne oraz najdrobniejsze, pyły makroskopowe bardzo drobne lub pyły koloidalne grube.

Biorąc pod uwagę powyższe, oraz mając na względzie utarte i powszechnie stosowane nazewnictwo w ochronie przeciwpożarowej, jak również występowanie opisanych w niniejszym rozdziale zjawisk charakterystycznych dla układów koloidalnych, w praktyce

¹⁵ J. Warych, *Oczyszczanie gazów: procesy i aparatura*, WNT, Warszawa 1998, s. 33

¹⁶ NFPA 2010 *Standard for Fixed Aerosol Fire Extinguishing Systems*, 2005 edition

¹⁷ N.P. Kopylov [et al.], *Toxic hazard associated with fire extinguishing aerosols: the current state of the art and a method for assessment*, Halon Option Technical Working Conference, HOTWC 2001, str. 332

¹⁸ NFPA 2010 *Standard for Fixed Aerosol Fire Extinguishing Systems*, 2005 edition

¹⁹ Technical report No. NAWCADPAX/TR-2004/123 *Risk assessment for acute exposure to pyrogen: a pyrotechnically-generated fire extinguishing aerosol*, NAWC, Maryland, 11 January 2005, s. 4

²⁰ T. Ostrowski, *Wybuchy pyłów w przemyśle*, Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa 1980, s. 5

nazwa aerozolu gaśniczego stosowana jest w odniesieniu do mieszaniny gazowych, ciekłych i stałych produktów spalania masy aerozolutwórczej używanej w generatorach aerozolu gaśniczego.

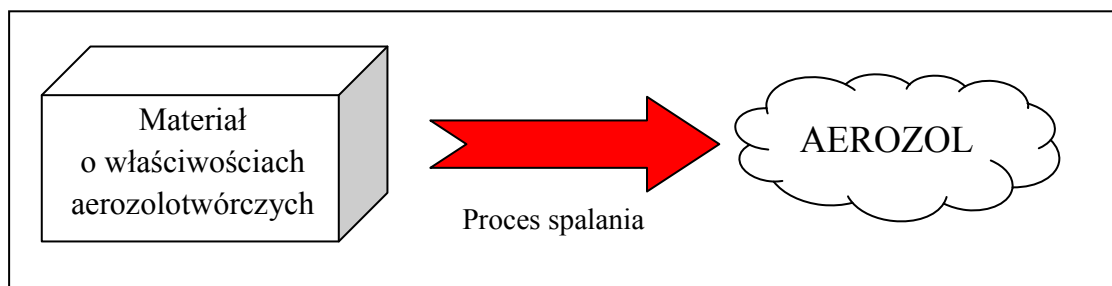
Budowa i zasada działania generatorów aerozolu gaśniczego

Generatory aerozolu gaśniczego to, w najogólniejszym ujęciu, urządzenia, w wyniku pracy których dochodzi do wytworzenia aerozolu gaśniczego i dostarczenia go do przestrzeni chronionej, bezpośrednio lub przez odpowiednio zaprojektowany i zainstalowany układ wpływowy.

Wyróżnia się dwa podstawowe sposoby wytwarzania aerozoli gaśniczych^{21 22}:

- aerozole wytwarzane podczas reakcji spalania (*ang. condensed aerosol*),
- aerozole wytwarzane pneumatycznie (*ang. dispersed aerosol*).

Oczywistym jest, że przedstawione sposoby warunkują występowanie dwóch rodzajów generatorów aerozoli gaśniczych, których zasady pracy opierają się na wymienionych sposobach wytwarzania aerozoli. Otóż w pierwszym z ww. rodzajów aerozoli, sposób ich wytwarzania ogranicza się do zainicjonowania i podtrzymania reakcji spalania mieszaniny odpowiednio dobranych materiałów stałych, zamkniętych w metalowej obudowie. Materiały takie odznaczać się muszą przede wszystkim dobrymi właściwościami aerozolutwórczymi w trakcie ich spalania, jako że w wyniku tego procesu dojść musi do wytworzenia aerozolu, który uwolniony do otoczenia odznaczał się będzie właściwościami inhibicyjnymi w odniesieniu do reakcji spalania innych materiałów.



Ryc. 1. Powstawanie aerozolu gaśniczego podczas spalania stałej mieszaniny aerozolutwórczej.

²¹ NFPA 2010 *Standard for Fixed Aerosol Fire Extinguishing Systems*, NFPA, 2005 edition

²² IMO MSC/Circ. 1007 *Guidelines for the approval of fixed aerosol fire-extinguishing systems equivalent to fixed gas fire-extinguishing systems, as referred to in SOLAS 74, for machinery spaces*, IMO, 26 June 2001, s. 1

Co się natomiast tyczy aerozoli gaśniczych wytwarzanych pneumatycznie, praca generatorów tych aerozoli przypomina pracę gaśnic proszkowych, bowiem w obydwu przypadkach proszek stosowany w urządzeniach przechowywany jest w specjalnie zaprojektowanym zbiorniku, a podawanie go do przestrzeni chronionej odbywa się przy użyciu strumienia sprężonego gazu. Niemniej jednak cechą różniącą te urządzenia jest średnica stosowanych ziaren proszku, która w przypadku generatorów aerozolu wytwarzanego pneumatycznie wynosi ok. $1 \mu\text{m}^{23}$, podczas gdy w gaśnicach proszkowych waha się od 20 do $200 \mu\text{m}^{24}$.

Warto tutaj zauważyć, że w powszechnym użyciu znajdują się głównie generatory aerozolu wytwarzanego na drodze reakcji spalania, natomiast w przypadku aerozoli wytwarzanych pneumatycznie niewielka średnica ziaren sprawia problemy m.in. na etapie ich wytwarzania oraz w zakresie utrzymania właściwości użytkowych w dłuższej perspektywie czasu. Wymienione powody w głównej mierze decydują o tym, że jak dotychczas generatorów tych aerozoli nie wdrożono do produkcji na skalę przemysłową.

Generatory aerozolu gaśniczego wytwarzanego podczas reakcji spalania pozostają w stanie dozoru pod ciśnieniem otoczenia. Występują one najczęściej pod postacią cylindrów, skrzynek bądź stanowią modyfikację tych kształtów. W zależności od przeznaczenia masa generatorów bywa różna. Wynosić może od kilkunastu gramów, np. w przypadku potrzeby miniaturyzacji urządzeń w celu zabezpieczenia miejsc trudnodostępnych, jak choćby podczas zabezpieczania podzespołów elektronicznych funkcjonujących w ramach większego urządzenia, nawet do kilkunastu i kilkudziesięciu kilogramów, gdy stosowane są do zabezpieczania przestrzeni wielkokubaturowych.

Efektem działania generatorów jest dostarczanie aerozolu do przestrzeni, w której zostały zainstalowane. Środek gaśniczy powstający w wyniku spalania mieszaniny substancji aeroszotwórczej odznacza się kilkoma ważnymi cechami. Unoszący się aeroszol nie przewodzi prądu elektrycznego, wobec czego podczas stosowania nie powoduje uszkodzeń urządzeń elektrycznych, niemniej warto tu zwrócić uwagę na zjawisko osiadania aerozolu i możliwość tworzenia na powierzchniach ciał stałych warstw przewodzących. Ponadto aerozole gaśnicze nie mają negatywnego wpływu na środowisko naturalne tzn. nie niszczą warstwy ozonowej Ziemi ($\text{ODP} = 0$), oraz nie wpływają na globalne ocieplenie ($\text{GWP} = 0$)²⁵.

²³ P. Zbrożek, *Generatory aerozoli gaśniczych wytwarzanych pirotechnicznie*, w: Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, nr 02/03/04 2006, CNBOP, Józefów 2006, s. 230,

²⁴ A. Mizerski, M. Sobolewski, *Środki gaśnicze*, SGSP, Warszawa 1997, s. 191

²⁵ B. Król, *Aerozole gaśnicze*, w: Przegląd pożarniczy, nr 6/2000, KG PSP, Warszawa 2000, s. 23

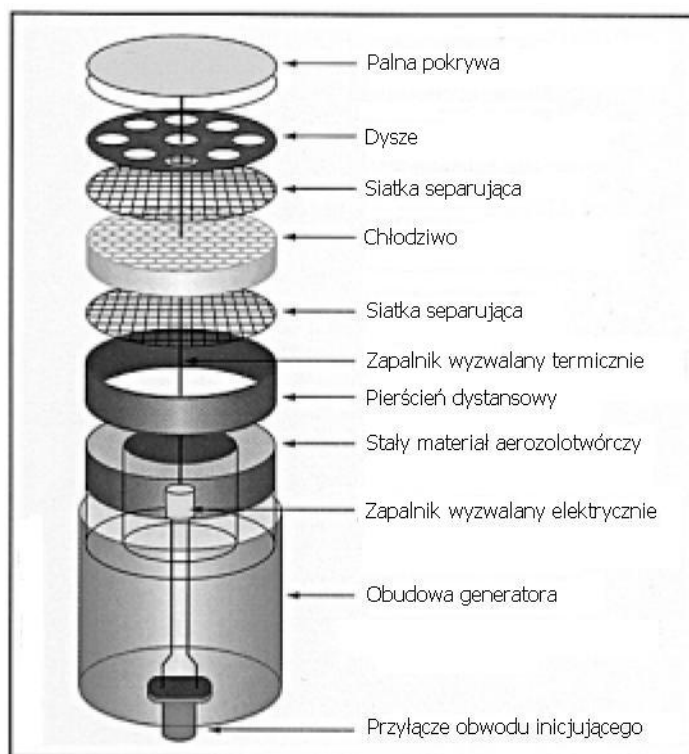
Reakcjom zachodzącym podczas pracy generatorów aerozolu gaśniczego towarzyszy szereg zjawisk, charakterystycznych dla procesu spalania. Są to przede wszystkim wzrost temperatury oraz wzrost ciśnienia wewnątrz urządzenia. Spowodowane jest to gwałtownym przebiegiem procesu spalania, podczas którego dochodzi do wydzielenia znacznej porcji energii, przy jednoczesnym generowaniu produktów spalania o dużej objętości w stosunkowo krótkim czasie. Temperatura występująca podczas spalania materiału aerozolutwórczego wewnątrz generatora dochodzić może do 1500⁰C²⁶.

