

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (4), 524–535
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (4)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (4), 524–535
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.4.49

Sylwia BOROŃ, Przemysław KUBICA

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej
w Warszawie
Faculty of Fire Safety Engineering, The Main School of Fire Service – SGSP

Optymalizacja procesu projektowego stałych urządzeń gaśniczych gazowych za pomocą metod numerycznych CFD Optimization of the design process of fixed gaseous extinguishing systems using numerical methods CFD

Słowa kluczowe: stałe urządzenia gaśnicze gazowe, gazy obojętne, model przepływu gazu przez pomieszczenie, czas retencji, turbulencja przepływu, obliczeniowa mechanika płynu, badania symulacyjne, proces projektowania

Key words: fixed gaseous extinguishing systems, inert gases, model of gas flow through the room, retention time, flow turbulence, computational fluid dynamics, simulation studies, design process

Wprowadzenie

Klasyczny proces projektowania stałych urządzeń gaśniczych gazowych (SUG-gazowych), działających przez całkowite wypełnienie chronionego pomieszczenia gazem gaśniczym, składa się z szeregu etapów – począwszy od zdefiniowania przez projektanta rodzaju oraz ilości gazu gaśniczego, doboru odpowiedniego stężenia projektowego

gazu, analizy parametrów powierzchni odciażającej pomieszczenia, przeprowadzenia obliczeń hydraulicznych, oceny wymaganego czasu retencji gazu gaśniczego i wyboru odpowiednich rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo w pomieszczeniu chronionym gazem (ISO 14520-1:2015).

Doświadczenia pokazują, iż stosowane wytyczne projektowe mają pewne uproszczenia i ograniczenia, przez co wyznaczenie najwłaściwszego rozwiązania jest trudnym zadaniem dla projektanta. Tradycyjnie stosowane do tego metody są czasochłonne, a analizy kosztowne (Genge, 2011; Kubica, 2014).

Wykorzystując nowoczesne metody obliczeniowe, można znacznie przyspieszyć realizację prac oraz uzyskać przybliżone do empirycznych parametry techniczne projektowanego stałego urządzenia gaśniczego gazowego. Jed-

nym z takich innowacyjnych rozwiązań stosowanych w praktyce inżynierskiej jest wykorzystanie metod obliczeniowej mechaniki płynów (ang. *computational fluid dynamics* – CFD).

Obliczeniowa mechanika płynów CFD jest dynamicznie rozwijającą się komputerową metodą projektowania związaną z analizą zjawisk, takich jak: przepływy płynów, wymiana ciepła czy zachodzące reakcje chemiczne. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych programów wykorzystujących metody numeryczne jest ANSYS Fluent (ANSYS Fluent 14.5.0 – Technical Documentation, 2014).

Numeryczna symulacja zjawisk cieplno-przepływowych polega na rozwiązywaniu układów równań różniczkowych będących matematycznym zapisem praw zachowania masy, pędu, energii w połączeniu z równaniem dyfuzji i równaniem stanu. Aby rozwiązać te równania, należy zadać odpowiednie warunki początkowe i brzegowe dla modelowanego przepływu w przestrzeni. Opisujący układ równań różniczkowych cząstkowych w sensie matematycznym jest nieliniowy, nie może być więc rozwiązany analitycznie. Rozwiązuje się go metodami numerycznymi. Równania układu dyskretyzuje się, stosując metodę różnic objętości skończonych dla odpowiednich siatek dyskretyzacji – strukturalnych bądź niestructuralnych. Tak przekształcony układ rozwiązuje się iteracyjnie (ANSYS Fluent 14.5.0 – Technical Documentation, 2014).

Założeniem podjętych prac badawczych było zaproponowanie autorskiego modelu numerycznego wypływu gazu gaśniczego z pomieszczenia chronionego, który może stanowić narzędzie in-

żynierskie przydatne do poszukiwania nowych rozwiązań umożliwiających lepsze prognozowanie procesu gaszenia, co w dalszej perspektywie może przyczynić się do podniesienia poziomu bezpieczeństwa pomieszczeń chronionych SUG-gazowymi.

Ograniczenia metod projektowych

Analiza praktykowanego podejścia projektowego SUG-gazowych wskazuje na istnienie ograniczeń m.in. w następujących obszarach: doboru ilości środka gaśniczego, obliczenia powierzchni czynnej oraz rozmieszczenia klap odciążających oraz wyznaczania czasu retencji.

