

kpt. mgr inż. **Sylwia Boron**<sup>1</sup>  
mł. bryg. dr inż. **Przemysław Kubica**<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 10.05.2016;  
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 30.05.2016;  
Opublikowany/Published/Опубликована: 30.06.2016;

## Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów CFD do modelowania zabezpieczania pomieszczeń stałymi urządzeniami gaśniczymi gazowymi<sup>2</sup>

### Application of Computational Fluid Dynamics CFD for Modeling of Protection of Premises by Fixed Gaseous Extinguishing System

### Применение вычислительной гидродинамики для моделирования пожарной защиты помещений с помощью стационарных газовых установок пожаротушения

#### ABSTRAKT

**Cel:** W artykule podjęto problem bezpieczeństwa pożarowego pomieszczeń chronionych instalacją stałych urządzeń gaśniczych gazowych. Zwiększenie precyzji i wiarygodności modelowania procesu gaszenia gazem gaśniczym można osiągnąć poprzez zastosowanie metod numerycznej mechaniki płynów CFD przy wykorzystaniu oprogramowania ANSYS FLUENT. Celem badań było opracowanie modelu numerycznego CFD wypływu gazu gaśniczego z przestrzeni chronionej i zbadanie z jego pomocą skuteczności gaśniczej określonych typów gazów.

**Projekt i metody:** W artykule przedstawiono propozycję numerycznego modelu przepływu gazu gaśniczego przez pomieszczenie. Zawarto także opis badań eksperymentalnych i obliczeń analitycznych przeprowadzonych w celu jego walidacji. Wskazano na przykłady praktycznego wykorzystania opracowanego modelu CFD do symulacji, których wyniki mogą wspomagać projektowanie stałych urządzeń gaśniczych gazowych.

**Wyniki:** Analiza porównawcza zebranych wyników symulacji pozwoliła wskazać model Standard k- $\epsilon$  jako model zapewniający największą zbieżność wyników z wynikami badań w skali rzeczywistej. Wartości czasu retencji uzyskane w drodze symulacji były bliższe wynikom rzeczywistym w porównaniu z wartościami otrzymanymi na podstawie obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu normowego.

**Wnioski:** Modelowanie CFD umożliwia poddanie analizie mechanizmu przepływu gazu przez pomieszczenie z większą dokładnością niż dotychczas stosowane modele. Pozwala to na optymalizację doboru rodzaju oraz ilości gazu gaśniczego z uwagi na czas retencji. Dobór gazu gaśniczego o gęstości mieszaniny zbliżonej do gęstości powietrza daje możliwość uzyskania czasu retencji przekraczającego czas retencji otrzymany w przypadku zastosowania gazów wskazanych w obowiązujących normach. Zastosowanie modelowania CFD umożliwia prowadzenie badań przy wykorzystaniu przestrzeni wirtualnej, eliminując przy tym niebezpieczeństwo związane z prowadzeniem prac pomiarowych stanowiących zagrożenie dla ludzi oraz redukuje koszty finansowe związane z wyładowaniem gazu.

**Słowa kluczowe:** stałe urządzenie gaśnicze gazowe, gaz obojętny, czyste środki gaśnicze, czas retencji, model przepływu gazu przez pomieszczenie, numeryczna mechanika płynów CFD

**Typ artykułu:** doniesienie wstępne

#### ABSTRACT

**Aim:** The problem of fire safety of areas protected by fixed gaseous extinguishing system is discussed. Increasing the accuracy and reliability of the modeling of gas extinguishing process can be achieved by using methods of computational fluid dynamics CFD using ANSYS FLUENT software. The aim of the study was to develop a numerical CFD model of extinguishing gas flow of the protected space and to examine the extinguishing effectiveness of particular type of norm gases and newly proposed extinguishing gas mixtures with a density similar to the density of air, which significantly limited the phenomenon of outflow of gas from the room and allowed to get longer retention times.

**Project and methods:** The paper proposes a numerical model of extinguishing gas flow through the room which was developed using ANSYS Fluent program, the description of experimental researches carried out in real scale and analytical calculations based on the norm model of gas flow through the room carried out to validate the created CFD model. Examples of practical use of CFD model for simulation, results of which can provide information to support the design of fixed gaseous extinguishing systems were presented.

**Results:** On the basis of a comparative analysis of the collected simulation results model Standard k- $\epsilon$  was indicated as a model that provides the greatest convergence of test results in real scale. Retention times obtained by the computer simulation were closer to real scale results than the retention times obtained on the basis of calculation using the norm wide interface model.

**Conclusions:** The use of CFD modeling allows to review the mechanism of gas flow through the room with greater accuracy than previously

<sup>1</sup> Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie / The Main School of Fire Service; Warsaw, Poland; sboron@sgsp.edu.pl;

<sup>2</sup> Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w powstanie artykułu / The authors contributed equally to this article; Artykuł zostały wyróżniony przez Komitet Redakcyjny / The article was recognised by the Editorial Committee;

used models. This allows for optimal selection of the type and amount of extinguishing gas due to the retention time. Selection of extinguishing gas with the mixture density similar to air density, makes it possible to obtain a retention time exceeding the retention time of the gases specified in the applicable standards. The use of CFD modeling allows to conduct research using virtual space, eliminating the danger related to measurement process posing a threat to humans and reduce financial costs associated with the discharge of extinguishing gas.