W konstrukcji generatorów aerozolu gaśniczego wytwarzanego podczas procesu spalania specjalnego materiału aerozolutwórczego wyróżnić można podstawowe podzespoły i materiały służące do ich budowy. Są to m.in.:

- metalowa obudowa, wraz z komorami środka aerozolutwórczego, reakcji spalania i chłodzenia,
- materiał aerozolutwórczy,
- zapalnik wyzwalany elektrycznie,
- zapalnik wyzwalany termicznie (występujący opcjonalnie),
- środek chłodzący (chłodziwo),
- układ wypływowý strumienia uwalnianego aerozolu.

Na rycinie 2 zobrazowano przykładową konstrukcję generatora aerozolu gaśniczego wyzwalanego pirotechnicznie.

²⁶ N.S. Kopylov [et al.]: *The modification of the characteristics of the condensed fire extinguishing aerosol during its distribution through the pipelines*, NIST Special Publication 984-2 Halon Options Technical Working Conference, 14th. Proceedings. HOTWC 2004, Albuquerque (NM), s. 1



Ryc. 2. Konstrukcja generatora aerozolu gaśniczego wytwarzającego aeroszol w procesie spalania materiału aeroszotwórczego²⁷.

Głównym zadaniem obudowy generatora jest zapewnienie bezpiecznych oraz efektywnych warunków pracy urządzenia. Realizacja tych zadań możliwa jest poprzez izolowanie strefy spalania materiału aeroszotwórczego od przestrzeni, w której generator został zainstalowany. Jednocześnie obudowa zapewnia warunki dla przebiegu procesów powstawania i transportu wydzielonego aerozolu na zewnątrz urządzenia. By było to możliwe obudowa dzieli zazwyczaj przestrzeń wewnętrzną generatora na trzy podstawowe komory:

- komorę środka aeroszotwórczego – w której umiejscowiona jest mieszanina paliwo - utleniacz,
- komorę reakcji chemicznej – w której zachodzi proces spalania środka aeroszotwórczego
- komorę chłodzenia – w której dochodzi do obniżenia temperatury wytworzonego aerozolu.

W obudowie, w bezpośrednim sąsiedztwie komory chłodzenia, znajdują się otwory, którymi bezpośrednio, bądź za pomocą dodatkowo zainstalowanych elementów

²⁷ P. Kangedal, T. Hertzberg, M. Arvidson, *Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning – en litteraturstudie*, SP RAPPORT 2001:28, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Szwecja 2001, s. 12

wyływowych, aerozol odprowadzany jest na zewnątrz urządzenia. Obudowy generatorów wykonywane są z materiałów wytrzymałych i odpornych na wysoką temperaturę pracy urządzenia. Obecnie jako materiał obudowy stosowane są najczęściej stale nierdzewne lub stopy aluminium.

Najistotniejszym elementem składowym generatorów, z punktu widzenia realizowanych przez nie zadań, jest umiejscowiona wewnątrz obudowy urządzenia stała mieszanina aerozolutwórcza, zwana również paliwem stałym. Specjalne właściwości tej kompozycji sprawiają, że produkty jej spalania, występujące w stanie gazowym, ciekłym i stałym, oddziałują na środowisko pożaru, prowadząc do jego ugaszenia.

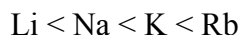
Masę aerozolutwórczą stanowi mieszanina paliwa z utleniaczem. Paliwo pełni jednocześnie rolę spoiwa. Substancja aerozolutwórcza występuje zazwyczaj w postaci sprasowanego bloku materiału. Pomimo występującej różnorodności pomiędzy stosowanymi obecnie kompozycjami aerozolutwórczymi, z reguły w ich składzie wyróżnić można²⁸:

- nieorganiczne utleniacze np. KNO_3 , KClO_4 ,
- dodatkowe sole potasu (rzadziej sodu) np. KCl ,
- organiczne lub nieorganiczne materiały palne np. mieszaniny żywic fenolowych, poliestrowych i epoksydowych, Mg.

W wyniku gwałtownej reakcji spalania paliwa, która zachodzi wewnątrz obudowy generatora, powstaje aerozol gaśniczy. Formowany jest on z gazowych produktów reakcji spalania paliwa z utleniaczem tj. azotu, dwutlenku węgla i pary wodnej, a towarzyszące im związki potasu (np. węglany, wodorowęglany lub chlorki) występują najczęściej w fazie stałej i ciekłej. Ok. 40 do 50% wag. stałej mieszaniny aerozolutwórczej daje fazę ciekłą i stałą (patrz tabela nr 2). Z pozostałej części mieszaniny generowane są gazowe produkty spalania, uwalniane na zewnątrz, oraz żużel i popiół, zalegające wewnątrz generatora, po zakończeniu jego pracy. W zależności od rodzaju mieszaniny aerozolutwórczej wśród gazowych produktów spalania znaleźć się mogą również tlenek węgla, tlenki azotu, metan, amoniak, cyjanowodór itp. Przeważnie substancje te identyfikowane są w ilościach śladowych, choć poziom emisji substancji toksycznych przez dany rodzaj kompozycji aerozolutwórczej winien być każdorazowo potwierdzany stosownymi wynikami badań.

²⁸ V.V. Agafonov [et al.]: *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols* NIST SP 984-3, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings. HOTWC 2005, Albuquerque, NM, s. 1

Z dostępnych danych literaturowych wynika, że efektywność gaśnicza soli różnych metali, występujących w połączeniu z tym samym anionem rośnie w następującej kolejności²⁹:



Ponadto stwierdzono, że łatwość pirolizy, przekładająca się na skuteczność gaśniczą, związków tego samego metalu z różnymi anionami ulegać będzie zmianie według poniższego schematu³⁰:

szczawian > cyjanek > węglan > jodek > bromek > chlorek > siarczan > fosforan

Biorąc pod uwagę, zarówno właściwości toksyczne pewnych związków, bądź ich pochodnych (szczawiany, cyjanki) oraz utrudniony dostęp do wybranych metali (rubid), z przedstawionych porównań wynika, że węglany potasu stanowiąc będą środkiem gaśniczym obdarzony najlepszymi, możliwymi do uzyskania cechami gaśniczymi, z jednoczesnym brakiem zastrzeżeń, co do bezpieczeństwa w zakresie wdrożenia do powszechnego stosowania.

Dla porównania z powyższą informacją w tabeli nr 2 przedstawiono zestawienie wybranych rodzajów mieszanin aerozolutwórczych wraz z ich wybranymi parametrami, wśród których znalazły się: α – współczynnik nadmiaru tlenu, η_a - procentowy udział masy stałej mieszaniny aerozolutwórczej z której wytwarzany jest aerozol, V_{gf} – objętość gazowych produktów spalania mieszaniny aerozolutwórczej (przeliczana na jednostkę masy paliwa), F_{sf} – masa fazy stałej produktów spalania mieszaniny aerozolutwórczej (przeliczana na jednostkę masy paliwa).