Dobór ilości środka gaśniczego

Ilość gazu gaśniczego wymagana do zabezpieczenia pomieszczenia jest dobierana tak, aby po wyładowaniu w pomieszczeniu zostało osiągnięte wymagane stężenie projektowe gazu gaśniczego, niezbędne do ugaszenia pożaru. Stężenia gaszące gazów wyznaczane są w warunkach laboratoryjnych i zależą od rodzaju gaszonego materiału. Ochronę przed nadmiernym przyrostem ciśnienia w pomieszczeniu w trakcie wyładowania gazu stanowią klapy odciążające, które powinny zostać wysterowane jeszcze przed uwolnieniem środka gaśniczego (PN EN 15004-1:2008; ISO 14520-1:2015). Poprzez otwarte otwory odciążające z pomieszczenia może wydostawać się nie tylko powietrze, ale także gaz gaśniczy. Należy zatem podchodzić z ograniczoną pewnością do stężenie projektowego gazu gaśniczego osiągniętego w pomieszczeniu po wyładowaniu.

W wyniku zastosowania butli o standardowych rozmiarach ilość gazu w zbiorniku może być większa od wymaganej ilości środka gaśniczego do zabezpieczenia danego pomieszczenia. Skutkuje to prawdopodobnym przekroczeniem stężenia LOAEL gazu gaśniczego i powoduje konieczność zastosowania dodatkowych rozwiązań w celu zapewnienia odpowiednich warunków bezpieczeństwa (Afeltowicz-Schultz, 2017).

Kłapy odciążające

Dokonując obliczeń powierzchni odciążającej w pomieszczeniu chronionym, nie bierze się pod uwagę powierzchni czynnej kłap odciążających, czyli powierzchni skutecznego usuwania powietrza przez otwór klapy odciążającej.

Pomijane jest także występowanie podciśnienia w początkowej fazie wyładowania niektórych gazów gaśniczych.

Nieprzemyślane rozmieszczenie dysz wylotowych względem otworów odciążających może skutkować skierowaniem strumienia wypływającego gazu w trakcie wyładowania bezpośrednio w stronę otwartych kłap i usuwaniem porcji gazu na zewnątrz obiektu (Afeltowicz-Schultz, 2017).

Wyznaczanie czasu retencji

Istotnym aspektem decydującym o skuteczności procesu gaszenia jest utrzymanie zaprojektowanego stężenia gazu gaśniczego w chronionej przestrzeni przez odpowiedni czas zwany czasem retencji (PN EN 15004-1:2008, NFPA 2001:2012, ISO 14520-1:2015). Wyznaczanie go odbywa się najczęściej analitycznie, według wybranych modeli wy-

plywu gazu z pomieszczenia. Aktualnie obowiązujące normy projektowe rozróżniają następujące modele:

- model z ostrą granicą rozdziału między mieszaniną gaśniczą a napływającym czystym powietrzem, obniżającą się w czasie retencji (NFPA 2001:2012);
- model z szeroką granicą rozdziału między mieszaniną gaśniczą a napływającym czystym powietrzem, która rozszerza się w czasie retencji (PN EN 15004-1:2008, ISO 14520-1:2015);
- model z jednorodną mieszaniną gaśniczą w całej przestrzeni chronionej, w której wraz z upływem czasu maleje stężenie gazu gaśniczego w mieszaninie, pod warunkiem występowania wymuszonego mieszania gazów w kubaturze chronionej, np. za pomocą klimatyzatorów (PN EN 15004-1:2008, NFPA 2001:2012, ISO 14520-1:2015).

Modele analityczne dają jedynie ogólny pogląd na przebieg procesu przepływu gazu gaśniczego przez pomieszczenie chronione i nie mogą być przedmiotem szczegółowych rozważań teoretycznych. Podstawowym problemem opisu przepływu gazu jest istnienie dużej liczby zmiennych, których przebieg jest pomijany w modelach normowych. W rezultacie weryfikacja stosowanych modeli wskazuje rozbieżności między wartościami mierzonymi a wyznaczanymi. W wielu przeprowadzonych eksperymentach uwolnienia gazu gaśniczego w pełnej skali obserwuje się wolniejsze bądź szybsze opadanie gazu w stosunku do wartości obliczonych przy użyciu modeli normowych (Genge, 2011).

Modele normowe zakładają znaczne uproszczenia:

- Pominięcie etapu wyładowania środka gaśniczego do przestrzeni chronionej. Modele normowe opisują proces przepływu gazu gaśniczego od chwili osiągnięcia stężenia projektowego gazu gaśniczego do momentu, w którym gaz opuszcza całkowicie pomieszczenie. Ten etap związany jest z bardzo istotnym dla procesu gaszenia utrzymaniem czasu retencji gazu gaśniczego. Nie jest brany pod uwagę moment uwolnienia gazu gaśniczego do pomieszczenia. Od prawidłowego podania i równomiernego rozdysponowania gazu zależy dalsza skuteczność procesu gaszenia.
- Nieuwzględnienie wpływu zjawisk towarzyszących wypływowi gazu ze zbiorników oraz przepływowi gazu przez pomieszczenie. Wyładowanie gazu gaśniczego jest procesem dynamicznym, któremu towarzyszy wypływ naddźwiękowy, proces turbulentnego mieszania gazu gaśniczego z powietrzem, obniżenie temperatury w wyniku rozprężenia gazu, nierzadko połączonego z przejściem fazowym środka gaśniczego.
- Stosowanie zbyt wielu uproszczeń w odniesieniu do fizyki gazów w modelach normowych. W przypadku gazów bardzo różniących się gęstością od powietrza zakłada się stratyfikację świeżego powietrza i gazu o stężeniu projektowanym. Modele nie uwzględniają odmiennego profilu rozkładu stężeń gazów o gęstości bliskiej powietrzu, który jest determinowany naturalnym mieszaniem się gazów w wyniku dyfuzji, konwekcji i występowania wirów. Procesy te są częściowo uwzględnione w modelu z szeroką granicą rozdziału, jednak ta analiza jest oparta na zero-wymiarowej zależności, a nie na analizie zjawisk gazodynamicznych (PN EN 15004-1:2008, ISO 14520-1:2015).
- Nieuwzględnienie wpływu warunków atmosferycznych na gęstość gazu gaśniczego oraz gęstość powietrza na zewnątrz i wewnątrz pomieszczenia. Wartości tych parametrów są zawsze stałe, wyznaczone dla warunków normalnych i wynoszą $1,202 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (NFPA 2001:2012) lub $1,205 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (PN EN 15004-1:2008, ISO 14520-1:2015). Dodatkowo modele normowe zakładają stałą wartość ciśnienia na zewnątrz i wewnątrz przestrzeni chronionej.
- Pominięcie możliwego wpływu źródeł pożaru na wzrost temperatury w pomieszczeniu. Nawet niewielkie ilości gorących produktów generowanych ze źródła pożaru może tworzyć dodatkowo procesy konwekcyjne i prowadzić do wzrostu temperatury w pomieszczeniu, co może wpływać na lokalną zmianę gęstości gazów, długość czasu retencji i poziom bezpieczeństwa w pomieszczeniu chronionym.
- Traktowanie w sposób uproszczony oddziaływania możliwych źródeł przepływu wewnątrz przestrzeni chronionej – wentylatory, klimatyzatory itp. Urządzenia te powodują powstanie ruchu turbulentnego, który może zaburzać naturalny kierunek przepływu po wyładowaniu gazu.
- Uwzględnienie w obliczeniach jedynie objętości stałych elementów konstrukcyjnych pomieszczenia (bez

wyposażenia), którą można odliczyć od kubatury pomieszczenia. W pomieszczeniu chronionym, w którym znajdują się przeszkody w postaci elementów wyposażenia wewnątrz, może występować problem nierównomiernego przepływu mieszanki gaśniczej, co w rezultacie może wpływać na nieskuteczność procesu gaszenia.

Chcąc zbadać i uwzględnić możliwy wpływ pomijanych dotąd parametrów, należy mieć świadomość ograniczeń tradycyjnych technik obliczeniowych, które uniemożliwiają rozwiązywanie skomplikowanych układów równań. Słusznym podejściem jest podjęcie prac ukierunkowanych na szczegółowe analizy procesu przepływu gazu, opracowanie odpowiednich założeń i budowę nowych modeli obliczeniowych. Kluczowym rozwiązaniem może okazać się zastosowanie metody obliczeniowej mechaniki płynów CFD.

Cel i zakres badań własnych

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie modelu numerycznego odwzorowującego wpływ gazu gaśniczego z pomieszczenia przy wykorzystaniu metod numerycznych CFD. Autorski model uwzględniał wpływ dodatkowych czynników, co pozwoliło na uzyskanie pełniejszego opisu zachowania gazu gaśniczego w pomieszczeniu.

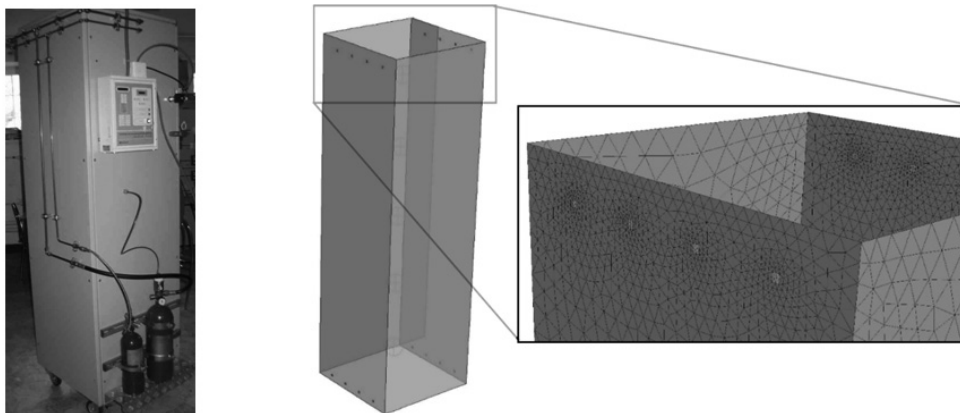
Opracowanie modelu poprzedzało przeprowadzenie badań eksperymentalnych oraz obliczeń analitycznych, których wyniki posłużyły do walidacji zaproponowanego modelu.

