

MŁ. KPT. MGR INŻ. MICHAŁ PAŹDZIERNIK
Komenda Miejska Państwowej Straży Pożarnej w Katowicach
e-mail: mpazdziernik@strazpozarna.katowice.pl
ORCID: 0000-0002-2107-6739

ST. KPT. DR INŻ. SYLWIA BOROŃ
Szkoła Główna Służby Pożarnej
e-mail: sboron@sgsp.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3886-0060

BRYG. DR INŻ. PRZEMYSŁAW KUBICA
Szkoła Główna Służby Pożarnej
e-mail: pkubica@sgsp.edu.pl
ORCID: 0000-0002-3794-2961

ANALIZA NUMERYCZNA ODCIĄŻANIA POMIESZCZEŃ GASZONYCH GAZEM

ABSTRAKT

Celem pracy jest zaproponowanie modelu dyskretnego wykorzystującego metodę objętości skończonych do wyznaczania oporu przepływu gazu gaśniczego przez przewód wentylacyjny. Wykorzystując opracowany model, wyznaczono przyrost ciśnienia po wyładowaniu w pomieszczeniu odciążanym bezpośrednio na zewnątrz. Zakres pracy stanowi charakterystyka przepływu gazu przez przewody wentylacyjne, wykorzystanie numerycznej mechaniki płynów do stworzenia modelu symulującego wyładowanie i przepływ przez przewody wentylacyjne gazu gaśniczego oraz

przeprowadzenie części badawczej porównującej obliczeniowy charakter przepływu z rzeczywistym. W ramach pracy dowiedziono, że wykorzystując model turbulencji LES, można oszacować średnie ciśnienie w pomieszczeniu podczas wyładowania, z dokładnością wystarczającą na początkowym etapie projektowania.

SŁOWA KLUCZOWE

stałe urządzenia gaśnicze gazowe, przyrost ciśnienia po wyładowaniu, numeryczna mechanika płynów, przepływ przez przewody wentylacyjne, odciążanie pomieszczeń

Przyjęty: 07.07.2021; Zrecenzowany: 23.08.2021; Zatwierdzony: 01.09.2021

NUMERICAL STUDY OF PRESSURE RELIEF IN GAS-EXTINGUISHED ENCLOSURES

ABSTRACT

The aim of the work is to propose a discrete model that uses the Finite Volume Method to determine the resistance of the extinguishing gas flow through a ventilation duct. Using the developed model, the pressure rise after discharge was determined in the room that was relieved directly to the outside. The scope of the work comprises the characteristics of the gas flow through ventilation ducts, the use of Computational Fluid Dynamics to create a model that simulates the discharge and flow of the extinguishing gas through the ventilation ducts along with a comparison of the computational nature of the flow to the real one. The study proved that the use of the LES turbulence model makes it possible to estimate the average pressure in the enclosure during the discharge with an accuracy sufficient at the initial design stage.

KEYWORDS

fixed gas extinguishing devices, pressure rise after discharge, computational fluid dynamics, flow through ventilation ducts, pressure relief of enclosures

Received: 07.07.2021; Reviewed: 23.08.2021; Accepted: 01.09.2021

WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ

- \dot{m}_{gas} strumień masowy gazu gaśniczego, $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$;
 $|S|$ tensor odkształceń;
 Δ rozpiętość komórki obliczeniowej, m;
 Δh_{str} wysokość strat ciśnienia, m;
 A powierzchnia otworu, m^2 ;
 C_2 współczynnik obliczeniowy, wyznaczany na podstawie oporów zależnych od geometrii otworu;
 C_s stała Smagorinskiego;
 k energia kinetyczna turbulencji, $\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$;
 r promień, m;
 t czas, s;
 v_{gas} objętość właściwa gazu gaśniczego, $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$;
 v_{HOM} objętość właściwa mieszaniny gazu z powietrzem, $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$;
 x położenie na osi X, m;
 Δp dopuszczalny przyrost ciśnienia w pomieszczeniu, Pa;
 ε dysypacja energii kinetycznej turbulencji, $\frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$;
 μ_t lepkość dynamiczna turbulencji, $\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$;
 ξ współczynnik strat miejscowych (lokalnych);
 ρ gęstość, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

1. WPROWADZENIE

Zabezpieczanie pomieszczeń gazem gaśniczym niesie za sobą wiele korzyści, z których najważniejszą jest brak strat spowodowanych procesem gaszenia. Projektant stałego urządzenia gaśniczego gazowego powinien umiejętnie dobrać parametry projektowe gazu oraz przewidzieć sposób jego przepływu przez elementy instalacji i rozprzestrzeniania się w pomieszczeniu chronionym wraz ze zjawiskami towarzyszącymi. Stosowanie stałych urządzeń gaśniczych gazowych niesie za sobą również zagrożenia, między innymi w postaci wystąpienia przyrostu ciśnienia wewnątrz pomieszczenia podczas wyładowania gazu gaśniczego [1].