Tabela 2.³¹

Parametry wybranych mieszanin aerozolutwórczych oraz powstałego aerozolu

Rodzaj masy aerozolutwórczej (główne subst. składowe)	α	η_a [% mas.]	V_{gf} [m ³ /kg]	F_{sf} [% mas.]	Skład chemiczny aerozolu (60 s po wytworzeniu)	Wielkość cząstek fazy stałej [μm] (udział w %)
1	2	3	4	5	6	7
STK-5-1 (KNO ₃ , iditol, C, dodatki specjalne)	1.0	85-87	0.22-0.24	52-56	K ₂ CO ₃ ·nH ₂ O, KOH, CO ₂ , N ₂	<2 (42) 2-5 (38) >5 (20)

²⁹ R.E. Tapscott, J.D. Mather, *Thermodynamics of metal agent fire extinguishment*, NIST Special Publication 984, Halon Options Technical Working Conference, 12th Proceedings HOTWC 2002, April 30-May 2, 2002, Albuquerque, NM, s. 2

³⁰ A. Mizerski, M. Sobolewski, *Środki gaśnicze*, SGSP, Warszawa 1997, s. 191

³¹ V.V. Agafonov [et al.], *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols* NIST SP 984-3, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings. HOTWC 2005, Albuquerque, NM, s. 2

STK-5-2 (KNO ₃ , iditol, dodatki specjalne)	0.8	88	0.29	30	K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O, KOH, KHCO ₃ , CO ₂ , CO, N ₂	<2 (36) 2-5 (38) >5 (26)
STK-5-3 (KNO ₃ , iditol, dodatki specjalne)	0.5	90	0.36	38	K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O, KHCO ₃ , C, KOH, CO ₂ , CO, N ₂	<2 (62) 2-5 (26) >5 (12)
STK-2MD (KNO ₃ , iditol, DCDA, dodatki specjalne)	0.4-0.5	95-97	0.44-0.48	42-46	K ₂ CO ₃ ·nH ₂ O, C, KHCO ₃ , KOH, NH ₄ HCO ₃ , CO ₂ , CO, N ₂	<1 (52) 1-2 (24) 2-5 (16) >5 (8)
L (KNO ₃ , KClO ₄ , mieszaniny żywic epoksydowe, dodatki specjalne)	0.4-0.5	92-95	0.42-0.52	44-46	KCl, K ₂ CO ₃ ·nH ₂ O, C, CO ₂ , CO, N ₂	<1 (36-40) 1-2 (20-22) 2-5 (20-24) >5 (18-20)
SBK-2 (KNO ₃ , KClO ₄ , diethyl- thermoplast, mieszaniny żywic epoksydowych, dodatki specjalne)	0.4-0.6	94-96	0.54-0.58	42-48	K ₂ CO ₃ ·nH ₂ O, KOH, KHCO ₃ , K _n O _m , KCl, N ₂ , CO, CO ₂	<1 (58) 1-2 (20) 2-5 (12) >5 (10)
TCh (KNO ₃ , nitroceluloza, dodatki specjalne)	0.5-0.6	95-98	0.60-0.75	38-45	K ₂ CO ₃ ·nH ₂ O, KOH, KHCO ₃ , CO ₂ , N ₂ , CO, N _x O _y	<1 (60) 1-2 (22) 2-5 (10) >5 (8)

Z tabeli nr 2 wynika, że w składzie każdego z aerozoli gaśniczych otrzymywanych z wymienionych środków aerozolutwórczych znajdują się węglany potasu, co stanowić będzie o ich wysokiej skuteczności gaśniczej. Z tabeli wynika również, że niezwykle ważny jest dobór składników tworzących substancję aerozolutwórczą. Wszelkie modyfikacji składu masy aerozolutwórczej w istotny sposób wpływają przede wszystkim na przebieg procesu spalania tej masy, co w dalszej kolejności przekłada się na charakter i specyficzne właściwości otrzymywanego aerozolu.

Kolejnym elementem składowym generatorów są zapalniki, których wyzwolenie możliwe jest na drodze elektrycznej, bądź termicznej. Zapalniki umieszczane są wewnątrz urządzenia, w bezpośrednim sąsiedztwie środka aerozolutwórczego, tak by możliwe było oddanie największej ilości generowanego przez nie ciepła do bloku materiału aerozolutwórczego. Rodzaj zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego w zakresie aktywacji urządzenia jest niezmiernie ważny, zwłaszcza z punktu widzenia niezawodności działania urządzenia, gdyż głównym zadaniem zapalników jest uruchomienie generatora poprzez zainicjowanie reakcji spalania masy aerozolutwórczej. W przypadku zapalników elektrycznych, ich konstrukcja oparta jest na zastosowaniu spłonki elektrycznej, połączonej przewodem elektrycznym z urządzeniem sterującym pracą generatora (bądź grupy generatorów). Najczęściej przedmiotowe urządzenie sterujące stanowi jednocześnie podzespół większego systemu np. systemu sygnalizacji pożarowej lub systemu sterowania gaszeniem. W chwili wymagającej zadziałania generatora, urządzenie sterujące wysyła linią sygnałową impuls elektryczny o określonym natężeniu prądu przy odpowiednim napięciu

i przez minimalny okres czasu (np. 0,8 A, przy 12 V przez 3 s) powodując aktywację zapalnika, inicjującego zapłon mieszanki paliwo - utleniacz umieszczonej w obudowie generatora, wywołując tym samym aktywację generatora aerozolu gaśniczego.

Dodatkowo lub opcjonalnie generatory aerozolu gaśniczego wyposażone mogą zostać w zapalnik wyzwalany termicznie. Występuje on zazwyczaj w postaci termoczułego lontu, zaprojektowanego na określoną temperaturę zadziałania (np. 200⁰C). Po przekroczeniu określonej temperatury otoczenia następuje samozapłon lontu, który w dalszej kolejności uruchamia zapalnik generatora powodując rozpoczęcie reakcji spalania środka aeroszotwórczego. Zapalnik termiczny posiada jeszcze jedną bardzo ważną zaletę – jego obecność w urządzeniu umożliwia autonomiczną pracę generatorów. Możliwe jest wtedy umieszczenie urządzeń bezpośrednio w strefie narażonej na wystąpienie pożaru, bez potrzeby stosowania dodatkowych urządzeń sterujących, systemów, zabezpieczeń etc., gdyż urządzenie to zadziała w sposób samodzielny, niezwłocznie po przekroczeniu temperatury samozapłonu lontu.

Jak już wcześniej wspomniano średnie temperatury reakcji spalania zachodzące wewnątrz generatorów sięgają od 800⁰C nawet do 1500⁰C³². Zatem zanim aeroszot zostanie uwolniony na zewnątrz urządzenia musi zostać poddany procesowi obniżenia temperatury. Z reguły w generatorach pomiędzy komorą spalania, a otworami umożliwiającymi emisję aerozolu gaśniczego na zewnątrz urządzenia, znajduje się materiał stanowiący chłodziwo. W skład chłodziwa wchodzi substancje, których głównym zadaniem jest zapobieganie przed wydostawaniem się płomieni towarzyszących reakcji spalania masy aeroszotwórczej na zewnątrz urządzenia. Stosowane chłodziwo wpływa również na maksymalne obniżenie temperatury aerozolu przed jego emisją na zewnątrz, oraz zatrzymanie rozgrzanych cząstek stanowiących pozostałość po reakcji spalania wewnątrz urządzenia, tak by nie stwarzały one zagrożenia dla osób bądź przedmiotów znajdujących się w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Substancja chłodząca umiejscawiana w generatorach występuje najczęściej pod postacią granulatu bądź tabletek o kształcie cylindrycznym. W składzie chłodziwa z reguły wyróżnić można³³:

³² N.S. Kopylov [et al.], *The modification of the characteristics of the condensed fire extinguishing aerosol during its distribution through the pipelines*, NIST Special Publication 984-2 Halon Options Technical Working Conference, 14th. Proceedings. HOTWC 2004, Albuquerque (NM), str. 1

³³ D.L. Rusin, A.P. Denisyuk, *Composition for cooling and simultaneous filtration of the gas-aerosol fire-extinguishing mixture*. w: World Intellectual Property Organization. Opis patentowy. WO 2005/023370 A2. Opubl. 17.03.2005

- wypełniacz odpowiedzialny za pochłanianie ciepła – głównie węglan magnezu i/lub węglany metali I i II grupy układu okresowego pierwiastków,
- utleniacz – azotan, nadchloran potasu, bądź ich mieszanina,
- dodatki w procesie produkcyjnym – grafit, stearynian sodu lub wapnia, bądź ich mieszanina,
- nieorganiczne spoiwo – chlorek potasu, krzemian metalu alkalicznego (sodu lub potasu), bądź ich mieszanina,
- pozostałość stanowi sorbent – zeolit lub żel krzemionkowy bądź ich mieszanina.

Substancja pochłaniająca ciepło redukuje temperaturę strumienia aerozolu. Obecność nieorganicznego spoiwa oraz krzemianów metali alkalicznych zapewnia odpowiednie właściwości użytkowe mieszaniny. Utleniacz obniża stężenie produktów niepełnego spalania, a obecność sorbentu wpływa na obniżenie stężenia substancji toksycznych przed emisją strumienia aerozolu do otoczenia.

Po ochłodzeniu aerozol gaśniczy uwalniany jest na zewnątrz urządzenia poprzez otwory wykonane w obudowie. Kształtowanie strumienia aerozolu o bezpośrednim zasięgu od kilkudziesięciu centymetrów do kilku metrów możliwe jest za pomocą dodatkowych dysz. Specjalne dyfuzory nakładane na dysze pozwalają na modyfikowanie zasięgu i kształtu strumienia, a jednocześnie, tak jak chłodziwo, wychwytyują i zatrzymują część zanieczyszczeń z aerozolu, w taki sposób, by nie wydostały się one na zewnątrz urządzenia.

Dzięki bardzo małym rozmiarom cząstek powstających podczas spalania mieszaniny aerozolutwórczej aerozole gaśnicze mogą utrzymywać się w całej objętości chronionej przestrzeni przez dłuższy czas, stanowiąc zabezpieczenie pomieszczenia przed rozwojem pożaru bądź ponownym zapaleniem.

Powstawanie i rozprzestrzenianie się aerozoli gaśniczych

Fenomen powstawania cząsteczek o dużym stopniu rozdrobienia, formowanych w trakcie ochładzania par substancji stałej, znalazł szereg zastosowań przemysłowych. Ze względu na szeroki obszar stosowania aerozoli wytwarzanie cząstek o niewielkich rozmiarach była i wciąż pozostaje przedmiotem wielu rozważań. Literatura fachowa wskazuje jednak, że nie zawsze generacja aerozolu występuje w sposób zamierzony, jak ma to miejsce

w przemyśle, wskazując, jako jeden z licznych przykładów, emisję aerozoli podczas spalania stałych paliw raketowych³⁴.