**Key words:** fixed gaseous extinguishing system, inert gases, clean extinguishing agents, retention time, model of gas flow through the room, computational fluid dynamics CFD

**Type of article:** short scientific report

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** Статья затрагивает проблему пожарной безопасности помещений, защищаемых стационарными газовыми установками пожаротушения. Повышение точности и надежности процесса моделирования газового пожаротушения может быть достигнуто с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD), используя программное обеспечение ANSYS FLUENT. Цель исследования заключалась в разработке числовой модели CFD утечки огнетушащего газа из защищаемого пространства и изучение с ее помощью огнетушащей эффективности конкретных типов газов, предусмотренных стандартами, а также новой, предложенной авторами, смеси огнетушащего газа. Плотность предложенной смеси похожа на плотность воздуха, что значительно ограничивало явление утечки газа из помещения и позволяло получить более длительную ретенцию.

**Проект и методы:** В статье представлена числовая модель потока огнетушащего газа проходящего через помещение, разработанная при использовании программного обеспечения ANSYS Fluent. Указано также описание экспериментальных исследований в реальном масштабе, а также аналитических расчетов, на основе стандартной модели потока газа через помещение, проведенных с целью проверки разработанной модели CFD. Представлены также примеры ее практического использования для целей симуляций, результаты которых могут помочь получить полезную информацию для проектировки систем стационарных газовых установок пожаротушения.

**Результаты:** Сравнительный анализ собранных результатов симуляции позволил доказать, что Стандартная модель K-Epsilon является моделью, которая обеспечивает наибольшее соответствие с результатами испытаний в реальном масштабе. Время ретенции, полученное в ходе компьютерных симуляций больше соответствовало реальному, чем время, полученное на основе расчетов, сделанных при использовании стандартной модели с широким разграничением между огнетушащей смесью и поступающим в помещение потоком свежего воздуха.

**Выводы:** Использование моделирования CFD позволяет проанализировать механизм газового потока через помещение с большей точностью, чем ранее используемые модели. Это позволяет провести оптимальный выбор типа и количества огнетушащего газа относительно времени ретенции. Выбор огнетушащего газа с плотностью аналогичной плотности воздуха дает возможность получить время ретенции выше времени, полученного при использовании газов, указанных в соответствующих стандартах. Использование моделирования CFD позволяет проводить исследования в виртуальной реальности, одновременно устраняя опасности, связанные с выполнением измерительных работ, которые могут представлять угрозу для людей, а также снизить финансовые затраты, связанные с выбросом газа.

**Ключевые слова:** стационарная газовая установка пожаротушения, нейтральный газ, время ретенции, чистые гасящие средства, модель потока газа через помещение, вычислительная гидродинамика CFD

**Вид статьи:** предварительный отчет

## 1. Wprowadzenie

Stałe urządzenia gaśnicze gazowe (SUG-gazowe) działają na zasadzie stłumienia pożaru i przerwania procesu spalania dzięki obecności gazu gaśniczego. Stosowane są do ochrony obiektów, w których zgromadzono mienie o dużej wartości materialnej oraz tych, które wymagają zachowania ciągłości pracy znajdujących się w nich urządzeń objętych ochroną.

Bezpieczeństwo pożarowe pomieszczeń wyposażonych w stałe urządzenia gaśnicze gazowe wynika w szczególności z obecności gazu gaśniczego, który powinien wygasić pożar natychmiast po wyładowaniu, a następnie zabezpieczyć pomieszczenie przed ponownym rozwojem palenia. Czas, w którym stężenie gazu gaśniczego jest wystarczające by uniemożliwić wtórny pożar, nazywany jest czasem rетенcji. Wypływ gazu gaśniczego z pomieszczenia związany jest z różnicą ciśnień hydrostatycznych między słupem powietrza na zewnątrz przestrzeni chronionej a słupem mieszaniny gaśniczej wewnątrz. Różnica ciśnień wynika przede wszystkim z różnicy gęstości mieszaniny gaśniczej oraz otaczającego powietrza, co powoduje wypływ mieszaniny gaśniczej przez nie szczelności w przegrodach pomieszczenia i wzrost stężenia tlenu. Pomieszczenia chronione gazami powinny być na tyle szczelne, by dostatecznie długo utrzymać wymagane stężenie gazu gaśniczego, czyli zapewnić wymagany czas rетенcji. Wydłużenie czasu rетенcji zwiększa prawdopodobieństwo przeprowadzenia skutecznych działań ratowniczych i ugaszenia pożaru we wstępnej fazie [1-3]. Zapobiega także powstaniu

rozgorzenia w następnych etapach pożaru np. w wyniku działania podwyższonej temperatury.

Aktualnie obowiązujące normy dotyczące SUG-gazowych wyróżniają następujące modele wypływu gazu z pomieszczenia:

- model z ostrą granicą rozdziału między mieszaniną gaśniczą a napływającym czystym powietrzem, obniżającą się w czasie rетенcji [2];
- model z szeroką granicą rozdziału między mieszaniną gaśniczą a napływającym czystym powietrzem, rozszerzającą się w czasie rетенcji [1], [3];
- model z jednorodną mieszaniną gaśniczą w całej przestrzeni chronionej, gdzie wraz z upływem czasu maleje stężenie gazu gaśniczego w mieszaninie, pod warunkiem występowania wymuszonego mieszania gazów w kubaturze chronionej, np. za pomocą klimatyzatorów [1-3].