Projektowanie stałych urządzeń gaśniczych gazowych odbywa się w oparciu o dostępne na rynku normy i standardy techniczne, zwane zasadami wiedzy technicznej. Zgodnie z Polską Normą PN EN 15004-1 przegrody

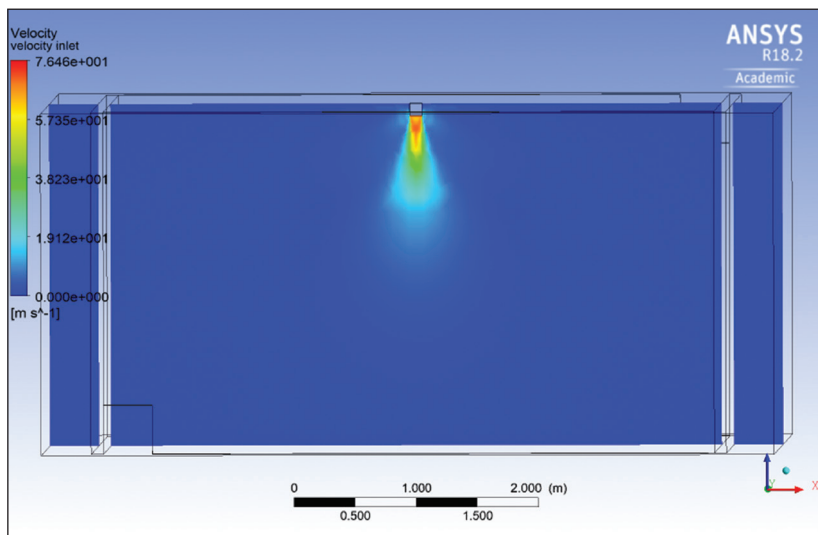
budowlane w pomieszczeniu chronionym powinny mieć wystarczającą wytrzymałość mechaniczną na parcie wyładowanego gazu gaśniczego. Ponadto, należy zapewnić odciążenie zapobiegające nadmiernemu nad- lub podciśnieniu wewnątrz pomieszczenia [2]. Standard NFPA 2001 również odnosi się do zjawiska przyrostu ciśnienia w pomieszczeniu chronionym. Wśród 28 zagadnień, które powinny zostać zawarte w projekcie urządzenia, wskazano oszacowanie maksymalnego przyrostu ciśnienia ponad ciśnienie atmosferyczne, spodziewanego podczas wyładowania, jak również dobór otworów odciążających lub sumarycznej powierzchni nieuszczelnności, które zapobiegą przyrostowi ciśnienia powyżej wartości granicznej dla rozpatrywanego pomieszczenia chronionego. W dalszej części dokumentu podkreślono, że powierzchnia stale otwartych otworów w pomieszczeniu chronionym powinna być ograniczona do minimum, a same otwory powinny być automatycznie zamykane, aby zapobiec niekontrolowanemu wypływowi gazu gaśniczego z pomieszczenia. Wymaganie to powinno być stosowane łącznie z zapisami o wytrzymałości mechanicznej przegród budowlanych w pomieszczeniu chronionym. Przegrody te powinny spełniać wymagania w zakresie odporności mechanicznej na parcie wytworzone podczas wyładowania gazu gaśniczego, natomiast jeśli spodziewany przyrost ciśnienia stanowi zagrożenie dla utrzymania stateczności i nośności konstrukcji pomieszczenia, należy przewidzieć odpowiednie otwory odciążające [3]. Wymagana powierzchnia otworu odciążającego ciśnienie w pomieszczeniu została określona w wytycznych niemieckiej instytucji VdS za pomocą zależności arytmetycznej opisanej równaniem (1) [4, 5]. W pierwszej dodatniej potęgze wyrażenia zawarto iloczyn strumienia masowego gazu wpływającego do pomieszczenia \dot{m}_{gas} oraz objętości właściwej gazu v_{gas} . Zatem wymagana powierzchnia odciążenia A , a więc również pośrednio spodziewany przyrost ciśnienia Δp , zależy od wpływającej objętości gazu do pomieszczenia w jednostce czasu – strumienia objętościowego gazu.