Warto przy tej okazji przypomnieć, że na etapie wprowadzania do powszechnego obrotu na rynku polskim pierwszych generatorów aerozolu gaśniczego, ich dystrybutorzy informowali, że materiał o właściwościach aeroszotwórczych umieszczany w generatorach aerozolu gaśniczego to stałe paliwo raketowe. Wskazuje na to przede wszystkim skład chemiczny paliwa, który w obydwu przypadkach, tj. jednorodnych paliw raketowych i materiałów aeroszotwórczych umieszczanych w generatorach aerozolu wytwarzanego podczas procesu spalania, oparty jest na obecności azotanu potasu w mieszaninie paliwa z utleniaczem. Azotan potasu, zwany również saletrą potasową lub indyjską, służy, podobnie jak azotan sodu, jako utleniacz stałych paliw raketowych, a na szeroką skalę wykorzystywany jest do produkcji materiałów pirotechnicznych i wybuchowych³⁵.

Niemniej by mieszanka paliwa z utleniaczem, stosowana w generatorach aerozolu gaśniczego, mogła zostać wprowadzona do powszechnego użycia musi zostać poddana procesowi flegmatyzacji. Proces ten w technice wojskowej służy zwiększeniu stabilności paliwa przy małych szybkościach spalania³⁶. Wobec powyższego jasnym jest, że bez dodatku substancji spowalniających szybkość reakcji spalania masy aeroszotwórczej nie byłoby możliwe bezpieczne stosowanie generatorów aerozolu gaśniczego.

Przytoczone informacje mają istotne znaczenie dla omówienia zjawiska formowania się cząstek aerozoli gaśniczych podczas działania generatorów. Możliwe jest bowiem wzbogacenie posiadanej wiedzy na temat funkcjonowania generatorów aerozolu gaśniczego o dodatkowe informacje, poprzez odniesienie się do literatury wojskowej z zakresu balistyki, w szczególności do teorii dotyczącej stosowania silników raketowych na paliwo stałe.

Szybkość spalania paliwa w silniku raketowym zależy od warunków określających intensywność procesów przekazywania ciepła przez produkty spalania warstwie powierzchniowej ładunku oraz od zasobu energii cieplnej, zawartej w paliwie. Do czynników określających intensywność wymiany ciepła pomiędzy produktami spalania, a częścią nie spalonego ładunku należy zaliczyć przede wszystkim ciśnienie gazów otaczających ładunek i prędkość gazów wzdłuż palącej się powierzchni oraz ich temperaturę. Ze wzrostem tych wielkości rośnie intensywność wymiany ciepła, następstwem czego jest wzrost prędkości

³⁴ R. Bandyopadhyaya, A.A. Lall, S.K. Friedlander, *Aerosol Dynamics and the synthesis of fine solid particles*, w: Powder Technology, nr 139, 2004, str. 193

³⁵ *Słownik chemii praktycznej*, Wyd. Wiedza Powszechna, Warszawa 1992

³⁶ Z. Przędzak, *Silniki raketowe na paliwo stałe*, Przegląd Wojsk Lotniczych i Wojskowej Ochrony Powietrznej Kraju, 1984, Nr 6, str. 2

spalania. Temperatura początkowa paliwa stanowi o zasobach energii cieplnej ładunku. W niezmiennych warunkach, w fazie gazowej otaczającej ładunek, prędkość spalania rośnie ze wzrostem początkowym temperatury paliwa. Ze względu na fakt, że temperatura produktów spalania uwarunkowana jest składem paliwa, w przypadku rozpatrywania znanego paliwa można ograniczyć się do analizy prędkości spalania tego paliwa (u) w funkcji trzech zmiennych tj. ciśnienia (p), prędkości strumienia gazów (w) i temperatury początkowej ładunku (T_0):

$$u = f(p; w; T_0) \quad (3-1)$$

Ze względu na podstawowe znaczenie powyższej zależności w teorii silników raketowych na paliwo stałe, została ona nazywana prawem szybkości spalania stałych paliw raketowych³⁷. Mając na uwadze, iż istnieje możliwość uzyskania niezbędnych informacji na temat budowy i składu chemicznego materiału stosowanego w generatorach aerozolu gaśniczego, przeto powyższa zależność może być wykorzystana również do analizy szybkości spalania substancji aerozolutwórczych.

Kolejne opisywane zagadnienia dotyczą zjawisk zachodzących w przestrzeni zajmowanej przez uwolniony aerozol. Określenie rodzaju, charakteru i wielkości zmian w tym zakresie możliwe jest po zapoznaniu się z mechanizmami występującymi podczas rozprzestrzeniania się aerozoli. Ważnym źródłem informacji na ten temat jest wiedza dotycząca zachowania się dymu w przestrzeniach zamkniętych. Dym występujący podczas pożaru to również układ dyspersyjny w postaci aerozolu, przy czym podobnie jak aerozole gaśnicze, proces jego powstawania opiera się na reakcji spalania, co dodatkowo przemawia za możliwością skorzystania z wiedzy dostępnej w tym zakresie.

Układy koloidalne, których przedstawicielem są m.in. aerozole, charakteryzują się niewielką termodynamiczną stabilnością³⁸. Znajduje to swoje odzwierciedlenie w rzeczywistości, gdyż podczas rozprzestrzeniania się aerozoli cząsteczki fazy rozproszonej ulegają ciągłym przemianom, na które składają się procesy przemieszczania, wzajemnego łączenia się oraz osadzania na powierzchniach. Spowodowane jest to oddziaływanie zarówno sił wynikających z wzajemnego oddziaływania cząstek gazu i fazy rozpraszanej, jak i wskutek działania sił zewnętrznych, takich jak siły ciężkości, bezwładności, elektrostatyczne, termiczne, dyfuzyjne, magnetyczne itp. Nadmienić w tym miejscu należy, że nie bez znaczenia pozostaje istnienie różnicy w wielkości i kształcie cząsteczek tworzących aerozol.

³⁷ Tamże, s. 3

³⁸ P.W. Atkins, *Podstawy chemii fizycznej*, PWN, Warszawa 2002, s. 481

Jedną z obserwowanych przemian w aerozolu jest łączenie się mniejszych cząsteczek w większe. Proces ten zwany jest koagulacją, bądź aglomeracją. Koagulacja występuje na skutek zderzenia się cząsteczek aerozolu w czasie ich ruchu. Po zetknięciu siły pomiędzy stykającymi się cząsteczkami są dostatecznie duże, aby uniemożliwić im ponowne rozłączenie się. Podstawowym parametrem opisującym proces koagulacji jest współczynnik koagulacji Γ . W równaniu koagulacji przyjmuje on wartość stałą³⁹:

$$\frac{dN}{dt} = -\Gamma \cdot N^2 \quad (3-8)$$

gdzie N oznacza całkowite stężenie (liczbę cząstek) aerozolu w danej chwili czasowej t .

W wyniku koagulacji dochodzi do zmniejszenia liczby cząsteczek rozpraszanych przy jednoczesnym wzroście ich masy. Wzrost masy przyspiesza proces sedymentacji, która polega na opadaniu cząsteczek zgodnie z kierunkiem oddziaływania siły ciężkości tj. do Ziemi, gdyż zjawisko to wywołane jest siłą grawitacji.

Prędkość opadania (V_s) może być wyznaczona na podstawie poniższej zależności⁴⁰:

$$V_s = \frac{\rho_p \cdot d^2 \cdot g \cdot C}{18 \cdot \eta} \quad (3-9)$$

gdzie: d – średnica cząsteczki, ρ_p – gęstość cząsteczki, g – przyciąganie ziemskie, η – lepkość dynamiczna powietrza, C – poprawka Cunninghama (zwana również współczynnikiem poślizgu Cunninghama).