Prowadzone obecnie badania ukierunkowane są na rozszerzenie oraz walidację stosowanych modeli. Dzięki znacznemu postępowi, jaki dokonał się w nauce w zakresie metod projektowania przepływu gazów gaśniczych, w połączeniu z rozwojem technologii numerycznej mechaniki płynów (ang. Computational fluid dynamics - CFD) oraz wzrostem wydajności obliczeniowej komputerów, otworzyły się nowe perspektywy badawcze, umożliwiające badanie stałych urządzeń gaśniczych gazowych. Oprogramowanie do modelowania przepływu płynów ANSYS Fluent może stać się nowym ważnym narzędziem inżynierskim w badaniach z zakresu SUG-gazowych. Program pozwala na modelowanie zjawisk

związanych z przepływami (spalanie, turbulencja, przepływy wielofazowe, reakcje chemiczne, przewodzenie ciepła, radiacja itp.), co daje możliwości prowadzenia szybkiego doboru gazu gaśniczego do zabezpieczenia pomieszczenia o określonej charakterystyce. Ponadto program dysponuje szerokim wachlarzem modeli do symulowania zjawiska turbulencji związanego z wyładowaniem gazu gaśniczego, takich jak: k-epsilon, k-omega, Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES), Detached Eddy Simulation (DES), Scale-Adaptive Simulation (SAS). Oprogramowanie oferuje kompleksowy zestaw do modelowania konwekcji, przewodzenia ciepła i radiacji. Badania związane z wymianą ciepła mogą być przeprowadzane przy wykorzystaniu m.in. modeli kawitacji, płynów ściśliwych, wymienników ciepła, gazów rzeczywistych, pary mokrej, topnienia i krzepnięcia [4].

Metoda numeryczna mechaniki płynów CFD daje możliwość wirtualnego obrazowania ochrony pomieszczeń stałymi urządzeniami gaśniczymi gazowymi. Modelowanie wypływu gazu z pomieszczenia chronionego istotnie poszerza możliwości poznawcze, w szczególności te dotyczące wyznaczania czasu retencji i doboru gazu gaśniczego.

Ta motywacja skłoniła autorów do podjęcia badań wstępnych mających na celu opracowanie modelu CFD przepływu gazu gaśniczego przez pomieszczenie, który zapewni wiarygodne wyniki pomiarów i pozwoli wyznaczać czas retencji z większą dokładnością niż dotychczas stosowane modele.

## 2. Metody

Celem przeprowadzonych badań było stworzenie i zbadanie modelu przepływu gazu gaśniczego przez pomieszczenie przy wykorzystaniu odpowiednich metod numerycznych CFD. Opracowanie modelu wymagało poprzedniego przeprowadzenia badań eksperymentalnych oraz obliczeń analitycznych, których wyniki posłużyły do walidacji stworzonego modelu. Przedmiotem badań był gaz normowy oraz nowo zaproponowana mieszanka gazu gaśniczego o gęstości zbliżonej do gęstości powietrza, która pozwoliła w istotnym stopniu ograniczyć zjawisko wypływu gazu z pomieszczenia i uzyskać dłuższe czasy retencji.

Badania w skali rzeczywistej posłużyły do uzyskania niezbędnych informacji na temat procesu przepływu gazu przez pomieszczenie, dzięki czemu możliwe było uzyskanie wyso-

kiej wiarygodności modelowania. Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym składającym się z:

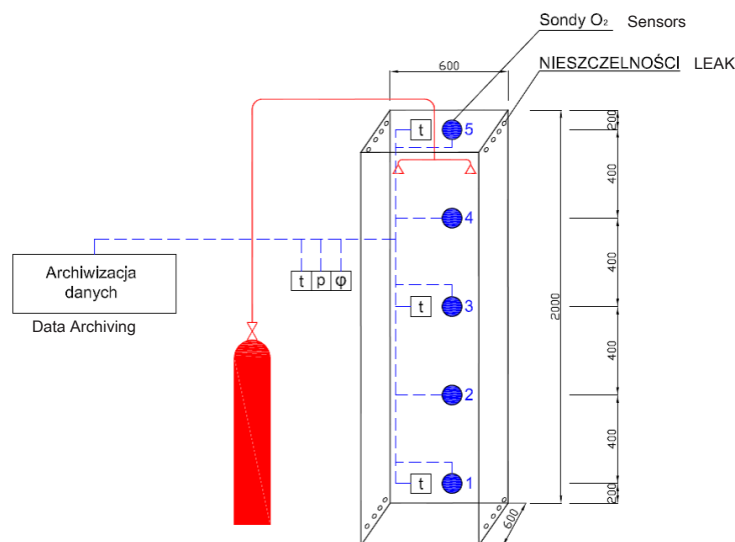
- obudowy w kształcie prostopadłościanu, wykonanej z blachy stalowej, z otwieranym, przeszklonym frontem, stanowiącej przestrzeń chronioną gazem gaśniczym,
- układu podawania środka gaśniczego,
- układu do pomiaru stężeń i temperatur.

