

st. kpt. mgr inż. Przemysław KUBICA
bryg. dr inż. Waldemar WNEK
bryg. mgr inż. Zbigniew TUZIMEK
st. kpt. mgr inż. Agata DOMŻAŁ
Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Katedra Bezpieczeństwa Budowli,
Zakład Technicznych Systemów Zabezpieczeń

Wpływ wybranych warunków atmosferycznych na czas retencji gazów gaśniczych

Omówienie LEAD

Skuteczność gaszenia gazami gaśniczymi za pomocą stałych urządzeń gaśniczych (SUG) zależy od czasu utrzymywania stężenia, tzw. czasu retencji. Odpowiednio długi czas retencji umożliwia wychłodzenie źródła pożaru oraz interwencję ekip ratowniczych. Na długość czasu retencji ma wpływ przede wszystkim szczelność pomieszczenia oraz różnica gęstości mieszaniny gaśniczej i otaczającego powietrza. Gęstość gazów uzależniona jest od warunków klimatycznych, w szczególności: ciśnienia, temperatury i zawartości pary wodnej. Na podstawie analizy przeprowadzonej w oparciu o wybrany model stosowany do wyznaczania czasu retencji, wykazano że pomijanie wpływu tych wielkości może wiązać się z istotnym błędem przy wyznaczaniu czasu retencji gazów o gęstościach bliskich gęstości powietrza.

Słowa kluczowe: SUG-gazowe, czas retencji, gazy gaśnicze.

1. Gaszenie gazami gaśniczymi

Gaszenie pożarów za pomocą gazów gaśniczych charakteryzuje najmniejszymi stratami związanymi z działaniem środka gaśniczego, spośród wszystkich współcześnie znanych środków gaśniczych. Z tego względu gazy gaśnicze znajdują zastosowanie przede wszystkim tam, gdzie główną wartość stanowi przechowywane mienie – serwerownie, archiwa, muzea. Powszechnym przypadkiem jest stosowanie gazów gaśniczych w stałych urządzeniach gaśniczych gazowych (SUG-gazowych), działających przez całkowite wypełnienie chronionego pomieszczenia. Urządzenia te posiadają zapas gazu gaśniczego zmagazynowany w butlach pod ciśnieniem, połączonych z rurociągiem zakończonym dyszami. Wyładowanie gazu następuje automatycznie po wykryciu pożaru przez czujki pożarowe lub ręcznie, poprzez wciśnięcie przycisku „Start Gaszenia”. Dysze wy-

lotowe są dobierane i rozmieszczane w taki sposób, aby po wyładowaniu nastąpiło równomierne rozprowadzenie gazu gaśniczego w całej przestrzeni chronionego pomieszczenia. Gaz gaśniczy po wyładowaniu z butli tworzy z powietrzem znajdującym się w pomieszczeniu tzw. *mieszaninę gaśniczą*, w której stężenie gazu jest równe stężeniu projektowemu c_p .

Gazy gaśnicze obecnie stosowane w stałych urządzeniach gaśniczych, działających przez całkowite wypełnienie można podzielić na dwie grupy: *chlorowcopochodne węglowodorów* i *gazy obojętne*. Inne gazy, jak halony czy dwutlenek węgla, stosowane są bardzo rzadko we współczesnych urządzeniach gaśniczych. Zgodnie z nomenklaturą wprowadzoną przez NFPA (*National Fire Protection Association*) chlorowcopochodne węglowodorów i gazy obojętne noszą wspólną nazwę: *czyste środki gaśnicze*. *Chlorowcopochodne węglowodorów* nazywane są również zamiennikami halonów, ponieważ posiadają szereg cech wspólnych z halonami. Zbudowane są najczęściej na bazie metanu CH_4 lub etanu C_2H_6 , w których jeden lub wszystkie atomy wodoru zastąpione zostały atomami chloru, fluoru, jodu lub odpowiednimi kombinacjami. *Gazy obojętne* stosowane do celów gaśniczych to azot, argon i ich mieszaniny, w jednym przypadku z niewielką domieszką CO_2 . Gazy obojętne posiadają cechy zdecydowanie różne od halonów. Ich działanie gaśnicze polega na obniżeniu stężenia tlenu w zabezpieczanym pomieszczeniu. Gazy obojętne są całkowicie nieszkodliwe pod względem ekologicznym. Chlorowcopochodne węglowodorów, z jednym wyjątkiem, posiadają znaczny czas życia w atmosferze oraz potencjał ocieplania klimatu. Powyższe cechy zaważyły o zakazie stosowania chlorowcopochodnych węglowodorów w niektórych krajach europejskich (np. Austria, Szwajcaria).

Mechanizmy gaśnicze aktualnie stosowanych gazów gaśniczych polegają na:

- a) obniżeniu stężenia tlenu w pomieszczeniu – gazy obojętne (azot, argon, Argonit, Inergen), lub
- b) bądź fizycznym i/lub chemicznym oddziaływaniu na płomień – chlorowcopochodne węglowodorów (FM200, Novec 1230).

Przy gaszeniu gazami efekt chłodzenia paliwa lub źródła zapłonu występuje w stopniu marginalnym. Jeżeli stężenie gazu gaśniczego w chronionej przestrzeni obniży się zbyt szybko, to istnieje możliwość powstania wtórnego pożaru. Stąd pomieszczenia zabezpieczane gazami powinny być na tyle szczelne, by dostatecznie długo utrzymać wymagane stężenie gazu gaśniczego, na określonych wysokościach pomieszczenia, czyli zapewnić wymagany *czas retencji*.