Jeżeli rozmiary rozpraszanych cząstek są zbliżone do średniej drogi swobodnej cząsteczek gazu, to gaz ten przestaje stanowić ośrodek ciągły dla cząstek aerozolowych⁴¹. Aby zatem oddać warunki rzeczywiste równanie (3-9) wymaga zastosowania poprawki Cunninghama ($C(d)$), której wartość wyznacza się przy użyciu następującej zależności⁴²:

$$C(d) = 1 + K_n \left[1,142 + 0,558 \cdot \exp\left(\frac{-0,999}{K_n}\right) \right] \quad (3-10)$$

Liczba Knudsen (K_n) występująca we wzorze (3-10), reprezentuje stosunek średniej drogi swobodnej cząsteczek powietrza (λ) do promienia cząstki rozpraszanej ($d/2$):

³⁹ B. Mizieliński, *Systemy oddymiania budynków. Wentylacja*, WNT, Warszawa 1999

⁴⁰ K.M. Butler, G.W. Mulholland, *Generation and Transport of Smoke Components*, w: Fire Technology, 40, 2004, s. 158

⁴¹ J. Warych: *Oczyszczanie gazów: procesy i aparatura*, WNT, Warszawa 1998, s. 49

⁴² K.M. Butler, G.W. Mulholland, *Generation and Transport of Smoke Components*, w: Fire Technology, 40, 2004, 158

$$K_n = \frac{2 \cdot \lambda}{d} \quad (3-11)$$

W przypadku aerozolu gaśniczego, ruch cząsteczek wywołujący zmniejszenie stężenia wskutek koagulacji i osiadania drobin na dostępnych powierzchniach powodowany jest również dwoma innymi zjawiskami tj. termoforezą oraz dyfuzją. Termoforeza polega na przemieszczaniu się drobin aerozolu wskutek istnienia gradientu temperatury. Ruch ten odbywa się od strefy o temperaturze wyższej do strefy o temperaturze niższej⁴³. W warunkach pożarowych, jak również w procesie powstawania aerozolu gaśniczego zjawisko termoforezy nabiera szczególnego znaczenia, ponieważ w obydwu przypadkach występują znaczące różnice temperatur. Dla drobin aerozolu mniejszych od drogi swobodnej cząsteczek powietrza w którym są rozpraszane prędkość termoforetyczna (V_t) nie zależy od wielkości tych drobin i obliczana jest z następującego wzoru⁴⁴:

$$V_t = \frac{-0,55 \cdot \eta}{\rho_g \cdot T} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3-12)$$

gdzie: T – temperatura powierzchni cząstek, dT/dx - gradient temperatury, η – lepkość dynamiczna powietrza, a ρ_a – gęstość powietrza. W przypadku drobin aerozolu większych od drogi swobodnej cząsteczek powietrza prędkość termoforetyczna ulega wzrostowi o 3 do 10 razy, zależnie od przewodności cieplnej drobin.

Cząstki gazu pozostają w nieustannym bezładnym ruchu. Jeśli drobinny aerozolu rozpraszane przez dany gaz, posiadać będą dostatecznie małe rozmiary, wówczas zderzenia z cząsteczkami gazu stać się mogą przyczyną ich nieuporządkowanego ruchu. Wzajemne zderzenia cząsteczek gazu i rozpraszanych drobin wywołują zjawisko zwane powszechnie ruchami Browna. Dyfuzyjny ruch cząsteczek określany jest za pomocą współczynnika dyfuzji D. Na wartość współczynnika wpływ ma rodzaj i temperatura gazu oraz rozmiar cząstek rozpraszanych. Współczynnik D obliczany jest za pomocą równania Stokesa-Einsteina⁴⁵:

$$D = \frac{k \cdot T \cdot C}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d} \quad (3-13)$$

gdzie: k – stała Boltzmanna, pozostałe wielkości jak w równaniu 3-9.

Jeżeli w mieszaninie dwóch gazów wystąpi różnica stężeń pomiędzy dwoma dowolnymi punktami, to wystąpi zjawisko dyfuzji gazowej. Ruch masy gazu zachodzić

⁴³ J. Warych, *Oczyszczanie gazów: procesy i aparatura*, WNT, Warszawa 1998, s. 54

⁴⁴ K.M. Butler, G.W. Mulholland, *Generation and Transport of Smoke Components*, w: *Fire Technology*, 40, 2004, s. 157

⁴⁵ Tamże, s. 158

będzie w kierunku spadku stężenia zgodnie z prawem Ficka. W przypadku, gdy w układzie takim znajdzie się aerozol, jego cząstki ulegać będą zderzeniom z cząsteczkami gazu, przy czym obserwowane zderzenia będą występować częściej w kierunku przepływu gazu dążącego do wyrównania gradientu stężenia. Zjawisko przemieszczania się cząstek aerozolowych w kierunku spadku gradientu stężenia zwane jest dyfuzjoforezą⁴⁶. W warunkach pożarowych występowanie również tego zjawiska będzie miało miejsce, niemniej bez znaczącego wpływu na przemieszczanie się aerozolu.

Zjawiskiem niekorzystnym z punktu widzenia stosowania aerozoli gaśniczych jest zmniejszenie jego stężenia w przestrzeni chronionej w miarę upływu czasu. Szacowanie wpływu poszczególnych zjawisk na zmniejszenie stężenia, możliwe jest poprzez porównanie prędkości przemieszczania się cząstek aerozolu spowodowanych występowaniem omówionych zjawisk. W tabeli nr 3 przedstawiono wyniki analizy porównawczej skutków oddziaływania zjawisk: sedymentacji, dyfuzji i termoforezy, na redukcję stężenia aerozolu w powietrzu.

Porównanie wykonano na drodze obliczeń dla czterech układów monodispersyjnych o średnicy drobin z zakresu 0,01 do 10 μm . W rozpatrywanym układzie przyjęto gradient temperatury rzędu 100 K/cm. Rozważania przeprowadzono dla powierzchni 1 cm^2 w czasie 100 s, przyjmując stężenie aerozolu równe 10^6 cząsteczek/ cm^3 . We wszystkich przypadkach założono, że cząsteczka po zetknięciu się z powierzchnią (kontrolną) już na niej pozostaje.

Tabela 3.⁴⁷

Wpływ zjawisk wywołujących rozprzestrzenianie się aerozolu na zmiany jego stężenia w zajmowanej przestrzeni

Średnica drobin, μm	Termoforeza	Dyfuzja	Sedymentacja
0,01	$2,8 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^5$	$6,7 \cdot 10^2$
0,1	$2,0 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^4$	$8,6 \cdot 10^3$
1,0	$1,3 \cdot 10^6$	$5,9 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^5$
10,0	$7,8 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^7$

Wyniki analizy ukazują, że za wyjątkiem przypadku dotyczącego drobin o największej średnicy, termoforeza odgrywać będzie najważniejszą rolę w obniżaniu stężenia aerozolu. Niemniej wartość gradientu temperatury 100 K/cm odbiega od spodziewanych warunków rzeczywistych podcz aspożaru przez co domniemywać należy, że wpływ tego mechanizmu na

⁴⁶ J. Warych: *Oczyszczanie gazów: procesy i aparatura*, WNT, Warszawa 1998, s. 56

⁴⁷ K.M. Butler, G.W. Mulholland, *Generation and Transport of Smoke Components*, w: *Fire Technology*, 40, 2004, s. 159

przemieszczanie się drobin aerozolu gaśniczego będzie znacznie mniejszy. Ważne informacje wynikają natomiast z porównania charakteru zmian wywołanych dyfuzją i sedymentacją. Otóż w zakresie średnic od 1 do 10 μm to siły grawitacji będą decydować o przemieszczaniu się drobin aerozolu, podczas gdy dla średnic 0,01÷0,1 μm ruch aerozolu gaśniczego determinowany będzie głównie ruchami Browna.

Niestety istotnym ograniczeniem tych rozważań jest fakt, że rozpatrywano układ statyczny, podczas gdy w warunkach rzeczywistych aerozol będzie przemieszczał się ruchem burzliwym, turbulentnym wskutek m.in. wyrzucenia strumienia aerozolu z generatora pod dużym ciśnieniem, przepływu gazów pożarowych podczas pożaru w pomieszczeniu do którego uwalniany jest aerozol itp. Rozważania powyższe nie uwzględniają również zjawiska aglomeracji cząstek, choć wiadomym jest że wpływa ono na przyśpieszenie procesu sedymentacji.

Sklania to do przyjęcia założenia, iż głównym zjawiskiem odpowiedzialnym za zachodzenie zmian w aerozolu w warunkach rzeczywistych będzie sedymentacja. W związku z tym na potrzeby analizy zmian stężenia aerozolu w przestrzeni nim wypełnionej pomocna okazać się może informacja zawarta w tabeli nr 4. Tabela ta określa bowiem prędkość opadania cząsteczek aerozolu w powietrzu. Autor dokonał obliczeń na podstawie równania (3-9).

Tabela 4.⁴⁸

Opadanie cząsteczek aerozolu w powietrzu pod wpływem działania sił grawitacyjnych

Średnia masowa średnica aerodynamiczna MMAD, μm	Prędkość opadania cząsteczek, cm/s	Obniżenie warstwy cząsteczek danej średnicy po czasie 10 min, cm
0,1	0,000086	0,0516
0,2	0,00023	0,138
0,5	0,0010	0,6
1,0	0,0035	2,1
2,0	0,013	7,8
5,0	0,078	46,8
10	0,31	186
20	1,2	720
50	7,6	4560

W tabeli nr 4 zawarto obliczenia związane z obniżaniem się warstwy cząsteczek o danej długości średnicy w czasie. Do obliczeń przyjęto czas 10 minut, w którym raport techniczny Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego dotyczący projektowania ochrony za

⁴⁸ Opr. własne na podstawie NFPA 2010 *Standard for Fixed Aerosol Fire Extinguishing Systems*, 2005 edition

pomocą urządzeń gaśniczych aerozolowych⁴⁹ zakłada utrzymanie stężenia gaśniczego aerozolu. Z tabeli wynika, że po czasie 10 min od uwolnienia aerozolu gaśniczego jego cząsteczki o średnicy 1 μm obniżą się względem wysokości pomieszczenia niewiele ponad 2 cm, natomiast warstwa cząsteczek o średnicy 10 μm ulegnie obniżeniu o 2 m, wywołując zmianę stężenia aerozolu w przestrzeni chronionej. Fakt ten sygnalizuje jednoznacznie, jak ważne, na etapie projektowania stałych urządzeń gaśniczych aerozolowych, jest zastosowanie rozwiązań, które zapewnią utrzymanie stężenia aerozolu w całej objętości pomieszczenia na poziomie gwarantującym utrzymanie efektu gaśniczego.