Wymiary przestrzeni chronionej wynosiły: podstawa 0,6 m x 0,6 m, wysokość 2,0 m, co dawało objętość 0,72 m<sup>3</sup>. Obudowa została uszczelniona na łączeniach ścian oraz w miejscach przejść kabli urządzeń pomiarowych i rur układu podawania środka gaśniczego. Nieszczelności w obudowie identyfikowano metodą nadciśnienia wytwarzanego za pomocą wentylatora nawiewającego powietrze przez otwór w dolnej części (dolna ścianka była demontowalna). Po eliminacji nieszczelności w górnej i dolnej części rozmieszczono symetrycznie otwory symulujące nieszczelności. Wykonano 16 otworów, 8 w dolnej i 8 w górnej części, o łącznej powierzchni 18 cm<sup>2</sup>. Powierzchnię otworów dobrano tak, aby powierzchnia nieszczelności przypadająca na m<sup>2</sup> powierzchni przegród wydzielających przestrzeń chronioną wynosiła około 3,5<sup>4</sup> 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. Po wykonaniu otworów, obudowę poddano testowi szczelności i wyznaczono współczynniki charakteryzujące nieszczelności:  $k_1 = 0,0015$ ,  $n = 0,4949$ . Stanowisko znajdowało się w klimatyzowanym pomieszczeniu o kubaturze 70 m<sup>3</sup> [5].

Układ podawania środka gaśniczego składał się z butli z gazem gaśniczym, wyposażonej w zawór szybkootwieralny, rurociągu doprowadzającego gaz gaśniczy do chronionej przestrzeni oraz dwóch dysz. Ilość gazu była dobrana tak, aby po wyładowaniu osiągnąć stężenie objętościowe gazu gaśniczego na poziomie 45%, co odpowiadało obniżeniu objętościowego stężenia tlenu do wartości 11,5%.

Do pomiaru stężeń gazów stosowano sondy tlenu z sensorem elektrochemicznym. Stężenia mierzono na 5 wysokościach: 20 cm, 60 cm, 100 cm, 140 cm i 180 cm od podłogi. Wysokości odpowiadały 10%, 30%, 50%, 70% i 90% wysokości przestrzeni chronionej. Pomiar stężeń tlenu prowadzono w sposób ciągły, wyniki rejestrowano co 1 sekundę i archiwizowano w komputerze [5].

Na podstawie zmierzonych wartości rozkładu stężeń gazu gaśniczego wyznaczano czas retencji [s] – mierzony od chwili, gdy w przestrzeni chronionej zostało osiągnięte stężenie



Ryc. 1. Schemat stanowiska badawczego [5]

Fig. 1. Test stand [5]

tlenu  $c_{O_2} = 11,5\%$  v/v odpowiadające stężeniu projektowemu gazu gaśniczego  $c_p = 45\%$  v/v, do chwili, gdy na którejkolwiek sondzie stężenie  $O_2$  osiągnęło wartość tlenu  $c_{O_2} = 13\%$  v/v (odpowiadającą 85% stężenia projektowego gazu gaśniczego) [3], [6-7].

Do analitycznego wyznaczenia rozkładu stężeń badanych gazów gaśniczych posłużył normowy model z szeroką granicą rozdziału pomiędzy mieszaniną gaśniczą a napływający czystym powietrzem, rozszerzającą się w czasie retencji. Wybór został uargumentowany faktem, iż model z szeroką granicą daje wartość czasu retencji krótszą od czasu rzeczywistego. Takie podejście zapewnia wnioskowanie po stronie bezpiecznej. Czas retencji wyznaczono na podstawie równania [1], [3]:

$$t = \frac{V}{H_0} \frac{(k_3 H_0 + k_4)^{1-n} - (k_3 H_e + k_4)^{1-n}}{(1-n)k_2 F k_3} \quad (1)$$

gdzie:

$t$  – czas [s];

$H_e$  – wysokość ekwiwalentna, na której będzie granica rozdziału po czasie  $t$  [m];

$V$  – kubatura pomieszczenia [m<sup>3</sup>];

$H_0$  – wysokość pomieszczenia [m];

$F$  – bezwymiarowy stosunek nieszczelności w dolnej części pomieszczenia do całkowitej powierzchni nieszczelności;

$k_2, k_3, k_4$  – stałe upraszczające.

Równania modelu analitycznego zostały zaimplementowane do pakietu R, który umożliwił obliczenie poszczególnych składowych równań modelu.