2. Modele stosowane do obliczania czasu retencji

2.1. Przegląd modeli

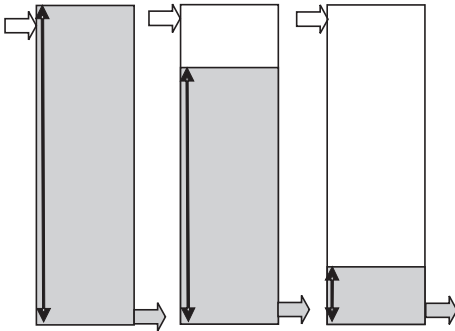
Czas retencji gazu w pomieszczeniu można określić na dwa sposoby:

- 1) wyładować gaz gaśniczy do pomieszczenia chronionego i zmierzyć zmiany stężenia gazu w czasie na odpowiednich wysokościach;

- 2) wykonać test szczelności metodą wentylatorów drzwiowych i na podstawie wyników testu, stosując odpowiedni model wypływu gazu z pomieszczenia, analitycznie wyznaczyć zmiany stężenia gazu gaśniczego w czasie na odpowiednich wysokościach.

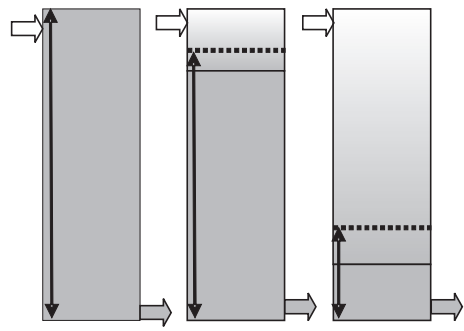
Pierwsza metoda jest przede wszystkim kosztowna, nie jest zalecana przez normy i stąd stosuje się ją rzadko. Stosując drugą metodę należy posłużyć się odpowiednim modelem wypływu gazu z pomieszczenia. Każdy ze znanych modeli zakłada doskonałe wymieszanie gazu w trakcie jego wyładowywania ze zbiorników. Otrzymywana jest *mieszanina gaśnicza* składająca się z gazu gaśniczego oraz powietrza, które znajduje się w pomieszczeniu. Mieszanina ta następnie wypływa dolnymi nieuszczelnieniami, a górnymi wpływa powietrze. Mechanizmem napędzającym wypływ jest różnica gęstości powietrza na zewnątrz pomieszczenia ρ_0 i gęstości mieszaniny gaśniczej ρ_m . Obecnie stosowane są następujące modele do wyznaczania czasu retencji:

- model z *ostrą granicą rozdziału* między mieszaniną gaśniczą a napływającym powietrzem (rys. 1) – granica rozdziału obniża się w czasie, stężenie gazu zmienia się skokowo od stężenia projektowego w mieszaninie do zera ponad mieszaniną – model stosowany w normie NFPA 2001:2012 [1];
- model z *szeroką granicą rozdziału* między mieszaniną gaśniczą a napływającym powietrzem (rys. 2) – granica rozdziału rozszerza się w czasie, stężenie ponad mieszaniną zmienia się liniowo, od stężenia początkowego w mieszaninie do zera przy suficie – model stosowany w normach PN EN 15004-1:2008 [2];



Rys. 1. Schemat modelu z ostrą granicą rozdziału

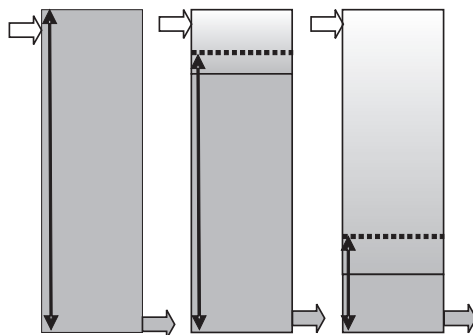
Fig. 1. Schematic of model with sharp interface



Rys. 2. Schemat modelu z szeroką granicą rozdziału

Fig. 2. Schematic of model with wide interface

- model z *jednorodną mieszaniną gaśniczą* w całej przestrzeni chronionej (rys. 3) – wraz z upływem czasu następuje równomierne rozcieńczenie mieszaniny gaśniczej przez napływające powietrze – model stosowany w PN EN 15004-1:2008 oraz NFPA 2001:2012, pod warunkiem występowania wymuszonego mieszania gazów w kubaturze chronionej, np. praca klimatyzatorów, w obiegu zamkniętym.



Rys. 3. Schemat modelu z jednorodną mieszaniną
Fig. 3. Schematic of model with continuous mixing

2.2. Obliczanie czasu retencji wg modelu z szeroką granicą rozdziału

Do analiz prowadzonych w artykule wybrano wykorzystywany w normie europejskiej model z *szereką granicą rozdziału*, stosowany do przypadków, w których po wyładowaniu, mieszanina gaśnicza swobodnie opada i nie występuje wymuszone mieszanie gazów. W modelu tym strumień mieszaniny gaśniczej wypływającej przez dolne nieszczelności pomieszczenia w danej chwili opisuje równanie (1):

$$v_{wyp}(t) = \frac{2(\rho_m - \rho_0)gH_{gr}(t)}{m \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_m} \frac{dA_d}{gA_g}\right)^{\frac{1}{n}}} k(H_{gr}(t))^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

v_{wyp} – strumień objętościowy wypływającej mieszaniny,

ρ_0 – gęstość powietrza,

ρ_m – gęstość mieszaniny,

H_{gr} – wysokość granicy rozdziału,

n – wykładnik zależny od charakterystyki nieszczelności, uzyskiwany na podstawie testu szczelności,

α – współczynnik, zależny od charakterystyki otworu, uzyskiwany z testu szczelności,

A – powierzchnia otworu (nieszczelności),

indeksy g , d – odpowiednio górne i dolne nieszczelności,

k – stała upraszczająca.