$$A = \frac{\dot{m}_{gas} * v_{gas}}{\sqrt{\Delta p} * v_{HOM}} * C_2 [m^2] \quad (1)$$

Powyższa zależność może zostać wykorzystana jedynie do obliczania powierzchni odciążenia dla otworów prowadzących bezpośrednio na zewnątrz [4]. Zakłada się wówczas, że gaz wypływa do przekroju, w którym panuje ciśnienie atmosferyczne i może się on swobodnie rozprężyć. Równa-

nie (1) nie pozwala więc na określenie powierzchni w przypadku odciążania pomieszczenia w sposób inny niż bezpośrednio na zewnątrz. Obecnie wiele pomieszczeń w nowoczesnym budownictwie, wymagających zabezpieczenia SUG-gazowymi, sytuowanych jest z dala od ścian zewnętrznych budynku. Nie zachodzi zatem techniczna możliwość odciążania ich bezpośrednio na zewnątrz. Dlatego też praktyką staje się prowadzenie odciążenia przez przewody wentylacyjne. Najczęściej do tego celu wykorzystywane są przewody wyciągowe instalacji wentylacji bytowej [6]. Zasady wiedzy technicznej nie przedstawiają sposobu obliczania powierzchni odciążenia w przypadku jego prowadzenia w sposób inny niż bezpośrednio na zewnątrz, zatem należy wykorzystać inne metody naukowe. W celu prawidłowego ich doboru konieczna jest znajomość charakteru wypływu gazu gaśniczego do pomieszczenia chronionego, a także przepływu gazu gaśniczego przez przewody wentylacyjne.

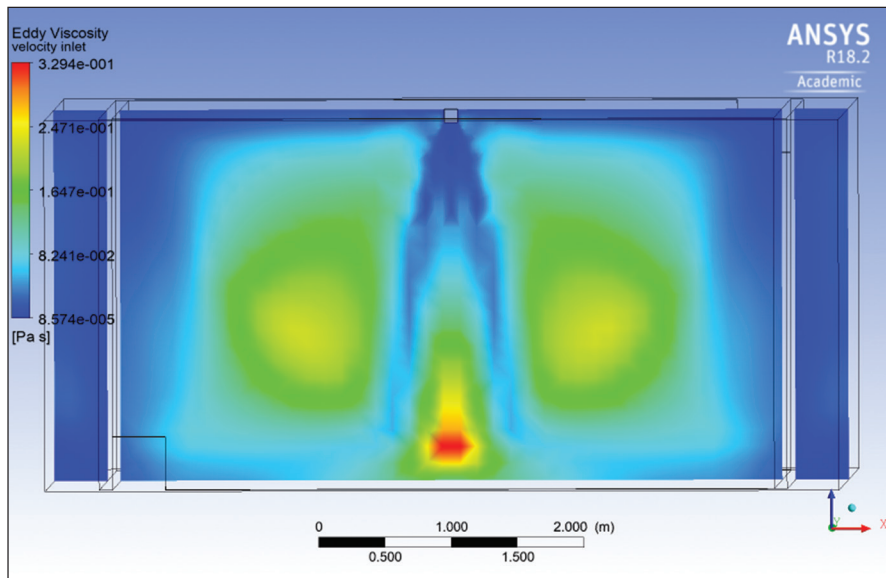
W ramach badań numerycznych stwierdzono, że wypływ gazu gaśniczego przez dyszę do pomieszczenia chronionego nosi znamiona strugi swobodnej [7]. W przekroju poprzecznym po 1 sekundzie od rozpoczęcia wyładowania zauważalne jest wytworzenie strefy rdzenia potencjalnego, strefy przejściowej oraz, na końcu zauważalnego obszaru strugi, strefy przepływu uporządkowanego (rys. 1).