Metodyka badań

Jako przykład zastosowania metod numerycznych CFD do badania SUG-gazowych wybrany został przypadek zabezpieczenia komory pomiarowej w skali modelowej, dla której przeprowadzono badania fizykalne wyładowania gazu gaśniczego (Kubica, 2014; Boroń i Kubica, 2016; Kubica, Czarnecki, Boroń i Węgrzyński, 2016).

W celu przeprowadzenia analizy CFD opracowano model numeryczny stanowiska pomiarowego i przeprowadzono symulację wypływu normowych oraz nowych mieszanin gazów obojętnych do komory pomiarowej. Obszar komory pomiarowej, do której był wprowadzany gaz gaśniczy, oraz objętości powietrza otaczającego komorę poddano dyskretyzacji z wykorzystaniem niestrukturalnej tetrahedralnej siatki numerycznej. Siatkę zagęszczono w pobliżu górnych i dolnych otworów szczelności, w których należało spodziewać się występowania intensywnych zjawisk przepływowych. Rozmiar siatki zmieniał się w granicach od 2,5 mm do 10 cm wewnątrz komory oraz do 30 cm na zewnątrz komory, przy funkcji wzrostu wielkości elementu 1,15. Całkowita liczba elementów wynosiła około 350 000.

Na podstawie danych uzyskanych z badań eksperymentalnych zadano parametry fizyczne dla poszczególnych rodzajów gazów (gęstość, ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne, masa molowa, lepkość) oraz określono rodzaj warunków brzegowych dla obszaru obliczeniowego. Obliczenia inicjalizowano z założeniem jednorodnego stężenia gazu gaśniczego w całej objętości komory. Przyjęto stężenie



RYSUNEK 1. Komora pomiarowa (po lewej) i opracowany model domeny obliczeniowej (po prawej) (Kubica i in., 2016)
 FIGURE 1. Measurement chamber (left) and developed model of computational domain (right) (Kubica et al., 2016)

gazu gaśniczego w większości przypadków wynosiło 45%, co odpowiada stężeniu tlenu w komorze o wartości 11,50% (tab. 1). W tym miejscu należy zauważyć, że czas retencji definiuje się jako czas od momentu rozpoczęcia analizy do momentu osiągnięcia w którymkolwiek punkcie pomiarowym stężenia tlenu wynoszącego 13%. Badanie prowadzono dla 6 scenariuszy (tab. 1).

Omówienie wyników badań

Dzięki wykorzystaniu metod numerycznych CFD w analizie uwzględniono wpływ dodatkowych czynników pozwalających na lepsze przedstawienie i zrozumienie zjawisk przepływowych w pomieszczeniu chronionym gazem gaśniczym.

Jednym z kluczowych parametrów wpływających na szybkość wypływu mieszaniny gaśniczej z pomieszczenia chronionego jest gęstość. Zróznicowanie

warunków środowiska występujących na zewnątrz i wewnątrz komory pomiarowej w istotnym stopniu determinuje przyjęte do obliczeń wartości gęstości powietrza i gazów gaśniczych (Boroń, Wnęk, i Kubica, 2015; Kubica, 2016). Proponowany model numeryczny uzależnia gęstość od aktualnej wartości temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza, co pozwala uzyskać wierniejszy obraz warunków panujących w pomieszczeniu chronionym (rys. 2).

Gradient temperatury w otoczeniu komory pomiarowej jest kolejnym parametrem uwzględnionym w analizie procesów przepływowych. Przy dodatkowych wartościach pionowego gradientu temperatury istnieje tendencja do przemieszczania się powietrza otoczenia w górę. Zjawisko to może wpływać na kierunek wypływu mieszaniny gaśniczej szczególnie w przypadku gazów o gęstościach bardzo zbliżonych do gęstości powietrza. We wnętrzu komory pomiarowej przyjęto stałą wartość temperatury

TABELA 1. Zestawienie gazów gaśniczych biorących udział w badaniu (badania własne)
 TABLE 1. Extinguishing gases included in the study (own studies)