Ponieważ strumień wypływającej mieszaniny gaśniczej jest równy strumieniowi opadania mieszaniny w pomieszczeniu, prędkość opadania mieszaniny przyjmuje postać równania różniczkowego (2).

$$\frac{dH_{gr}(t)}{dt} = \frac{v_{wyp}(t)}{A_p} = \frac{k(H_{gr}(t))^{\frac{1}{n}}}{A_p} \quad (2)$$

A_p – przekrój poprzeczny pomieszczenia.

Rozwiązując równanie (2) otrzymuje się wzór umożliwiający obliczenie czasu, po którym nastąpi spadek granicy mieszaniny gaśniczej do określonego poziomu (3).

$$t = \frac{V}{H_0} \frac{2}{0} \frac{n}{m} \frac{2g|_{m=0}}{F^{1/n}} \frac{(H_0^{1-n} - H_{gr}^{1-n})}{(1-n)k_1 F} \quad (3)$$

H_{gr} – wysokość, na której będzie granica rozdziálu po czasie t ;

V – kubatura pomieszczenia;

H_0 – wysokość pomieszczenia.

F – stosunek powierzchni nieszczelności w dolnej części pomieszczenia do całkowitej powierzchni nieszczelności,

k_1, n – współczynniki charakteryzujące nieszczelności w pomieszczeniu, uzyskiwane na podstawie testu szczelności.

Równanie (3) stosowane jest w zarówno w modelu z *ostrą granicą rozdziálu*, jak również w *modelu z szeroką granicą rozdziálu*. Przy czym w modelu z szeroką granicą w miejsce H_{gr} należy wprowadzić tzw. wysokość ekwiwalentną H_e . H_e jest wysokością, przy której ciśnienie hydrostatyczne mieszaniny oraz warstwy granicznej nad nią, jest takie samo jak ciśnienie mieszaniny o wysokości H_{gr} w *modelu z ostrą granicą*.

$$H_e = H_0 \left(H_0 - H_{gr} \right) \frac{c_p}{2c_{min}} \quad (4)$$

c_p – stężenie projektowe,

c_{min} – stężenie minimalne, zapewniające gaszenie.

2.3. Kryteria oceny pomieszczenia

Określając wymgany czas retencji w zabezpieczonym pomieszczeniu należy ustalić następujące kryteria oceny:

- wysokość, na której ma być utrzymywane stężenie gazu gaśniczego,
- minimalną wartość stężenia gazu gaśniczego.

Powyższe kryteria różnie są przyjmowane w normach projektowych. Czas retencji wg normy PN-EN 15004 [2] mierzony jest od chwili osiągnięcia w pomieszczeniu projektowego stężenia gazu gaśniczego c_p , do chwili gdy na 10% i 50%,

i 90% wysokości pomieszczenia, stężenie gazu gaśniczego przekracza 85% stężenia projektowego, czyli $c_{min} = 0,85 c_p$. Długość czasu retencji dobierana jest odpowiednio do charakteru zabezpieczanego pomieszczenia oraz możliwości podjęcia działań ratowniczych przez przeszkolony personel, przy czym nie może być krótszy niż 10 minut.

W normie NFPA 2001 [1], minimalną wysokość chronioną określa indywidualnie dla każdego pomieszczenia, w zależności od lokalizacji materiałów palnych. Stężenie minimalne przyjęto również na poziomie 85% stężenia projektowego.

3. Wpływ temperatury, ciśnienia i wilgotności na czas retencji

Gęstość gazów uzależniona jest od temperatury i ciśnienia. W przypadku powietrza dochodzi jeszcze dodatkowy czynnik – wilgotność. Różnica między gęstością powietrza ρ_0 otaczającego chronione pomieszczenie, a gęstością mieszaniny gaśniczej ρ_m wewnątrz pomieszczenia wpływa na długość czasu retencji zgodnie z równaniem (3).

3.1. Gęstość powietrza

Obliczenia wykonywane wg aktualnych norm zakładają stałą gęstość powietrza $1,205 \text{ kg/m}^3$ PN EN 15004 [2] oraz $1,202 \text{ kg/m}^3$ NFPA 2001 [1]. Wartości te odpowiadają gęstości powietrza suchego pod ciśnieniem $1013,25 \text{ hPa}$ przy temperaturze 20°C . Mimo przyjęcia tych samych warunków występuje rozbieżność między normami co do gęstości powietrza. Pomijany jest fakt, że gęstość powietrza zmienia się w zależności od ciśnienia, temperatury i wilgotności zgodnie z równaniem (5).

$$\rho_0 = \frac{p}{T} \frac{1}{R_{ps}} \left(1 + \frac{R_{H_2O}}{R_{ps}} \right) \frac{E_1}{100} \quad (5)$$

ρ_0 – gęstość powietrza wilgotnego [kg/m^3],

p – ciśnienie [Pa],

T – temperatura [K],

φ – wilgotność względna [%],

e – aktualna prężność pary [Pa], $e = E_2 \cdot \varphi / 100$,

E_1 – maksymalna prężność pary [kg/m^3],

R_{ps} – indywidualne, stała gazowa powietrza suchego [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$],

R_{H_2O} – indywidualne, stała gazowa pary wodnej [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$].

Gęstość powietrza obliczona za pomocą równania (5) wynosi $1,2041 \text{ kg/m}^3$ i ta wartość będzie przyjmowana do dalszych obliczeń.