W badaniach symulacyjnych wykorzystano sprzęt komputerowy o dużej wydajności obliczeniowej, wyposażony w oprogramowanie do modelowania przepływu płynów ANSYS Fluent 14.5. Za pomocą programu ANSYS Fluent został

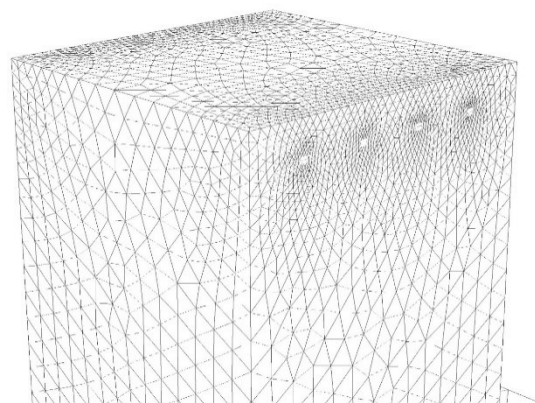
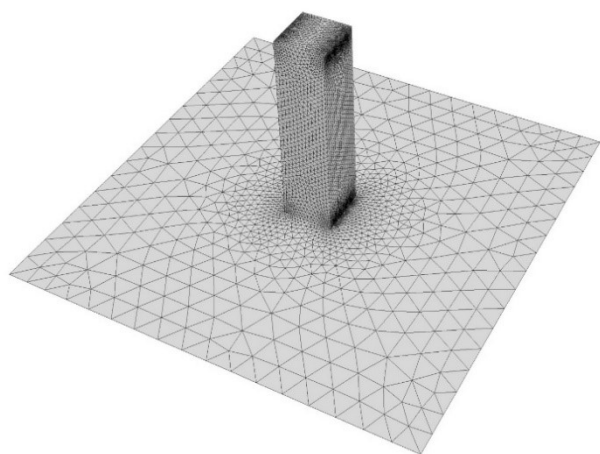
no siatkę niestructuralną o trójkątnym kształcie elementów. Ponadto obszary charakterystyczne – górne i dolne otwory nieszczelności, w których należało się spodziewać występowania najbardziej intensywnych zjawisk przepływowych, podzielono na mniejsze pola, a następnie zagęszczono siatkę. Przed przystąpieniem do właściwych obliczeń określono rodzaj warunków brzegowych dla obszaru obliczeniowego oraz zadano parametry fizyczne dla poszczególnych typów gazów (gęstość, ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne, masa mola, lepkość).

Za początek symulacji przyjęto stan tuż po wyładowaniu i osiągnięciu przez gaz gaśniczy w komorze stężenia projektowego. Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w trybie przejściowym (ang. *transient*) za pomocą solvera Pressure-based.

Na podstawie intuicji inżynierskiej i badań studialnych dokonano wyboru modeli turbulencji, które posłużyły do wykonania symulacji komputerowych. Wskazanymi modelami były: Standard k- $\epsilon$ , Realizable k- $\epsilon$ , RSM oraz LES [8-9]. Kryterium oceny przydatności zaproponowanych modeli turbulencji była zbieżność otrzymanych wyników symulacji z wynikami uzyskanymi w trakcie badań doświadczalnych w zakresie:

- rozkładów wartości stężeń tlenu na poszczególnych sondach,
- wyznaczonych wartości czasów retencji,
- występowania zjawiska samoistnego mieszania gazów.

Użyteczność i poprawność numerycznego modelu CFD została sprawdzona na podstawie analizy porównawczej wartości rozkładu stężeń gazów uzyskanych w drodze symulacji komputerowych z wynikami eksperymentów przeprowadzonych w skali rzeczywistej oraz wynikami obliczeń przeprowadzonych za pomocą modelu analitycznego.



Ryc. 2. Model geometryczny komory pomiarowej

Fig. 2. Geometric model of the test chamber

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

opracowany numeryczny model CFD i przeprowadzone symulacje wyładowania normowego gazu gaśniczego oraz nowej mieszanki gazów objętych do pomieszczenia chronionego. Symulacje te stanowiły podstawę do obliczeń numerycznych rozkładu stężeń gazów gaśniczych w pomieszczeniu.

Prace symulacyjne rozpoczęto od stworzenia geometrii obszaru obliczeniowego – trójwymiarowego modelu komory pomiarowej (ang. *solid*), do której został wyładowywany gaz gaśniczy, oraz objętości powietrza otaczającej komorę (ang. *fluid*). Kolejnym etapem było wygenerowanie siatki numerycznej pokrywającej obszar obliczeniowy. Zastosowa-

### 3. Wyniki

Badania wykonano dla normowego gazu gaśniczego o składzie  $Ar = 50\%$  v/v i  $N_2 = 50\%$  v/v (oznaczenie według normy [3] IG 55) oraz dla mieszanki o gęstości zbliżonej do gęstości powietrza  $Ar = 8,9\%$  v/v i  $N_2 = 91,1\%$  v/v.

Na podstawie analizy porównawczej zebranych wyników symulacji wskazano model Standard k- $\epsilon$  jako model zapewniający największą zbieżność wyników z wynikami badań w skali rzeczywistej. Wyniki symulacji przeprowadzone z wykorzystaniem modelu Standard k- $\epsilon$  zostały poddane dalszej interpretacji.