Ar [%v/v]	N ₂ [%v/v]	Δd [kg·m ⁻³]	Ułamek masowy O _{2,zew} Mass fraction of O _{2,out}	Ułamek masowy O _{2,wew} Mass fraction of O _{2,ins}	Ułamek masowy gaz wew Mass fraction of gas _{ins}	T_{zew} T_{out} [K]	Gradient T_{zew} T_{out} [K]	T_{wew} T_{ins} [K]	p [hPa]	ϕ [%]
50	50	0,192	0,209	0,115	0,45	289,75	0,5	288,45	1003	18,5
0	100	-0,039	0,209	0,115	0,45	288,75	0,5	289,25	1003	19,1
10	90	0,007	0,209	0,105	0,50	293,15	0,6	294,15	1010	30
6,9	93,1	-0,007	0,209	0,115	0,45	290,25	0,5	291,55	1002	25,7
7,8	92,2	-0,003	0,209	0,113	0,46	292,65	0,1	292,05	1008	20,4
7,5	92,5	-0,004	0,209	0,115	0,45	292,85	0,5	294,35	995	41

Δd – różnica między gęstością mieszaniny gaśniczej (gaz gaśniczy w steżeniu projektowym oraz powietrze wewnątrz chronionej przestrzeni) – d_m , a gęstością powietrza – d_0 , w warunkach normowych (PN EN 15004-1:2008); $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013$ hPa, $\phi = 0\%$ – difference between the density of extinguishing mixture (extinguishing gas in the design concentration and air inside the protected space) – d_m , and air density – d_0 , in standard conditions (PN EN 15004-1:2008); $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 1,013$ hPa, $\phi = 0\%$ [kg·m⁻³].

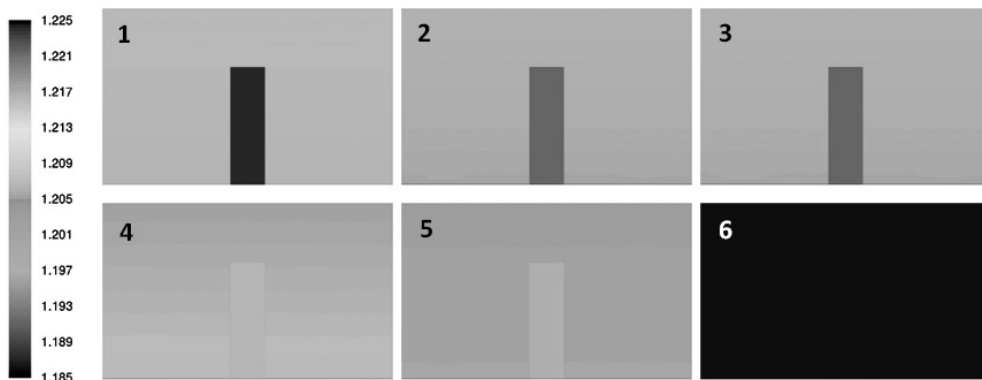
uzyskaną po wyładowaniu i wymieszaniu się gazów, zgodnie z danymi uzyskanymi w badaniach doświadczalnych (rys. 3).

Zjawisko turbulencji powstaje w wyniku wzajemnego tarcia między poszczególnymi warstwami przepływającego gazu. W pomieszczeniu chronionym następuje ciągłe nieuporządkowane pod względem szybkości i kierunku przesuwanie się i mieszanie mas gazów. Pakiet ANSYS Fluent pozwala uwzględnić występowanie zjawisk turbulencji dzięki zastosowaniu specjalnych podmodeli. Proponowane modele turbulencji różnią się między sobą sposobem opisu struktur turbulentnych wirów, dokładnością i wymaganym czasem obliczeń numerycznych (rys. 4).

W przypadku przepływu gazów o gęstości zbliżonej do gęstości powietrza następuje intensyfikacja wpływu naturalnego mieszania się gazów powodowanego przez dyfuzję, konwekcję i obecność struktur wirowych. Zagadnienia konwekcji i dyfuzji zostały uwzględnione w modelu numerycznym dzięki rozwiązaniu odpowiednich równań konwekcyjno-dyfuzyjnych (ANSYS Fluent 14.5.0 – Technical Documentation, 2014).

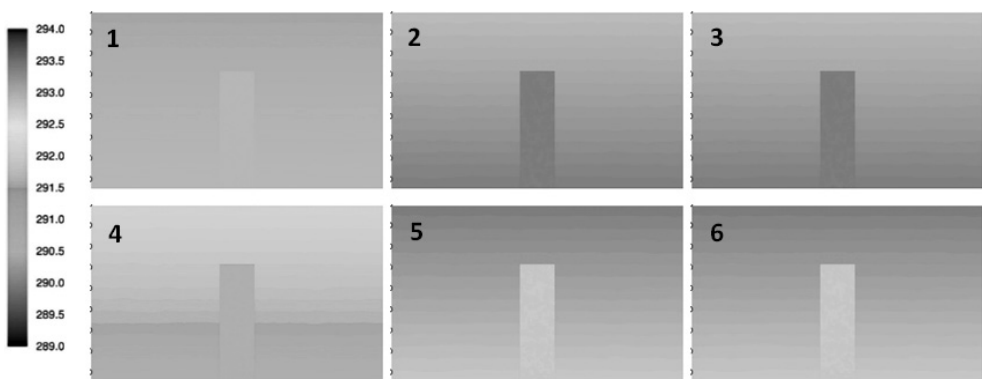
Szczegółowa analiza czasowo-przestrzenna zachowania się gazu w chronionej przestrzeni pozwala ocenić zdolność gazu do utrzymania wymaganego czasu retencji i odpowiednio dobrać rodzaj gazu gaśniczego do zabezpieczanego pomieszczenia (rys. 5).