Analizując możliwe ciśnienia, temperatury występujące na danym obszarze oraz pełen zakres wilgotności powietrza, można wyznaczyć skrajne gęstości po-

wietrza w danych warunkach klimatycznych. W tabeli 1 przyjęto maksymalne i minimalne wartości zanotowane w Polsce – ciśnienie znormalizowane od 970 do 1050 hPa, temperaturę od -35 do 35°C oraz wysokości od 0 do 1000 m n.p.m. Gęstość minimalną powietrza obliczono dla ciśnienia znormalizowanego 970 hPa, wysokości 1000 m n.p.m., temperatury 35°C i wilgotności względnej powietrza 100%. Gęstość maksymalną obliczono dla ciśnienia 1050 hPa, wysokości 0 m n.p.m., temperatury -35°C i wilgotności względnej 0%.

Tabela 1. Gęstość powietrza w różnych warunkach klimatycznych
Table 1. The air density in different climatic conditions

Ciśnienie rzeczywiste [hPa]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Wilgotność względna [%]	Gęstość powietrza [kg/m^3]
1013,25	20	0%	1,2041
868	35	100%	0,9575
1050	-35	0%	1,5360

Z tabeli 1 wynika, że przyjęcie stałej wartości gęstości powietrza może być obarczone błędem sięgającym 27%.

3.2. Gęstość gazu gaśniczego

Gęstość gazu gaśniczego zmienia się w zależności od ciśnienia i temperatury zgodnie z równaniem stanu.

$$\rho_g = \frac{p}{R_g T} \quad (6)$$

R_g – indywidualne, stała gazowa gazu gaśniczego.

ρ_g – gęstość gazu gaśniczego.

Gaz gaśniczy nie zawiera pary wodnej, więc wilgotność go nie dotyczy. Gęstość mieszaniny gaśniczej uzależniona jest od stężenia gazu gaśniczego i gęstości powietrza.

$$\rho_m = \rho_0 \frac{c_p}{100} + \rho_g \frac{100 - c_p}{100} \quad (7)$$

ρ_m – gęstość mieszaniny gaśniczej,

ρ_0 – gęstość powietrza,

c_p – stężenie projektowe gazu gaśniczego.

W tabeli 2 przedstawiono różnicę gęstości powietrza i gęstości mieszanin gaśniczych w typowych stężeniach projektowych w warunkach normowych, tj. przy ciśnieniu 1013,25 hPa, temperaturze 20°C i zerowej wilgotności powietrza. Oprócz znormalizowanych gazów gaśniczych zawarto również mieszaninę $92\%\text{N}_2-8\%\text{Ar}$, która w tych warunkach ma gęstość bliską gęstości powietrza.

Ponieważ gaz gaśniczy po wyładowaniu do pomieszczenia chronionego będzie również podlegał oddziaływaniu panującego tam ciśnienia i temperatury, toteż i jego gęstość ulegnie zmianie. Nasuwa się pytanie w jaki sposób zmiany wa-

runków klimatycznych mogą wpłynąć na różnicę gęstości mieszaniny gaśniczej i otaczającego powietrza $\rho_m - \rho_0$.

Tabela 2. Różnica gęstości mieszanin gaśniczych i powietrza
Table 2. Difference between of agent-air mixture and air

Gaz gaśniczy	Stężenie projektowe	Różnica gęstości mieszaniny gaśniczej i powietrza [kg/m ³]
NOVEC 1230	5,3%	0,67
FM-200	8,5%	0,52
Argonit	40,3%	0,084
Nitrogen	40,3%	0,016
92%N ₂ -8%Ar	40,3%	0,00025

3.3. Wpływ warunków klimatycznych na różnicę gęstości mieszaniny gaśniczej wewnątrz pomieszczenia i otaczającego je powietrza

Analizie poddano dwa przypadki:

- pomieszczenie chronione znajduje się wewnątrz budynku i jego przegrody graniczą z przestrzeniami o podobnych parametrach powietrza,
- przegrody pomieszczenia graniczą bezpośrednio z otoczeniem budynku.

Dla poszczególnych przypadków przyjęto następujące warunki skrajne:

- warunki klimatyczne wewnątrz i na zewnątrz takie same jak temperatura: 18–26°C, ciśnienie rzeczywiste 868–1050 hPa, wilgotność powietrza 40–60%,
- warunki klimatyczne wewnątrz: temperatura 18–26°C, ciśnienie rzeczywiste 868–1050 hPa, wilgotność powietrza 40–60%; warunki klimatyczne na zewnątrz: temperatura –35 do 35°C, ciśnienie rzeczywiste jak wewnątrz, wilgotność powietrza 0–100%.

Wyniki obliczeń dla warunków klimatycznych, w których różnica gęstości osiągała największe wartości, przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Różnica gęstości mieszanin gaśniczych i powietrza w niekorzystnych warunkach klimatycznych

Table 3. Difference between of agent-air mixture and air in adverse climatic conditions

Gaz gaśniczy	Warunki klimatyczne	Różnica gęstości mieszaniny gaśniczej i powietrza [kg/m ³]
Novec 1230	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	0,70 (warunki normowe: 0,67)
FM 200	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	0,54 (warunki normowe: 0,52)
Argonit (50%N ₂ -50%Ar)	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	0,090 (warunki normowe: 0,084)
Nitrogen (100%N ₂)	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 40\%$	-0,015 (warunki normowe: -0,016)
92%N ₂ -8%Ar	$t_w = t_z = 26^\circ\text{C}$, $p = 970 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	0,0038 (warunki normowe: 0,00025)

Tabela 4. Różnica gęstości mieszanin gaśniczych i powietrza w niekorzystnych warunkach klimatycznych

Table 4. Difference between of agent-air mixture and air in adverse climatic conditions