**Tabela 1.** Zestawienie gazów gaśniczych użytych w badaniach**Table 1.** Summary of extinguishing gases used during tests

Lp. / No.	Ar [% v/v]	N <sub>2</sub> [% v/v]	Gęstości mieszaniny gaśniczej / Extinguishing mixture's density (t= 20°C, p=1013 hPa, φ = 0%) d <sub>m</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Δd <sup>3</sup> = d <sub>m</sub> - d <sub>0</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] (t= 20°C, p=1013 hPa, φ = 0%)
1	50	50	1,395	0,192
2	8,9	91,1	1,206	0,002

<sup>3</sup>Δd – różnica między gęstością mieszaniny gaśniczej a gęstością powietrza, w warunkach normowych / the difference between the density of an extinguishing mixture and air density in normative conditions [3] [kg/m<sup>3</sup>]

d<sub>m</sub> – gęstość mieszaniny gaśniczej (gaz gaśniczy w stężeniu projektowym oraz powietrze wewnątrz chronionej przestrzeni) / density of a fire extinguishing mixture (extinguishing gas) in project concentration and the air inside the protected area [kg/m<sup>3</sup>]

d<sub>0</sub> – gęstość powietrza / air density [kg/m<sup>3</sup>]

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

**Tabela 2.** Zestawienie czasów retencji gazów gaśniczych wyznaczonych w trakcie badań doświadczalnych przeprowadzonych w skali rzeczywistej z wynikami uzyskanymi za pomocą modelu normowego z szeroką granicą rozdziału oraz wynikami obliczeń za pomocą symulacji komputerowych**Table 2.** Summary of retention times of extinguishing gases identified by experimental studies carried out in real scale with the results obtained using the norm with a wide interface model and the results of calculations using computer simulations

Lp. / No.	Ar [% v/v]	N <sub>2</sub> [% v/v]	Czas retencji zmierzony / Measured retention time t <sub>r</sub> [s]	Czas retencji model normowy / Retention time, normative model t <sub>Rn</sub> [s]	Czas retencji symulacja tR Standard k-ε Retention time, simulation tR Standard k-ε / [s]	Czas retencji symulacja tR Realizable k-ε / Retention time, tR Realizable k-ε simulation [s]	Czas retencji symulacja t <sub>R</sub> <sup>RSM</sup> / Retention time, t <sub>R</sub> <sup>RSM</sup> simulation [s]	Czas retencji symulacja t <sub>R</sub> <sup>LES</sup> / Retention time, t <sub>R</sub> <sup>LES</sup> simulation / [s]
1	50	50	73	70,8	72,5	73,5	64	69
2	8,9	91,1	363	320	359	377,5	352	371,5

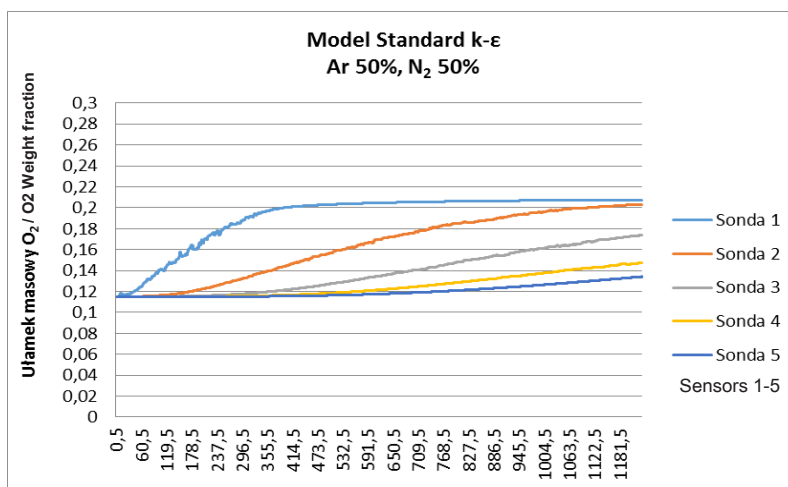
**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

W czasie retencji gazu gaśniczego o składzie Ar 50% v/v - N<sub>2</sub> 50% v/v nastąpił wypływ mieszaniny gaśniczej dolnymi nieszczelnosćmi i napływ powietrza górnymi, charakterystyczny dla gazów gaśniczych cięższych od powietrza  $\Delta d > 0$ . W konsekwencji w pierwszej kolejności wzrosło stężenie tlenu na górnej sondzie – sonda nr 1, oznaczonej kolorem niebieskim, umieszczonej na 90% wysokości pomieszczenia. Na pozostałych sondach stężenie tlenu wzrastało w miarę obniżania się granicy rozdziału mieszaniny gaśniczej od powietrza. Największą pochyłość krzywej odnotowano na sondzie 5, umieszczonej najniżej, tj. na 10% H. Powyższe wskazuje, że w dolnej części, gdzie szybkość opadania mieszaniny była

mniejsza, z uwagi na mniejszą różnicę ciśnień hydrostatycznych, uwidaczniał się wpływ naturalnego mieszania gazów. Wyznaczony czas retencji wyniósł 72,5 s i był o 0,5 s krótszy od czasu uzyskanego w drodze badań doświadczalnych. Za pomocą modelu normowego z szeroką granicą rozdziału otrzymano czas retencji krótszy o 2,2 s w stosunku do czasu rzeczywistego.