Rys. 1. Rozkład prędkości w przekroju poprzecznym po 1 sekundzie od rozpoczęcia wyładowania

Źródło: [7]

Na początku wyładowania powietrze zgromadzone w pomieszczeniu pozostaje w spoczynku. Założenie to wynika z warunków późniejszego porównania badań numerycznych z próbami doświadczalnymi, natomiast w rzeczywistych warunkach pożarowych nie można wykluczyć ruchu powietrza spowodowanego zjawiskiem unoszenia, co pozostanie przedmiotem odrębnych badań. Czynnikiem zaburzającym równowagę jest struga swobodna, która z początku tworzy się tylko w bliskim sąsiedztwie dyszy. Sytuacja ta szybko ulega zmianie, gdyż już po 5 sekundach od rozpoczęcia wyładowania trwa intensywne mieszanie w całej objętości mieszaniny gazowej (rys. 2). Rozpatrywana wielkość nie stanowi określenia samego płynu, lecz określa charakter przepływu. Jej wysoka wartość wskazuje na intensywne mieszanie cząstek płynu oraz występujące turbulencje przepływu. Wyraźnie widoczne jest zachodzące silne mieszanie elementów płynu przyległych do domyślnie wykreślonej tworzącej stożka strugi swobodnej oraz w pobliżu jego podstawy.



Rys. 2. Rozkład lepkości kinematycznej w przekroju poprzecznym po 5 sekundach od rozpoczęcia wyładowania

Źródło: [7]

Wpływ gazu gaśniczego z pomieszczenia przez przewody wentylacyjne odbywa się z wysoką wydajnością przy stosunkowo niskich jak na mechanikę

gazów, wartościach ciśnienia, przede wszystkim w celu ograniczenia zapotrzebowania energetycznego na wytworzenie ruchu powietrza. Na potrzeby systemów HVAC (ang. *Heating, Ventilation, Air Conditioning*) stosowane są powszechnie przewody o prostokątnym przekroju poprzecznym, które najefektywniej wypełniają przestrzeń podstropową. Wobec niezaprzeczalnych zalet posiadają one także wady odnoszące się do mechaniki płynów, jak na przykład nieefektywny aerodynamicznie przepływ w narożnikach przekroju poprzecznego oraz znaczna powierzchnia ścian bocznych powodująca spowolnienie przepływu przy ścianach ze względu na tarcie [8].

Dotychczas przeprowadzono prace badawcze, których celem było opisanie przepływu gazu przez przewody wentylacyjne. Peszyński i Tesar podjęli się opracowania algebraicznego modelu przepływu przez prostokątne kanały wentylacyjne o dużym promieniu zaokrąglenia narożników, w oparciu o potęgowe prawo Prandtla [8]. Z kolei Rudolf i Desova dokonali charakterystyki przepływu w kanałach zakrzywionych, modelując turbulencje w warstwie przyściennej przy użyciu jednowymiarowego modelu Wolfshteina, a w pozostałych warstwach przy użyciu modelu $k - \varepsilon$ dodatkowo uzupełnionego o zależność Prandtla-Kolmogorova [9]. Poszukiwane są również alternatywne sposoby wykonania przewodów wentylacyjnych, Gładyszewska-Fiedoruk i inni zbadali charakterystykę przepływu przez przewody wykonane z polichlorku winylu lub innych tworzyw sztucznych [10].

Opisany w artykule autorski model numeryczny [11], utworzony na potrzeby pracy dyplomowej magisterskiej jednego z autorów, posłużył do wykonania analizy porównawczej w zakresie przyrostu ciśnienia po wyładowaniu gazu gaśniczego w pomieszczeniu odciążanym bezpośrednio na zewnątrz, obliczonego za pomocą symulacji numerycznej oraz zmierzonego podczas badań doświadczalnych [12].

2. ZAŁOŻENIA DO BUDOWY MODELU NUMERYCZNEGO

Na potrzeby budowy modelu numerycznego wykorzystano program PyroSim 2020, który stanowi graficzny interfejs użytkownika dla środowiska Fire Dynamics Simulator, wersja 6. Obliczenia prowadzono na typowym komputerze przenośnym o przeciętnych parametrach sprzętowych (tab. 1).