Gaz gaśniczy	Warunki klimatyczne	Różnica gęstości mieszaniny gaśniczej i powietrza [kg/m ³]
Novac 1230	$t_w = 18^\circ\text{C}$, $t_z = 35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 40\%$, $\varphi_z = 100\%$	0,79 (warunki normowe: 0,67)
FM 200	$t_w = 18^\circ\text{C}$, $t_z = 35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 40\%$, $\varphi_z = 100\%$	0,58 (warunki normowe: 0,52)
Argonit (50%N ₂ -50% Ar)	$t_w = 26^\circ\text{C}$, $t_z = -35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 60\%$, $\varphi_z = 0\%$	-0,22 (warunki normowe: 0,084)
Nitrogen	$t_w = 26^\circ\text{C}$, $t_z = -35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 60\%$, $\varphi_z = 0\%$	-0,31 (warunki normowe: -0,016)
92%N ₂ -8%Ar	$t_w = 26^\circ\text{C}$, $t_z = -35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 60\%$, $\varphi_z = 0\%$	-0,29 (warunki normowe: 0,0025)

Na podstawie wartości przedstawionych w tabelach 3 i 4 można stwierdzić, że warunki klimatyczne wpływają na różnicę gęstości mieszaniny gaśniczej i otaczającego powietrza. Szczególnie niekorzystnym przypadkiem jest sytuacja, gdy przegrody pomieszczenia graniczą bezpośrednio z otoczeniem budynku. Pozostaje pytanie jak warunki klimatyczne przekładają się na długość czasu retencji?

3.4. Wpływ warunków klimatycznych, długość czasu retencji

W celu określenia wpływu warunków klimatycznych na długość czasu retencji przeprowadzono obliczenia zgodnie z modelem z *szeroką granicą rozdziálu* wykorzystywanym w normie PN EN 15004:2008. Przyjęto pomieszczenie o kubaturze 70 m³, wysokości 2,8 m. Nieszczelności wyznaczone na podstawie testu szczelności wynosiły 377 cm² (n=0,2191; k1=0,0374). Obliczono czasy retencji dla poszczególnych gazów przy założeniu warunków normowych oraz najbardziej niekorzystnych warunków klimatycznych. Obliczenia wykonano dla przypadków gdy za przegrodami pomieszczenia są przestrzenie o takich samych parametrach oraz gdy za przegrodami jest przestrzeń zewnętrzna. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Czas retencji w różnych warunkach klimatycznych

Table 5. Retention time in different climatic conditions

Gaz gaśniczy	Warunki klimatyczne	Czas retencji [s]
Novac 1230	Warunki normowe $t_w = t_z = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 0\%$	144
	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	142
	$t_w = 26^\circ\text{C}$, $t_z = -35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 60\%$, $\varphi_z = 0\%$	140

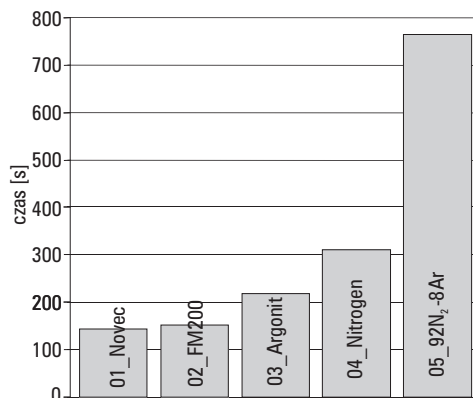
Gaz gaśniczy	Warunki klimatyczne	Czas retencji [s]
FM 200	Warunki normowe $t_w = t_z = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 0\%$	151
	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	149
	$t_w = 18^\circ\text{C}$, $t_z = 35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 40\%$, $\varphi_z = 100\%$	146
Argonit (50%N ₂ -50%Ar)	Warunki normowe $t_w = t_z = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 0\%$	217
	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	213
	$t_w = 26^\circ\text{C}$, $t_z = -35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 60\%$, $\varphi_z = 0\%$	172
Nitrogen (100%N ₂)	Warunki normowe $t_w = t_z = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 0\%$	310
	$t_w = t_z = 18^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 40\%$	313
	$t_w = 26^\circ\text{C}$, $t_z = -35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 60\%$, $\varphi_z = 0\%$	157
92%N ₂ -8%Ar	Warunki normowe $t_w = t_z = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 0\%$	765
	$t_w = t_z = 26^\circ\text{C}$, $p = 970 \text{ hPa}$, $\varphi_w = \varphi_z = 60\%$	424
	$t_w = 26^\circ\text{C}$, $t_z = -35^\circ\text{C}$, $p = 1050 \text{ hPa}$, $\varphi_w = 60\%$, $\varphi_z = 0\%$	159

4. Analiza wyników

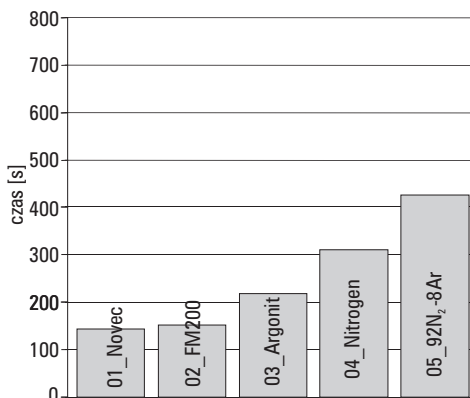
Gazy gaśnicze o gęstości zbliżonej do gęstości powietrza pozwoliły uzyskać najdłuższe czasy retencji w grupie analizowanych gazów (rys. 4). Czas retencji mieszaniny 92% N₂ i 8% Ar był ok. 5-krotnie dłuższy od zamienników halonów, oraz ponad 2-krotnie dłuższy od azotu.