Ponieważ zarówno temat powstawania jak i rozprzestrzeniania się aerozoli gaśniczych powstających na drodze reakcji spalania jest rozległy i wielowątkowy, oraz nie został jeszcze w pełni wyjaśniony i opisany, nie jest możliwe wyczerpujące przedstawienie wiadomości w tym zakresie. Niemniej powyższe informacje mogą okazać się pomocne w zrozumieniu podstawowych zjawisk, z którymi zetkną się projektanci bądź potencjali nabywcy i użytkownicy generatorów aerozoli gaśniczych.

Mechanizm działania gaśniczego

Skutkiem pracy generatorów jest dostarczenie do przestrzeni chronionej aerozolu o określonym składzie i wymaganym stężeniu. W składzie produktów spalania masy aerozolutwórczej wyróżnia się fazę stałą, ciekłą oraz gazową. Obecność każdej z faz determinuje odmienne zjawiska i procesy fizykochemiczne. Zatem całościowy efekt oddziaływań aerozoli gaśniczych jest sumą oddziaływań wynikających z obecności poszczególnych składników, stanowiących produkty spalania masy aerozolutwórczej.

Powszechnie wiadomo, że skuteczność gaszenia płomieni przy użyciu zdyspergowanego medium gaśniczego np. proszku, aerozolu lub mgły wodnej, zależy od wielkości powierzchni oddziaływania pomiędzy medium a płomieniem. Zatem wraz ze wzrostem powierzchni oddziaływania medium gaśniczego rośnie jego skuteczność gaśnicza. W celu zwiększenia powierzchni wzajemnych oddziaływań zwiększa się najczęściej ilość podawanego medium o określonej wielkości ziaren, cząstek, drobin, kropel etc., bądź zmniejsza się powierzchnię fazy rozpraszanej przy zachowaniu stałego wydatku masowego danego medium. Wobec powyższego duży stopień rozproszenia oraz stosunkowo niewielka średnia wielkość drobin fazy rozproszonej aerozoli, wpływa istotnie na ich skuteczność

⁴⁹ Technical report CEN/TR 15276-2 *Fixed firefighting systems – Condensed aerosol extinguishing systems – Part 2: Design, installation and maintenance*, CEN, January 2009

gaśniczą. W dostępnej literaturze przedmiotu znaleźć można wiele danych eksperymentalnych na temat stężenia gaśniczego aerozoli. Zazwyczaj wartości te mieszczą się w zakresie od 30 do 60 g/m³⁵⁰. Dokonując porównania ze stosowanymi powszechnie innymi środkami gaśniczymi, tj. proszkami gaśniczymi (stężenie gaśnicze 150 ÷ 500 g/m³), halonami (halon 2402 – stężenie gaśnicze 160 ÷ 340 g/m³)⁵¹, lub zamiennikami halonów (HFC 227ea – stężenie gaśnicze 465 ÷ 1285 g/m³ przy temp. 20°C)⁵², okazuje się, że stężenia gaśnicze wymagane podczas stosowaniu aerozoli gaśniczych są nieporównywalnie mniejsze, przez co korzystniejsze z punktu widzenia zarówno efektywności jak i ekonomii stosowania. Oczywistym staje się fakt dużego zainteresowania wokół zagadnień związanych z rozwojem technologii gaszenia przy użyciu aerozoli. Niestety do dnia dzisiejszego temat mechanizmu działania gaśniczego aerozoli nie został opisany w dostępnej literaturze w sposób jednoznaczny i wyczerpujący.

By zaistniał proces spalania płomieniowego muszą zostać spełnione ściśle określone warunki, które przedstawiane są zwyczajowo w formie czworościanu spalania. Czworoscian stanowi przestrzenny obraz zależności składowych elementów niezbędnych do zapoczątkowania spalania i warunkujących ciągłość tej reakcji⁵³. Elementami tymi są:

- obecność paliwa (w odpowiedniej ilości),
- obecność utleniacza (o odpowiednim stężeniu),
- obecność źródła ciepła (o odpowiedniej mocy lub temperaturze),
- obecność w płomieniu rodników warunkujących ciągłość spalania.

Efekt gaśniczy w postaci likwidacji płomienia uzyskiwany jest poprzez usunięcie lub ograniczenie do minimum jednego z wyżej wymienionych czynników. Może się to odbywać zarówno na drodze fizycznej poprzez efekty energetyczne (chłodzenie paliwa, chłodzenie strefy spalania) bądź przestrzenne (rozcieńczanie reagentów, izolowanie paliwa od utleniacza, odłączenie strefy reakcji) jak i na drodze chemicznej (inhibitowanie reakcji płomieniowych, wychwytywanie wolnych rodników, efekt trzeciej cząstki etc.).

⁵⁰ V.V. Agafonov [et al.], *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols* NIST SP 984-3, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings. HOTWC 2005, Albuquerque, NM, str. 1

⁵¹ Tamże, s. 1

⁵² Polska Norma PN-EN 15004-5 Stałe urządzenia gaśnicze – Urządzenia gaśnicze gazowe – Część 5: Właściwości fizyczne i system projektowania urządzenia gaśniczego gazowego na środek gaśniczy HFC 227ea, PKN, wrzesień 2008

⁵³ M. Pofit-Szczepańska, *Wybrane zagadnienia z chemii ogólnej, fizykochemii spalania i rozwoju pożaru*, SA PSP, Kraków 1994, s. 23

Spośród elementów niezbędnych do podtrzymywania reakcji spalania, aerozole z pewnością nie będą wpływały na ilość i rodzaj paliwa ulegającego spalaniu. Co się zaś tyczy pozostałych obszarów działania gaśniczego wymagana jest identyfikacja możliwych mechanizmów gaśniczych wraz z określeniem ich znaczenia i wpływu na ostateczny, zauważalny efekt gaśniczy.

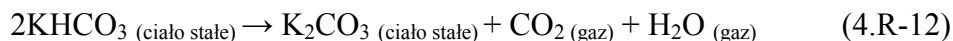
Podczas stosowania aerozoli gaśniczych wyróżnia się cztery podstawowe etapy ich działania⁵⁴:

- ogrzewanie się aerozolu,
- rozkład i/lub parowanie cząsteczek aerozolu,
- generacja inhibitora rodników w fazie gazowej,
- inhibicja procesu spalania w fazie płomieniowej.

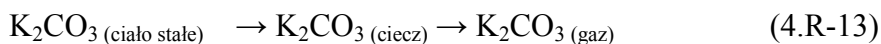
Dowiedziano również, że krytyczne znaczenie dla powodzenia procesu gaszenia przy użyciu aerozoli ma przedział czasowy, w którym dochodzi do rozkładu i parowania drobin fazy rozproszonej⁵⁵.

Pierwsza faza działania aerozoli dotyczy absorpcji ciepła i chłodzenia płomienia przez jego cząsteczki stałe. Zjawiska te spowodowane są występowaniem endotermicznych reakcji rozkładu cząstek fazy rozpraszanej aerozolu z jednoczesnym uwalnianiem dwutlenku węgla oraz pary wodnej. Poniżej przedstawiono główne grupy oddziaływań endotermicznych wraz z przykładem charakterystycznych w tym zakresie reakcji⁵⁶:

- absorpcja ciepła wskutek endotermicznych przemian chemicznych



- absorpcja ciepła wskutek endotermicznych zmian fazy substancji



⁵⁴ J.W. Fleming [et al.]: *Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type*, NIST Special Publication 984, Halon Options Technical Working Conference, 12th Proceedings. HOTWC 2002. Albuquerque, NM, str. 9

⁵⁵ Tamże, s. 9

⁵⁶ J. Brooks, J. Berezovsky, M. O'Dwyer, *Aerosol fire suppression for high rise structural applications via aircraft distribution using Metalstorm technologies*, NIST Special Publication 984, Halon Options Technical Working Conference, 12th Proceedings. HOTWC 2002, Albuquerque, NM, s. 2-3

W wyniku powyższych przemian dochodzi do stopniowego obniżania temperatury płomienia towarzyszącego reakcji spalania, do poziomu, poniżej którego proces spalania nie może być dłużej podtrzymywany.

Równocześnie z odbiorem ciepła występuje proces izolowania materiału ulegającego spalaniu od dostępu tlenu poprzez obniżenie jego stężenia, wskutek dostarczania do otoczenia dwutlenku węgla i pary wodnej, powstających na drodze wyparowania cząsteczek aerozolu gaśniczego (patrz równanie 4.R-12). W ostatniej i być może najbardziej znaczącej fazie dochodzi do usuwania wolnych rodników z reakcji łańcuchowych spalania występujących w płomieniu. Możliwe jest to na skutek występowania reakcji inhibicji heterofazowej na powierzchni drobin aerozolu, które opierają się na zjawiskach rekombinacji wolnych rodników występujących w płomieniu, oraz reakcji inhibicji homofazowej determinowanych obecnością metali alkalicznych⁵⁷.