Poprzez uwzględnienie wpływu dodatkowych parametrów możliwe jest dokładniejsze wyznaczenie wartości czasów retencji gazów gaśniczych w stosunku do



RYSUNEK 2. Warunki początkowe dla obliczeń numerycznych – porównanie gęstości ($1185\text{--}1225\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) powietrza na zewnątrz komory pomiarowej z gęstością mieszaniny gaśniczej wewnątrz komory; numery scenariuszy odpowiadają danym z tabeli 1

FIGURE 2. Initial conditions for numerical calculation – comparison of density ($1.185\text{--}1.225\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) of air outside the measuring chamber with the density of the extinguishing mixture inside the chamber; scenario numbers correspond to the data from Table 1



RYSUNEK 3. Warunki początkowe dla obliczeń numerycznych – porównanie temperatury powietrza ($289\text{--}294\text{ K}$) na zewnątrz komory pomiarowej z temperaturą mieszaniny gaśniczej wewnątrz komory; numery scenariuszy odpowiadają danym z tabeli 1

FIGURE 3. Initial conditions for numerical calculation – comparison of the air temperature ($289\text{--}294\text{ K}$) outside the measuring chamber with the temperature of the extinguishing mixture inside the chamber; scenario numbers correspond to the data from Table 1

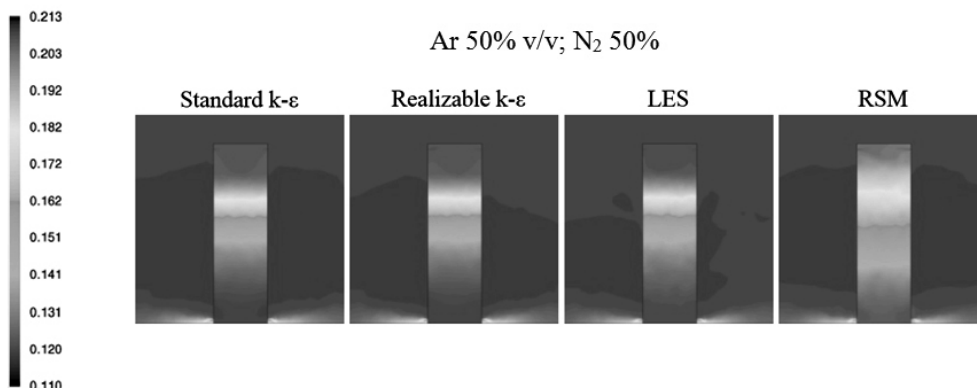
wartości uzyskanych za pomocą normowych modeli analitycznych (tab. 2).

Metody CFD pozwalają na dalszą rozbudowę modelu numerycznego w celu głębszej analizy procesu przepływu gazu gaśniczego przez pomieszczenie.

Wśród przyszłych prac badawczych można zaproponować uwzględnienie eta-

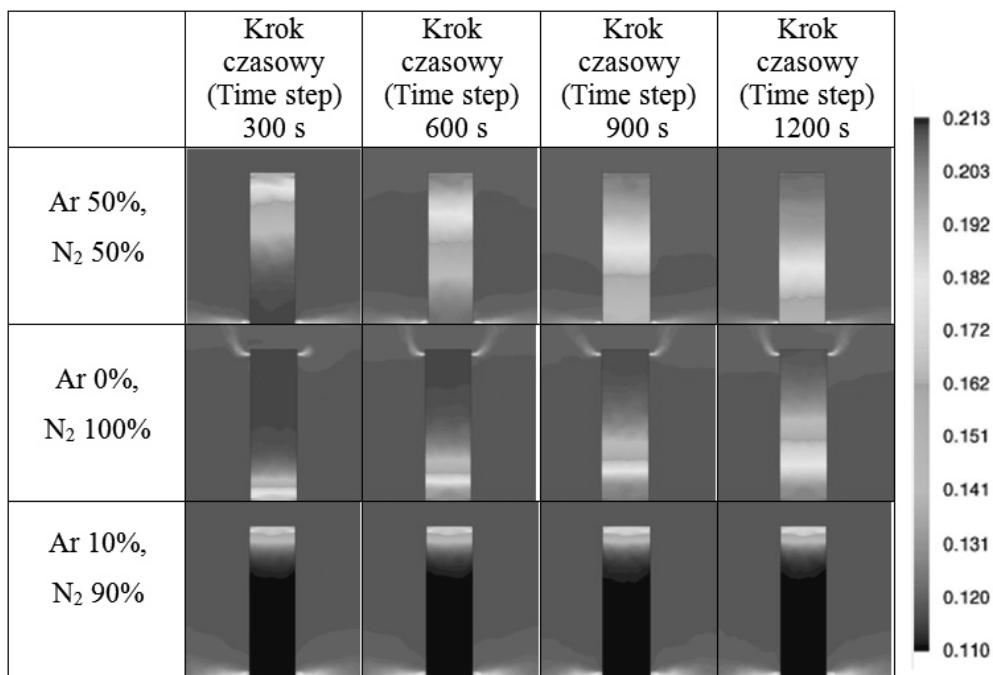
pu wyładowania gazu gaśniczego przez dyszę wylotową do przestrzeni chronionej. Zjawiska towarzyszące uwolnieniu gazu gaśniczego mogą rzutować na prawidłowe wymieszanie i rozdysponowanie środka gaśniczego.