W niekorzystnych warunkach klimatycznych, które mogą występować wewnątrz budynku i są identyczne w pomieszczeniu chronionym, jak i na zewnątrz pomieszczenia, czas retencji ulega zmianom (rys. 5). Główny wpływ na zawartość wilgoci w powietrzu. W warunkach normowych przyjmowane jest powietrze suche, które ma większą gęstość od powietrza wilgotnego. Gdy gęstość powietrza maleje, to w przypadku mieszanin cięższych od powietrza, rośnie różnica $\rho_m - \rho_0$. Stąd czas retencji dla Novec 1230, FM200, oraz Argonit uległ nieznamnacyemu skróceniu o 1–2% (rys. 3). W przypadku Nitrogenu, który jest lżejszy od powietrza, nastąpiło zjawisko odwrotne – zmniejszenie gęstości powietrza spowodowało zmniejszenie różnicy $\rho_m - \rho_0$ i czas retencji uległ wydłużeniu o ok. 1%. Najbardziej znaczące zmiany, tj. skrócenie czasu o ok. 45% dotyczyły mieszaniny

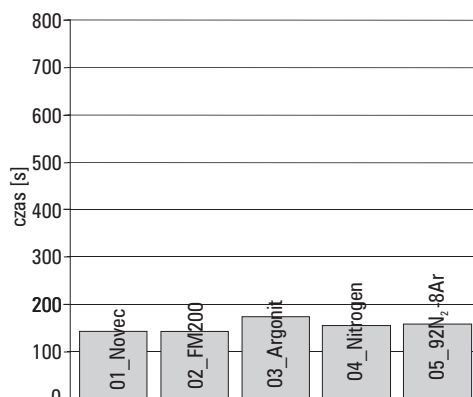
92%N₂-8%Ar, której gęstość w warunkach normowych była zbliżona do gęstości powietrza (rys. 6).



Rys. 4. Czas retencji w warunkach normowych
Fig. 4. Retention time in normative condition

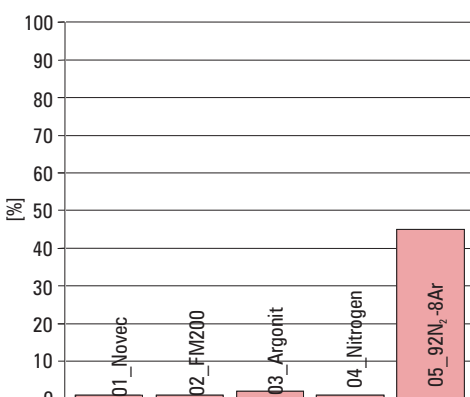


Rys. 5. Czas retencji w niekorzystnych warunkach klimatycznych, pomieszczenie chronione wewnątrz budynku (te same warunki po obu stronach przegród pomieszczenia)
Fig. 5. Retention time in adverse climatic conditions, protected room inside building (the same condition inside and outside enclosure boundary)



Rys. 6. Czas retencji w niekorzystnych warunkach klimatycznych; przegrody pomieszczenia graniczą bezpośrednio z otoczeniem budynku (różne warunki po obu stronach przegród pomieszczenia)

Fig. 6. Retention time in adverse climatic conditions; walls of room are walls of building (different condition inside and outside enclosure boundary)



Rys. 7. Procentowa zmiana czasu retencji w niekorzystnych warunkach klimatycznych, w stosunku do warunków normowych; pomieszczenie chronione wewnątrz budynku (te same warunki po obu stronach przegród pomieszczenia)

Fig. 7. Percentage change in the retention time in adverse climatic conditions, regarding the normative conditions; protected room inside building (the same condition inside and outside enclosure boundary)

W niekorzystnych warunkach klimatycznych, które mogą występować między pomieszczeniem chronionym a na zewnątrz budynku, różnica gęstości $\rho_m - \rho_0$ osiąga większe wartości. Mimo to, czas retencji gazów o dużych gęstościach (FM200, Novec 1230) uległ nieznacznemu skróceniu, około 3% (rys. 8). Im gęstość gazu gaśniczego była bardziej zbliżona do gęstości powietrza, tym znaczniejsze było skrócenie czasu retencji, sięgając niemal 80% w przypadku mieszaniny 92%N₂-8%Ar (rys. 8).

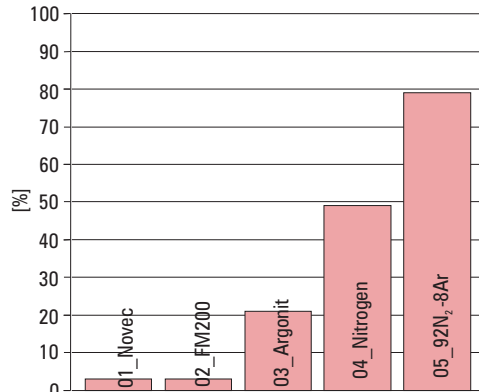
Najbardziej podatna na zmiany czasu retencji w zależności od warunków klimatycznych była mieszanina 92%N₂-8%Ar. W analizowanym przykładzie o około 45% skrócił się czas retencji w niekorzystnych warunkach klimatycznych, w wariancie z pomieszczeniem chronionym wewnątrz budynku i o około 80% w niekorzystnych warunkach na zewnątrz budynku, przy założeniu, że pomieszczenie chronione przylega do ścian zewnętrznych.

Przy czym, mimo że w pierwszym przypadku czas retencji uległ skróceniu o 45% to i tak jego wartość bezwzględna była znacznie dłuższa od czasów retencji uzyskiwanych przy innych gazach. W drugim przypadku wartości bezwzględne czasów retencji poszczególnych gazów mieściły się w zakresie od 140 do 172 sekund.

5. Wnioski

Różnica gęstości między mieszaniną gaśniczą a powietrzem ($\rho_m - \rho_0$) wpływa na długość czasu retencji. Im mniejsza jest różnica tym dłuższy czas retencji. Gazy o gęstościach zbliżonych do gęstości powietrza zapewniają nawet kilkakrotnie dłuższe czasy retencji w tych samych warunkach, w stosunku do gazów o gęstościach odbiegających od gęstości powietrza.