Zarówno odbieranie ciepła jak i inhibicja heterofazowa, o których mowa powyżej, są procesami powierzchniowymi. Jednocześnie jak już zaznaczono w rozdziale dotyczącym układów koloidalnych aerozole charakteryzują się silnym rozwinięciem powierzchni drobin, co wpływa na zwiększenie oddziaływania między medium gaśniczym, a płomieniem. Taka właściwość aerozolu gaśniczego wpływa bezsprzecznie na przyspieszanie przebiegu procesu gaszenia. Wobec tego aerozole, których średnia wielkość cząsteczek fazy rozproszonej jest znacznie mniejsza od średnicy ziaren proszków gaśniczych, rozwijają dla takiego samego stężenia gaśniczego proszku i aerozolu znacznie większą powierzchnię oddziaływań medium gaśnicze – płomień, przez co charakteryzują się większą, aniżeli proszki gaśnicze, skutecznością gaśniczą w zakresie odbioru ciepła jak i inhibicji heterofazowej.

Aerozole gaśnicze posiadają równocześnie kilka cech, które wyróżniają je spośród pozostałych znanych środków stosowanych do gaszenia pożarów. Przede wszystkim istotną rolę odgrywa jakość powierzchni drobin tworzących fazę rozproszoną. Ponieważ do wytwarzania aerozolu dochodzi w tym samym czasie co do rozwoju pożaru, w takim razie powierzchnia drobin odznacza się swego rodzaju „świeżością”, która w efekcie wpływać będzie korzystnie na efektywność reakcji rekombinacji powierzchniowej⁵⁸. Co więcej, bazując na danych zawartych w tabeli 2, z łatwością zauważyć można, że faza gazowa aerozoli stanowi od 40 do 70% masy środka aeroszotwórczego, a współczynnik określający zawartość tlenu w mieszaninie paliwo-utleniacz w większości środków aeroszotwórczych

⁵⁷ A. Mizerski, M. Sobolewski *Środki gaśnicze*, SGSP, Warszawa 1997, s. 189-190

⁵⁸ V.V. Agafonov [et al.], *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols* NIST SP 984-3, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings. HOTWC 2005, Albuquerque, NM, s. 1

jest mniejszy od jedności. Wynika stąd, że po pierwsze rola rozcieńczania powinna mieć dużo większe znaczenie, aniżeli w przypadku stosowania proszków gaśniczych. Po drugie aerozole tworzone z mieszanin ubogich w tlen będą posiadały zdolność do obniżania redukowania jego stężenia w przestrzeni chronionej przez generator, ze względu na zachodzenie procesów dalszego utleniania produktów niecałkowitego spalania środka aerozolutwórczego, po ich emisji na zewnątrz urządzenia.

Oszacowanie znaczenia przedstawionych mechanizmów gaśniczych można dokonać m.in. poprzez analizę wpływu procesu formowania się aerozolu gaśniczego na zmiany (obniżanie) stężenie tlenu w przestrzeni chronionej, rodzaju procesów inhibicji reakcji spalania wywołujących rekombinację wolnych rodników, oraz roli absorpcji ciepła w procesie gaszenia aerozolami gaśniczymi.

Dostępne wyniki prac⁵⁹, obejmujące zarówno badania eksperymentalne w specjalnie skonstruowanych do tego celu stanowiskach badawczych bądź przy użyciu metody elektronowego rezonansu paramagnetycznego (EPR), jak również na drodze rozważań i obliczeń teoretycznych, wykonane dla wybranych mieszanin aerozolutwórczych wymienionych w tabeli 2, wskazują, że:

- utlenianie produktów niepełnego spalania, jak również rozcieńczanie tlenu przez gazową fazę powstającego aerozolu, wywoływać może znaczące obniżenie stężenia tlenu (w niektórych przypadkach nawet do 20% względem jego wartości początkowej),
- aerozole zawierające w swej budowie tlenki, wodorotlenki i chlorki mają pokaźniejszy wpływ na efektywność gaśniczą płomieni, aniżeli te formowane z siarczanów oraz węglanów tych samych metali alkalicznych,
- wodorotlenki, tlenki i węglany metali alkalicznych wykazują większą efektywność w procesie rekombinacji rodników wodorowych i wodorotlenowych, podczas gdy chlorki tych metali w sposób wydajniejszy obniżają stężenie rodników tlenowych,
- obniżenie stężenia aerozoli gaśniczych o 20 do 30% względem wartości ich stężenia gaśniczego powoduje osiągnięcie najbardziej efektywnych rezultatów w zakresie rekombinacji wolnych rodników w płomieniu,

⁵⁹ V.V. Agafonov [et al.], *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols* NIST SP 984-3, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings. HOTWC 2005, Albuquerque, NM, s. 3-10

- cząsteczki aerozolu o średnicy mniejszej niż 2 μm obniżają stężenie rodników wodorowych głównie na drodze inhibicji homofazowej, a cząsteczki o średnicy powyżej 5 μm determinują występowanie inhibicji heterofazowej. Co zaś się tyczy cząsteczek z zakresu od 2 do 5 μm , obydwa mechanizmy inhibicji prowadzą w sposób równomierny do rekombinacji rodników wodorowych
- absorpcja ciepła nie jest zjawiskiem znaczącym przy niskich stężeniach aerozolu tj. przy stężeniach dochodzących do 50% wartości stężenia gaśniczego aerozoli. W tym wypadku temperatura płomienia ulega obniżeniu o 10 do 15% względem jej wartości początkowej. Niemniej już przy stężeniach aerozolu wyższych niż 50 g/m^3 zjawisko odbioru ciepła nabiera istotnego znaczenia, gdyż efekt ten ma w 50 do 80% wpływ na likwidację płomienia.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Generatory aerozolu gaśniczego to urządzenia służące do gaszenia pożarów. W porównaniu z innymi urządzeniami tego typu, jest to rozwiązanie nowatorskie, gdyż na rynku ochrony przeciwpożarowej obecne jest dopiero od początku lat dziewięćdziesiątych zeszłego stulecia. W związku z tym podlega ono kolejnym udoskonaleniom, w celu uzyskania maksymalnych korzyści związanych z efektywnością i bezpieczeństwem stosowania. Zarówno niewielkie rozmiary, prosta budowa oraz niewielki nakład sił niezbędny do montażu i konserwacji generatorów aerozolu gaśniczego poszerzają w sposób znaczący zakres możliwych zastosowań tych urządzeń, wzbudzając tym samym coraz większe zainteresowanie na rynku czynnych zabezpieczeń przeciwpożarowych. W świetle powyższego, generatory aerozolu gaśniczego stanowią uzupełnienie oferty rynkowej urządzeń gaśniczych, wpisując się w lukę występującą pomiędzy stałymi urządzeniami gaśniczymi wodnymi, gazowymi i proszkowymi, a podręcznym sprzętem gaśniczym, w tym szczególnie gaśnicami proszkowymi.

Podjęta próba zdefiniowania aerozolu gaśniczego, na podstawie dostępnych informacji na temat układów dyspersyjnych, doprowadziła do sformułowania ogólnej definicji, informującej, iż jest to mieszanina gazowych, ciekłych i stałych produktów spalania specjalnego materiału aeroszotwórczego, stosowanego w generatorach aerozolu gaśniczego. Taki zapis nie odnosi się do wielkości cząstek fazy rozpraszanej, bowiem z przedstawionych w artykule informacji wynika brak możliwości jednoznacznego wyróżnienia układu koloidalnego, jaki stanowią aerozole według przedmiotowego kryterium. Jednocześnie

zdaniem autora przedstawiona definicja uwzględnia specyficzne właściwości aerozolu, związane z występowaniem efektu gaśniczego, poprzez wskazanie urządzenia, w którym aerozole są generowane.

W przypadku generatorów aerozolu gaśniczego opisywanych w niniejszym artykule sposób wytwarzania aerozolu dotyczy zainicjonowania i podtrzymania reakcji spalania mieszaniny odpowiednio dobranych materiałów stałych, zamkniętych w metalowej obudowie urządzenia. Zaprezentowany w artykule schemat budowy generatorów aerozolu gaśniczego odzwierciedla ideę obecnie najczęściej spotykanych konstrukcji tych urządzeń. Wśród przewidywanych kierunków rozwoju i zmian w budowie urządzeń z pewnością wymienić można prace nad ciągłym doskonaleniem składu chemicznego mieszaniny, z której wytwarzany jest aerozol, celem uzyskiwania optymalnych efektów działania gaśniczego. Co więcej działanie gaśnicze aerozoli musi uwzględniać pierwszy krytyczny krok, jakim jest dotarcie aerozolu do strefy spalania. Z tego punktu widzenia należy przewidywać prowadzenia prac nad sposobami doskonalenia dystrybucji strumieni aerozolu gaśniczego na zewnątrz urządzeń. Można również przypuszczać, że wysiłek producentów generatorów aerozolu skoncentrowany zostanie również na poszukiwaniu takiego składu chemicznego substancji odpowiedzialnej za chłodzenie powstającego aerozolu, która oprócz podstawowych właściwości dotyczących obniżania temperatury strumienia uwalnianego aerozolu, posiadać będzie możliwość redukcji stężenia substancji toksycznych wydzielanych podczas spalania stałej mieszaniny aeroszotwórczej, a przy tym wciąż zapewni kompozycji wymaganą wytrzymałość mechaniczną i odporność na wysoką temperaturę pracy urządzenia.