Aby wiernie odwzorowania pełnię zjawisk zachodzących w pomieszczeniu



RYSUNEK 4. Profile rozkładów stężeń tlenu po wyładowaniu gazu Ar 50% v/v; N₂ 50% v/v w 300 s badania dla czterech modeli turbulencji

FIGURE 4. Profiles of oxygen concentrations after discharge of Ar 50% v/v; N₂ 50% v/v after 300 s of test for four turbulence models



RYSUNEK 5. Profile rozkładów stężeń tlenu w czasie dla wybranych gazów gaśniczych, zastosowany model turbulencji RSM

FIGURE 5. Profiles of distribution of oxygen concentrations in time for selected extinguishing gases, turbulent model RSM

TABELA 2. Porównanie czasów retencji dla wybranych gazów gaśniczych (badania własne)
 TABLE 2. Comparison of retention times for selected extinguishing gases (own studies)

Ar [%v/v]	N ₂ [%v/v]	Czas retencji zmierzony Retention time measured t_R [s]	Czas retencji model normowy Retention time standard model t_{Rn} [s]	Czas retencji symulacja Retention time numerical model $t_{R\text{RSM}}$ [s]
50	50	57	60,8	64
0	100	119	136,7	132
10	90	768	272	532

chronionym gazem model numeryczny powinien uwzględniać obecność klap odciążających, które są otwarte w trakcie wyładowania gazu gaśniczego, oraz umożliwić oszacowanie ich powierzchni czynnej.

Uwzględnienie elementów wyposażenia wnętrza w pomieszczeniu chronionym umożliwia śledzenie ruchu cząstek gazów, co pozwala lepiej zobrazować różnice w przepływie mieszaniny gaśniczej, pozwala także określić miejsca koncentracji środka gaśniczego lub wskazać jego ewentualne braki – tym samym identyfikowane są niedostatecznie korzystne warunki propagacji gazu, decydujące o poprawności realizacji procesu gaszenia.

Analiza wpływu występujących źródeł ciepła pozwala zbadać warunki przepływu gazu gaśniczego oraz ocenić skuteczność instalacji gaśniczej podczas pożaru lub w otoczeniu elementów grzewczych.

Ważnym aspektem jest także zbadanie wpływu instalacji współdziałających. Przykładem może być działająca w pomieszczeniu klimatyzacja, ponieważ wymusza ruch powietrza, a tym samym zapobiega nadmiernemu opadaniu chmury gazu (Tuzimek i Kubica, 2009). Ponadto przewietrzanie pomieszczeń prowa-

dzone za pomocą dedykowanej do tego celu wentylacji jest istotnym czynnikiem oddziałującym na bezpieczeństwo osób obsługujących pomieszczenie, w którym doszło do gaszenia gazem gaśniczym (Wnęk, Kuziora i Boroń, 2014; Wnęk, Kubica, Boroń i Niedziółka, 2015).

Dzięki wspomnianym zabiegom model numeryczny może stać się uniwersalnym narzędziem służącym do kompleksowego badania technologii gaszenia gazem.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono istotę nowego podejścia do procesu projektowania stałych urządzeń gaśniczych gazowych oraz efekty uwzględnienia wybranych nowych zmiennych za pomocą modelu numerycznego CFD.

W wyniku zrealizowanych obliczeń otrzymano przestrzenne rozkłady stężeń tlenu, gęstości gazu gaśniczego oraz temperatury, na podstawie których przeprowadzono analizę poprawności odwzorowywania procesu zabezpieczania pomieszczenia SUG-gazowymi.