W czasie retencji gazu gaśniczego o składzie Ar 8,9% - N<sub>2</sub> 91,1% gęstość mieszaniny gaśniczej była bardzo zbliżona do gęstości otaczającego powietrza. Nastąpił napływ powietrza z zewnątrz górnymi nieszczelnosćmi, co odzwierciedlał wzrost stężenia tlenu na sondzie 1. Wraz z upływem czasu

**Ryc. 3.** Rozkład stężeń tlenu w przestrzeni chronionej w czasie retencji gazu gaśniczego Ar = 50% N<sub>2</sub> = 50%**Fig. 3.** Distribution of oxygen concentration in the protected space during the retention time of extinguishing gas Ar = 50% N<sub>2</sub> = 50%

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

następowało przemieszanie napływającego powietrza i mieszaniny gaśniczej – odczyty z sond na wysokości 0,1H, 0,3H oraz 0,5H były do siebie zbliżone. Wyznaczony czas retencji wyniósł 359 s i był o 4 sekundy krótszy od czasu zmierzonego w warunkach rzeczywistych. Czas retencji wyliczony za pomocą modelu normowego z szeroką granicą rozdziału między mieszaniną gaśniczą a napływającym czystym powietrzem był o 43 sekund krótszy od czasu uzyskanego w drodze badań doświadczalnych.

Na podstawie analizy uzyskanych wartości czasów retencji można stwierdzić, że zastosowanie nowej mieszaniny gaśniczej o gęstości zbliżonej do gęstości powietrza pozwala uzyskać prawie pięciokrotnie dłuższy czas retencji w stosunku do gazu normowego.

#### 4. Dyskusja nad metodą i wynikami

Bardzo popularną, a zarazem rzetelną metodą badań, jest łączenie badań doświadczalnych i numerycznych. Wyniki badań eksperymentalnych umożliwiają weryfikację modelu numerycznego i zastosowanej metodyki obliczeniowej. W przypadku zgodności wyników obydwu badań stwierdza się poprawność modelu numerycznego z metodą obliczeniową. Spośród dostępnych programów komputerowych autorzy pracy zdecydowali się na wybór oprogramowania ANSYS Fluent do zamodelowania procesu gaszenia gazem gaśniczym kubatury chronionej. W przeciwieństwie do innych programów ANSYS Fluent oferuje szereg modeli turbulencji m.in. k-epsilon, k-omega, Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES), co zapewnia możliwość rozwiązania zróżnicowanych przepływów i optymalne dopasowanie modelu do oczekiwań użytkownika. Na potrzeby badań dokonano wstępnej selekcji modeli turbulencji spełniających założenia i przewidywania w zakresie wyników. Wskazanymi modelami były: Standard k-ε, Realizable k-ε, RANS oraz LES. Największą zbieżność z badaniami rzeczywistymi wykazał model Standard k-ε i to jego wyniki zostały poddane analizie w dalszej części pracy. Na podstawie otrzymanych zbieżnych wyników badań numerycznych i doświadczalnych dla danego modelu i określonych warunków brzegowych można wnioskować, że przy zmianie rodzaju gazu lub przy modyfikacji elementów konstrukcyjnych wyniki kolejnych analiz numerycznych będą również poprawne i wiarygodne.

Symulacje komputerowe mogą stanowić alternatywę dla kosztownych badań eksperymentalnych. Dotyczy to zarówno prac prowadzonych na etapie projektowania, przebudowy już istniejącej instalacji, a także ustalania przyczyn wystąpienia możliwych awarii. Poprawnie opracowany model może stanowić narzędzie do poszukiwania i badania nowych mieszanek gazu gaśniczego, zapewniających maksymalizację czasu retencji, przy znacznym ograniczeniu nakładów finansowych.

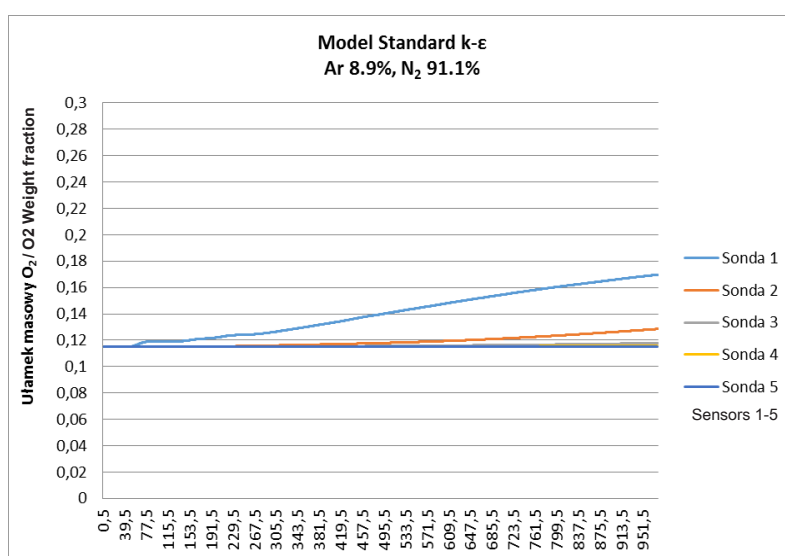
Modele analityczne proponowane przez obowiązujące normy nie doszacowują lub przeszacowują wyznaczone wartości czasu retencji względem wartości rzeczywistych. Modelowanie numeryczne zdaje się być rozwiązaniem lepszym, gwarantującym bardziej wiarygodne wyniki i dającym pełniejszy obraz na zagadnienie zabezpieczenia pomieszczeń SUG-gazowymi.