Bez wątplenia cechą wyróżniającą aerozoli gaśniczych, niezależnie od sposobu ich generowania, jest ich zdolność do unoszenia się w przestrzeni chronionej. W przypadku generatorów aerozolu gaśniczego jest to jedna z podstawowych różnic względem urządzeń gaśniczych wykorzystujących do gaszenia proszek gaśniczy, takich jak stałe urządzenia gaśnicze lub gaśnice proszkowe. Utrzymywanie się aerozolu w powietrzu determinuje obszar, zakres i sposób stosowania aerozoli gaśniczych oraz ich generatorów w ochronie przeciwpożarowej. Informacje zaprezentowane w niniejszym artykule służą upowszechnieniu informacji na temat dostępnych sposobów i metod opisu oraz przewidywania (szacowania) przebiegu procesów powstawania i rozprzestrzeniania się aerozoli gaśniczych. Przedstawiona w artykule zależność szybkości spalania stałych paliw raketowych może być punktem wyjścia do podjęcia prac badawczych dotyczących wyznaczenia zależności szybkości spalania substancji aeroszotwórczych umiejscawianych w generatorach aerozolu gaśniczego, w celu umożliwienia przewidywania czasu działania generatorów zależnie od rodzaju

wykorzystywanego w nich materiału aerozolutwórczego. Opis zjawisk takich jak: dyfuzja, termoforeza i sedymentacja, warunkujących rozprzestrzenianie się aerozolu sygnalizują jednoznacznie, jak ważne, na etapie projektowania stałych urządzeń gaśniczych aerozolowych, jest zastosowanie rozwiązań, które zapewnią utrzymanie stężenia aerozolu w całej objętości pomieszczenia na poziomie uniemożliwiającym nawrót palenia.

Przedstawione w ostatniej części artykułu informacje na temat mechanizmu działania gaśniczego, w tym również wyniki wybranych prac badawczych prowadzonych na świecie, których celem jest wyjaśnienia szczegółów tego mechanizmu, służą upowszechnieniu tego typu informacji szerszemu gronu czytelników w Polsce. Z przedstawionych informacji wynika bowiem istnienie szeregu zależności występujących pomiędzy warunkami procesu spalania, a właściwościami fizyko-chemicznymi aerozoli gaśniczych. Tłumaczy to występowanie intrygujących rezultatów dostępnych obecnie wyników badań, jak choćby: wpływu składu chemicznego aerozoli na efektywność gaśniczą płomieni, oraz zależności składu chemicznego i wielkości cząstek aerozolu na redukowaniu poszczególnych grup rodników występujących w płomieniu. Co więcej, stwierdzenie znaczącego odbioru ciepła od pożaru podczas ogrzewania i parowania cząsteczek aerozolu, jak również obniżania stężenia tlenu przez gazy wydzielające się podczas spalania stałej mieszaniny aerozolutwórczej w generatorach, rzucają nowe światło na dotychczasowe rozważania dotyczące wyłącznie antykatalitycznego oddziaływania aerozoli gaśniczych na środowisko pożaru.

Warto w tym miejscu zauważyć, że powyższe informacje nie stanowią stwierdzenia faktu, gdyż dostępne wyniki prac dotyczą wybranych mieszanin aerozolutwórczych. Celowe w tym wypadku byłoby podjęcie próby potwierdzenia zidentyfikowanych zależności na drodze kolejnych prac badawczych, np. w celu porównania z rezultatami badań dla aerozoli powstałych z innych, dostępnych na rynku mieszanin aerozolutwórczych, jak również na potrzeby weryfikacji stopnia udziału mechanizmów działania gaśniczego dotyczących odbioru ciepła oraz obniżania stężenia tlenu podczas zastosowania generatorów aerozolu gaśniczego względem pożarów w pełnej skali.

Literatura

1. Protokół montrealński w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową (Dz. U. z 1992, Nr 98, poz. 490)
2. Rozporządzenie (WE) NR 2037/2000 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 czerwca 2000 r. w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową (Dz. Urz. WE Nr L 244 z dnia 29.09.2000 r.)
3. De Parenti G.G.: *Aerosol overview*, w: Fire Safety Engineering, July/August 2009, s. 25
4. Technical report CEN/TR 15276-1 *Fixed firefighting systems – Condensed aerosol extinguishing systems – Part 1: Requirements and test methods for components*, CEN, January 2009
5. Zbrożek P., *Generatory aerozoli gaśniczych wytwarzanych pirotechnicznie*, w: Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, nr 02/03/04 2006, CNBOP, Józefów 2006, s. 227-237
6. AS/NZS 4487 *Pyrogen fire extinguishing systems*, Australian/New Zealand Standard, 1997
7. NFPA 2010 *Standard for Fixed Aerosol Fire Extinguishing Systems*, NFPA, 2005 edition
8. Atkins P.W., *Podstawy chemii fizycznej*, PWN, Warszawa 2002
9. Czarnecki L., Broniewski T., Henning O., *Chemia w budownictwie*, Wyd. Arkady, Warszawa 1995
10. Warych J.: *Oczyszczanie gazów: procesy i aparatura*, WNT, Warszawa 1998
11. Kopylov N.P., [et al.]: *Toxic hazard associated with fire extinguishing aerosols: the current state of the art and a method for assessment*, Halon Option Technical Working Conference, HOTWC 2001, str. 332-336
12. Technical report No. NAWCADPAX/TR-2004/123 *Risk assessment for acute exposure to pyrogen: a pyrotechnically-generated fire extinguishing aerosol*, NAWC, Maryland, 11 January 2005
13. Ostrowski T., *Wybuchy pyłów w przemyśle*, Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa 1980

14. IMO MSC/Circ. 1007 *Guidelines for the approval of fixed aerosol fire-extinguishing systems equivalent to fixed gas fire-extinguishing systems, as referred to in SOLAS 74, for machinery spaces*, IMO, 26 June 2001
15. Mizerski A., Sobolewski M., *Środki gaśnicze*, SGSP, Warszawa 1997
16. Król B., *Aerozole gaśnicze*, w: Przegląd pożarniczy, nr 6/2000, KG PSP, Warszawa 2000, str. 23,
17. Kopylov N.S. [et al.], *The modification of the characteristics of the condensed fire extinguishing aerosol during its distribution through the pipelines*, NIST Special Publication 984-2 Halon Options Technical Working Conference, 14th. Proceedings. HOTWC 2004, Albuquerque (NM), ,str. 1-14
18. Kangedal P., Hertzberg T., Arvidson M., *Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning – en litteraturstudie*, SP RAPPORT 2001:28, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Szwecja 2001
19. Agafonov V.V. [et al.], *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols* NIST SP 984-3, Halon Options Technical Working Conference, 15th Proceedings. HOTWC 2005, Albuquerque, NM, str. 1-10
20. Tapscott R.E., Mather J.D., *Thermodynamics of metal agent fire extinguishment*, NIST Special Publication 984, Halon Options Technical Working Conference, 12th Proceedings HOTWC 2002, April 30-May 2, 2002, Albuquerque, NM, str. 1-7, 2002
21. Rusin D.L., Denisyuk A.P., *Composition for cooling and simultaneous filtration of the gas-aerosol fire-extinguishing mixture.*, w: World Intellectual Property Organization. Opis patentowy. WO 2005/023370 A2. Opubl. 17.03.2005
22. Bandyopadhyaya R., Lall A.A., Friedlander S.K., *Aerosol Dynamics and the synthesis of fine solid particles*, w: *Powder Technology*, nr 139, str. 193-199, 2004
23. *Słownik chemii praktycznej*, Wyd. Wiedza Powszechna, Warszawa 1992
24. Przęzak Z., *Silniki rakietowe na paliwo stałe*, w: Przegląd Wojsk Lotniczych i Wojskowej Ochrony Powietrznej Kraju, 1984, Nr 6
25. Mizieliński B., *Systemy oddymiania budynków. Wentylacja*, WNT, Warszawa 1999
26. Butler K.M., Mulholland G.W., *Generation and Transport of Smoke Components*, w: *Fire Technology*, 40, 149-176, 2004

27. Technical report CEN/TR 15276-2 *Fixed firefighting systems – Condensed aerosol extinguishing systems – Part 2: Design, installation and maintenance*, CEN, January 2009
28. Polska Norma PN-EN 15004-5 *Stałe urządzenia gaśnicze – Urządzenia gaśnicze gazowe – Część 5: Właściwości fizyczne i system projektowania urządzenia gaśniczego gazowego na środek gaśniczy HFC 227ea*, PKN, wrzesień 2008
29. Pofit-Szczepańska M., *Wybrane zagadnienia z chemii ogólnej, fizykochemii spalania i rozwoju pożaru*, SA PSP, Kraków 1994
30. Fleming J.W. [et al.], *Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type*, NIST Special Publication 984, Halon Options Technical Working Conference, 12th Proceedings. HOTWC 2002. Albuquerque, NM, str. 1-12
31. Brooks J., Berezovsky J., O'Dwyer M., *Aerosol fire suppression for high rise structural applications via aircraft distribution using Metalstorm technologies*, NIST Special Publication 984, Halon Options Technical Working Conference, 12th Proceedings. HOTWC 2002, Albuquerque, NM, str. 1-8