Na różnicę gęstości ($\rho_m - \rho_0$) wpływają warunki klimatyczne takie jak ciśnienie, temperatura i wilgotność powietrza. Warunki klimatyczne oddziałują zarówno na powietrze, jak i gaz gaśniczy, za wyjątkiem wilgotności, która dotyczy powietrza. Szczególnie niekorzystne są przypadki gdy przegrody pomieszczenia chronionego graniczą bezpośrednio z otoczeniem zewnętrznym (dodatkowo w takich sytuacjach może pojawić się oddziaływanie wiatru, które nie było poru-



Rys. 8. Procentowa zmiana czasu retencji w niekorzystnych warunkach klimatycznych, w stosunku do warunków normowych; przegrody pomieszczenia graniczą bezpośrednio z otoczeniem budynku (różne warunki po obu stronach przegród pomieszczenia)

Fig. 8. Percentage change in the retention time in adverse climatic conditions, regarding the normative conditions; walls of room are walls of building (different condition inside and outside enclosure boundary)

szane w tym artykule). Wówczas warunki klimatyczne na zewnątrz mogą znacznie się różnić od warunków wewnątrz pomieszczenia chronionego, co przekłada się na wzrost różnicy ($\rho_m - \rho_0$) i w konsekwencji skrócenie czasu retencji.

Wpływ warunków klimatycznych na długość czasu retencji zależy od zastosowanego gazu gaśniczego. W przypadku gazów o gęstości znacznie odbiegającej od gęstości powietrza (np. FM 200, Novec 1230), wpływ warunków klimatycznych był pomijalnie mały.

Czas retencji gazów o gęstościach zbliżonych do gęstości powietrza, takich jak Nitrogen, Argonit, uległ istotnemu skróceniu w sytuacji, w niekorzystnych warunkach klimatycznych, gdy pomieszczenie chronione przylegało do ścian zewnętrznych budynku. W przypadku gdy pomieszczenie chronione było wewnątrz budynku, wpływ warunków klimatycznych był pomijalnie mały.

Najbardziej podatny na warunki klimatyczne był gaz o gęstości najbliższej gęstości powietrza, tj. 92%N₂–8%Ar. Wpływ warunków klimatycznych był istotny nawet przypadku gdy pomieszczenie chronione było wewnątrz budynku.

Należy jednak mieć na uwadze, że dla skuteczności gaszenia istotna jest bezwzględna długość czasu retencji. Gaz gaśniczy o składzie 92%N₂–8%Ar, mimo że był podatny na działanie warunków klimatycznych, to stosowany do ochrony pomieszczeń wewnątrz budynku, zapewniał znacznie dłuższe czasy retencji w stosunku do pozostałych gazów gaśniczych. Natomiast w niekorzystnych warunkach klimatycznych, w przypadku gdy pomieszczenie chronione graniczyło z zewnątrz z budynkiem, czas retencji był na poziomie zbliżonym do czasów retencji uzyskiwanych przez pozostałe gazy.

Istnieje możliwość takiego doboru składu gazu gaśniczego (stosunek N₂ do Ar), przy którym jego gęstość będzie najbardziej zbliżona do gęstości powietrza w danych warunkach klimatycznych, panujących w zabezpieczanym pomieszczeniu i przestrzeniach przyległych. W tym celu należy określić skrajne warunki klimatyczne oraz warunki najczęściej występujące i na tej podstawie dobrać gęstość gazu gaśniczego, która zapewni możliwość uzyskiwania najdłuższych czasów retencji.

Aktualnie obowiązujące normy nie zawierają gazów gaśniczych o gęstości bliskiej gęstości powietrza. Mając na uwadze możliwość korzystnego wydłużenia czasu retencji, zasadnym jest wprowadzenie takich gazów do powszechnego stosowania.

Literatura

- [1] NFPA 2001:2012 Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems.
- [2] PN-EN 15004-1:2008 Stałe urządzenia gaśnicze – Urządzenia gaśnicze gazowe – Część 1: Ogólne wymagania dotyczące projektowania i instalowania.
- [3] Rangwala S., Hetrick M., "A modified hold time model for total flooding fire suppression", *Fire Safety Journal*, 45 (2010) 12–20.

- [4] Whiteley R.A., Dewsbury J., "Hold Time Calculations for Non-Standard Enclosures" *Fire Technology*, Vol. 40, No. 1, 2004.

Przemysław KUBICA
Waldemar WNEK
Zbigniew TUZIMEK
Agata DOMŻAŁ

Effects of Temperature, Pressure and Humidity on Retention Time Extinguishing Gases

The effectiveness of fixed gaseous extinguishing system depends on retention time – period time after discharge in which concentration of agent is high enough. It is important that an effective extinguishant concentration not only be achieved, but is maintained for a sufficient period of time to allow effective emergency action. This equally important in all classes of fires since a persistent ignition source (e.g. an arc, heat source or deep-seated fire) can lead to resurgence of the initial event once the extinguishant has dissipated. The longer the gas remains after the discharge, the better the level of protection offered.

It is essential to determine the likely period during which the extinguishing concentration will be maintained within the protected enclosure. The retention time can be determined in two ways:

- 1) full discharge test and measurement of gas concentrations at the required height;
- 2) door fan test and calculations based on the model gas flow out.

The first method is expensive and rarely applied. Using the second method requires choosing an appropriate model.

Each of the known models assume ideal mixing of gas during its discharge from the cylinder. The air-agent mixture is created. This mixture then flows out the lower leakages, and air influences the upper. Difference in density of the ambient air ρ_0 and the mixture inside enclosure ρ_m drives the flow of gases.