Opracowany model zabezpieczenia pomieszczeń stałymi urządzeniami gaśniczymi gazowymi wymaga dalszych badań i rozwoju. Możliwość programu ANSYS Fluent pozwala na rozszerzenie modelu o uwzględnienie wpływu zjawisk towarzyszących wypływowi gazu ze zbiorników oraz przepływowi gazu przez pomieszczenie, a także uwzględnienie oddziaływania wewnętrznych źródeł ciepła, zróżnicowanie ciśnień oraz pionowy gradient temperatury w pomieszczeniu. Planowane jest rozwinięcie grupy gazów gaśniczych poddanych badaniom o kolejne gazy normowe oraz mieszanki gazowe o gęstości bliskiej gęstości powietrza. Taki kierunek dalszych prac pozwoli uzyskać wyniki jak najlepiej odwzorowujące rzeczywistość, przy jak najmniejszych nakładach czasu potrzebnych do prowadzenia analizy.

#### 5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

1. Zastosowanie modelowania CFD umożliwia badanie mechanizmu przepływu gazu przez pomieszczenie z większą dokładnością niż dotychczas stosowane modele. Analiza uzyskanych wyników, już przy podstawowych ustawieniach modelu numerycznego, wykazała dużą zgodność z pomiarami laboratoryjnymi. Symulacje komputerowe procesu przepływu gazu mogą być alternatywą dla badań przeprowadzanych na modelach analitycznych.



Ryc. 4. Rozkład stężeń tlenu w przestrzeni chronionej w czasie retencji gazu gaśniczego  
Ar = 8,9% N<sub>2</sub> = 91,1%

Fig. 4. Distribution of oxygen concentration in the protected space during the retention time of extinguishing gas Ar = 8.9% N<sub>2</sub> = 91.1%

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

2. Zastosowanie metod CFD umożliwia optymalizację doboru rodzaju oraz ilości gazu gaśniczego ze względu na czas retencji. Poprawnie opracowany model może zostać użyty do bardziej skomplikowanych i złożonych obliczeń lub do modyfikacji już gotowej i zweryfikowanej instalacji SUG-gazowych.
3. Zastosowanie gazów gaśniczych, składających się z argonu i azotu, dobranych w proporcjach pozwalających uzyskać gęstość mieszaniny zbliżoną do gęstości powietrza, umożliwiło uzyskanie większego czasu retencji niż w przypadku gazu gaśniczego przewidzianego w normach dla tych samych warunków [1], [2-3].
4. Zastosowanie modelowania CFD umożliwia prowadzenie badań przy wykorzystaniu przestrzeni wirtualnej. Eliminuje to niebezpieczne prace pomiarowe, ogranicza zagrożenie dla ludzi oraz redukuje koszty finansowe związane z wyładowaniem gazu.
5. Opracowany model może stać się narzędziem przydatnym dla projektantów w celu prowadzenia badań modelowych i porównawczych, a także szkoleń skierowanych do osób oferujących oraz wykonujących usługi w zakresie projektowania, doboru, montażu, użytkowania i konserwacji stałych urządzeń gaśniczych gazowych.

## Literatura

- [1] ISO 14520 - 1 Gaseous fire-extinguishing systems - Physical properties and system design - Part 1: General requirements.
- [2] NFPA 2001: Standard On Clean Agent Fire Extinguishing Systems, Edition 2012.
- [3] PN EN 15004-1:2008 Stałe urządzenia gaśnicze - Urządzenia gaśnicze gazowe - Część 1: Ogólne wymagania dotyczące projektowania i instalowania.
- [4] Oprogramowanie ANSYS Fluent – informacja na stronie internetowej producenta, [www.fluent.com](http://www.fluent.com) [dostęp: 20.04.2016].
- [5] Kubica P., *Czas retencji gazów gaśniczych w aspekcie bezpieczeństwa pożarowego pomieszczeń*, rozprawa doktorska, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2014.
- [6] Wnęk W., Kubica P., *Distribution of oxygen concentration during fire suppression in closed spaces with inert gases*, "Przemysł Chemiczny" nr 9, 2014.
- [7] Wnęk W., Kubica P., *Analiza rozkładu stężeń tlenu podczas gaszenia pomieszczenia azotem, przy wymuszonych ruchach powietrza*, BiTP Vol. 24 Issue 4, 2011, pp. 65-79.
- [8] Launder B.E., Spalding D.B., *Lectures In Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London 1972.
- [9] Chow T.T., *Development Trends in Building Services Engineering*, University of Hong Kong Press, Hong Kong 2009.

\* \* \*

**mł. bryg. dr inż. Przemysław Kubica** – w roku 2001 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Jest kierownikiem Zakładu Technicznych Systemów Zabezpieczeń w SGSP, członkiem Komitetu Technicznego nr 244 przy PKN, posiada uprawnienia rzeczoznawcy ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych.

**kpt. mgr inż. Sylwia Boroń** – w roku 2013 ukończyła Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Jest asystentem na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Katedrze Bezpieczeństwa Budowli i Rozpoznawania Zagrożeń w SGSP, członkiem komitetu Technicznego nr 264 przy PKN. Specjalność – inżynieria bezpieczeństwa pożarowego.