Przedstawiony w niniejszej publikacji model numeryczny ma charakter wstępny, który czeka proces systema-

tycznego doskonalenia w najbliższej przyszłości. Jednakże już w obecnej postaci opracowany model i wyniki uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych stanowią wartościowe narzędzie inżynierskie i źródło danych o przepływie gazu dla osób zajmujących się SUG-gazowymi. Opracowany model może stać się narzędziem przydatnym dla projektantów w celu prowadzenia badań modelowych i porównawczych, a także przeprowadzania szkoleń skierowanych do osób oferujących oraz wykonujących usługi w zakresie projektowania, doboru, montażu, użytkowania i konserwacji stałych urządzeń gaśniczych gazowych.

Literatura

- Afeltowicz-Schultz, T.S (2017). Kontrole instalacji przeciwpożarowych w Polsce z punktu widzenia VdS Oddziału Kontroli Technicznej. (materiały konferencyjne). Seminarium Naukowo-Techniczne Ochrona przeciwpożarowa w budownictwie, Zakopane.
- ANSYS (2014). *ANSYS Fluent 14.5.0 – Technical Documentation*. Canonsburg: SAS IP.
- Boroń, S., Kubica, P. (2016). Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów CFD do modelowania zabezpieczania pomieszczeń stałymi urządzeniami gaśniczymi gazowymi. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 42, 151-157.
- Boroń, S., Wnęk, W., Kubica, P. (2015). Analiza porównawcza czasów retencji wybranych gazów gaśniczych w warunkach rzeczywistych. *Logistyka*, 5, 687-693.
- Genge, C. (2011). *Clean agent enclosure design optimization for peak pressures and agent retention*. (materiały konferencyjne), SFPE Engineering Technology Conference, Portland.
- ISO 14520-1:2015. Gaseous fire-extinguishing systems. Physical properties and system design. Part 1: General requirements.
- Kubica, P. (2014). *Czas retencji gazów gaśniczych w aspekcie bezpieczeństwa pożarowego pomieszczeń* (rozprawa doktorska). Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej.
- Kubica, P., Czarnecki, L., Boroń, S., Węgrzyński, W. (2016). Maximizing the retention time of inert gases used in fixed gaseous extinguishing systems. *Fire Safety Journal*, 80, 1-8.
- NFPA 2001:2012. Standard On Clean Agent Fire Extinguishing Systems.
- PN EN 15004-1:2008. Stałe urządzenia gaśnicze. Urządzenia gaśnicze gazowe. Część 1: Ogólne wymagania dotyczące projektowania i instalowania.
- Tuzimek, Z., Kubica, P. (2009). Stałe urządzenia gaśnicze gazowe, cz. 2 – wprowadzenie do projektowania. Pobrano z lokalizacji: <http://www.sgsp.edu.pl> [dostęp: 23.07.2009].
- Wnęk, W., Kubica, P., Boroń, S., Niedziółka, K. (2015). Przewietrzanie pomieszczeń po gaszeniu gazem. *Przemysł Chemiczny*, 94(5), 1000-1003.
- Wnęk, W., Kuziora, Ł., Boroń, S. (2014). Stałe urządzenie gaśnicze gazowe a czas użytkowania pomieszczeń. *Materiały Budowlane*, 10(506), 116-118.

Streszczenie

Optymalizacja procesu projektowego stałych urządzeń gaśniczych gazowych za pomocą metod numerycznych CFD. Obliczeniowa mechanika płynów (ang. *computational fluid dynamics*, CFD) jest nowoczesnym narzędziem stosowanym w praktyce inżynierskiej, które może zostać wykorzystane do optymalizacji procesu projektowania stałych urządzeń gaśniczych gazowych (SUG-gazowych). W pracy przedstawiono wybrane możliwości praktycznego stosowania metod numerycznych do oceny poszczególnych parametrów projektowych SUG-gazowych. Główną cechą modelowania CFD jest możliwość uzyskania rozkładów stężeń gazów, kierunków przepływu strumienia mieszaniny gaśniczej w chronionym po-

mieszczeniu oraz przestrzennego rozkładu temperatury powietrza, co stanowi istotny walor poznawczy tej metody. Uzyskane wyniki wskazują na potencjał praktycznego wykorzystania metod CFD w modelowaniu zabezpieczeń gazem gaśniczym rzeczywistych pomieszczeń.

Summary

Optimization of the design process of fixed gaseous extinguishing systems using numerical methods CFD. Computational fluid dynamics (CFD) is a modern tool used in engineering practice that can be used to optimize the design of fixed gaseous extinguishing systems (FGE-systems). The paper

presents selected possibilities of practical application of numerical methods for evaluation of individual FGE-systems design parameters. The main feature of CFD modeling is the ability to obtain gas concentration distributions, flow directions of fire extinguishing mixture in a protected room and spatial distribution of air temperature, which is an important cognitive value of this method. The results show the potential for practical use of CFD methods in the modeling of extinguishing gas protection of real properties.

Authors' address:

Sylwia Boroń
Szkoła Główna Służby Pożarniczej
ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa
Poland
e-mail: sylwiaboron@op.pl