Currently the following models are used to determine the retention time:

- a) model with a *sharp interface* between the agent-air mixture and the inflowing air (fig. 1) – Assuming that gas species do not diffuse results in an infinitesimally thin interface between inflowing fresh air and the agent-air mix resulting after discharge – model used in the standard NFPA 2001:2012 [1];
- b) with a *wide interface* between the agent-air mixture and the inflowing air (fig. 2) – the wide interface model assumes that inflowing fresh air mixes instantaneously with the agent-air mixture to form a linear decay of agent concentration from the leading edge of the interface, to the uppermost elevation in the protected enclosure. model used in the standard PN EN 15004-1:2008 [2];

- c) model with *continuous mixing* (fig. 3) – The inflowing air dilutes the mixture evenly – model used in PN EN 15004-1:2008 and NFPA 2001:2012, provided that the occurrence of forced mixing of the gases in the protected enclosure, such as air conditioners.

For the analysis carried out in the article is selected model with a *wide interface* used in European standard. Retention time in this model is determined by the equations (3, 4).

Retention time in PN-EN 15004 [2] is measured from the moment of achievement the throughout the enclosure design concentration to the moment when the extinguishant concentration at 10% or 50% or 90% of the enclosure height is less than 85% of the design concentration. The retention time shall be not less than 10 min.

The density of gases depends on temperature and pressure of according to the equation (6). Air contains another factor – humidity, according to the equation (5). The density of the mixture of air-agent is determined by the formula (7).

The difference between the density of the air surrounding the protected enclosure ρ_0 and density of air-agent mixture inside the room affects the length of the retention time ρ_m according to equation (3).

Two cases were analyzed:

- protected room located inside the building and its walls bordering spaces with similar parameters of air,
- walls of protected room are walls of building; air parameters inside and outside significantly different.

For these cases, the following extreme conditions:

- climatic conditions inside and outside the same temperature: 18–26°C, actual pressure 868–1050 hPa, humidity 40–60%.
- climatic conditions inside: temperature: 18–26°C, actual pressure 868–1050 hPa, humidity 40–60%; climatic conditions outside: temperature –35 do 35°C, actual pressure 868–1050 hPa, humidity 0–100%

The results of calculations for the climatic conditions in which the density difference reaches the highest values are presented in Tables 3 i 4.

In order to determine the effect of climatic conditions on the length of the retention time of the calculations were performed according to the model with a *wide interface*. Assumed a room with a capacity of 70 m³, height 2,8 m. Assumed leakage area 377 cm² ($n=0,2191$; $k1=0,0374$). Retention times were calculated for each agent assuming normative conditions and the most adverse climatic conditions. The results are shown in Table 5.

Extinguishing gases with a density similar to air density reached the longest retention times in the group of analyzed gases (fig. 4). Retention time, gas consisting of 92%N₂ and 8%Ar was ca. 5 times longer than halocarbon and over 2-times then Nitrogen.

Under adverse climatic conditions that may occur inside the building and are identical in a protected space, and outdoor the room, retention time is changing (fig. 5). Retention time of Novec 1230, FM200 and Argonit was slightly shortened 1–2% (fig. 6). In case of Nitrogen was slightly longer – about 1%. The most significant changes (shortening by about 45%) concerned a mixture of 92%N₂–8%Ar, which has density similar to the density of air in normative conditions.

Under adverse climatic conditions that may exist between the protected space and the outside of the building, the density difference $\rho_m - \rho_0$ reaches higher values. Despite this, the retention times of gases with high densities (FM200, Novec 1230) were slightly reduced, about 3% (fig. 8). The extinguishing gas density was more similar to the density of air, the more significant was the reduction in retention time, reaching almost 80% in the case of a mixture 92%N₂-8%Ar (fig. 8).

Conclusions

Difference in density between the air-agent mixture and air ($\rho_m - \rho_0$) affect the length of the retention time. The smaller the difference the longer the retention time. Gases with densities close to the air density, delivering up to several times longer retention times under the same conditions, relative densities of gases it diverges from the air density.

The climatic conditions (temperature, actual pressure, humidity) affect the difference in density ($\rho_m - \rho_0$). Particularly unfavorable are the cases where the envelope of the of the protected room, borders directly with the external environment (additionally, in such situations can occur effects of wind, which was not discussed in this article).

Effect of climatic conditions on the length of the retention time depends on the kind of extinguishing gas. For gases with a density significantly different from the air density (e.g. FM 200, Novec 1230), impact of climatic conditions is negligibly small.

The retention times of gas with densities similar to the density of air, such as Nitrogen, Argonite, was significantly reduced when the protected space adjacent to the outer walls of the building. In the case where the protected room was inside the building, the impact of climatic conditions was negligibly small.

The most susceptible to climatic conditions was gas density near the air density, i.e. 92%N₂-8%Ar.

However, for the effectiveness of extinguishing the most important is absolute length of the retention time. The extinguishing gas consisting of 92%N₂-8%Ar, even though he was sensitive to climatic conditions, provides a much longer retention times in comparison to other gas extinguishing. In adverse climates, where the protected space bordered on the exterior of the building, the retention times were similar.

There is a possibility to select the extinguishing gas composition (e.g. ratio of N₂ to Ar) according to the climatic conditions prevailing in a protected room and adjacent spaces. After determining the extreme and the most common climatic conditions, it can be specified the composition of the extinguishing gas, which will provide the longest retention times.

The current standards do not include extinguishing gases with density near the air density. Bearing in mind the possibility of obtaining a much longer retention times, it is appropriate to such gases into widespread use.

Keywords: retention time, extinguishing gases.