Tab. 1. Wybrane parametry komputera wykorzystanego do prowadzenia obliczeń

Parametr	Wartość
Model	ASUS VivoBook S14 S432FA-EB008T
Procesor	Intel Core i5-8265U (4 rdzenie, 8 wątków, 1,60–3,90 GHz, 6 MB cache)
Pamięć RAM	8 GB (SO-DIMM DDR3, 2133 MHz)
Dysk	512 GB SSD M.2 PCIe
System operacyjny	Windows 10 Home

Źródło: opracowanie własne

Przedmiot badań stanowiła komora pomiarowa znajdująca się w Pracowni Technicznych Systemów Zabezpieczeń w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Jest to pomieszczenie zamknięte w kształcie prostopadłościanu o wymiarach podstawy 5 m na 5 m oraz wysokości 2,8 m. Przegrody budowlane zaimplementowano jako powierzchnie obojętne (ang. *inert*), dla których nie występuje przenikanie ciepła z otoczenia. Wypływ gazu z komory pomiarowej na potrzeby analizy numerycznej odbywał się krótkim przewodem o długości 1,45 m, traktowanym jako porównywalny z odciążeniem bezpośrednio na zewnątrz budynku. Rozpatrywany przewód posiada przekrój poprzeczny kwadratu o boku 0,2 m i powierzchni 0,04 m². Dla porównania wymagana powierzchnia odciążająca ciśnienie w tym pomieszczeniu, określona zgodnie z wytycznymi VdS w równaniu (2), wynosi 0,078 m², czyli prawie dwukrotnie więcej niż powierzchnia przyjęta na potrzeby badań numerycznych.

$$A = \frac{\dot{m}_{\text{gas}} * v_{\text{gas}}}{\sqrt{\Delta p} * v_{\text{HOM}}} * C_2 = \frac{1,115 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 0,696 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{\sqrt{100 \text{ Pa}} * 0,755 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} * 0,87 = 0,078 \text{ m}^2 \quad (2)$$

Dyskretyzację tak zbudowanej geometrii wykonano metodą objętości skończonych. Powstała siatka została utworzona z tetragonalnych komórek obliczeniowych o równych rozmiarach. Nie dokonywano zagęszczenia siatki w pobliżu obszarów o spodziewanej najwyższej burzliwości przepływu ze względu na ograniczenia możliwości obliczeniowych programu FDS, jak również samego komputera. Siatka obliczeniowa została utworzona

z 81 120 elementów (tab. 2). W ramach niniejszych badań numerycznych nie przeprowadzono testów niezależności siatki, a rozmiar komórki przyjęto na podstawie doświadczeń z uprzednio prowadzonych symulacji numerycznych.

Tab. 2. Parametry siatki obliczeniowej

Parametr	Wartość
Wymiar wzdłuż osi X [m]	5,2
Wymiar wzdłuż osi Y [m]	5,2
Wymiar wzdłuż osi Z [m]	3
Objętość całkowita [m ³]	81,12
Liczba elementów [-]	81 120
Układ	tetragonalny
Rozmiar komórki (X\Y\Z) [m]	0,1 \ 0,1 \ 0,1

Źródło: opracowanie własne

Zakresem siatki objęto wyłącznie komorę pomiarową wraz z ograniczającymi ją przegrodami budowlanymi. Natomiast prowadzenie odciażenia zaimplementowano jako elementy systemu HVAC (tab. 3) w postaci węzłów (ang. *node*) i kanałów (ang. *duct*). Zabieg ten miał na celu jak najwierniejsze odwzorowanie przepływu przez przewody wentylacyjne, uwzględniając szczegółowe obliczenia hydrauliczne [13].

Tab. 3. Parametry systemu HVAC przyjęte do symulacji

Parametr	Krótki przewód
Sumaryczna długość przewodu [m]	1,5
Różnica wysokości nad poziomem odniesienia [m]	0
Powierzchnia przekroju poprzecznego [m ²]	0,04
Obwód [m]	0,8
Chropowatość [-]	Hydraulicznie gładkie
Współczynnik strat lokalnych [-]	-
Urządzenie przepływowe	Przepustnica otwarta (ang. <i>dampner</i>)

Źródło: opracowanie własne

W celu zachowania kontroli nad dyskretyzacją tak opracowanego modelu zmodyfikowano wymiary w zakresie lokalizacji krótkiego kanału odciążającego, dopasowując jego położenie do granic pełnej komórki obliczeniowej. Zatem krótki kanał w modelu numerycznym został zlokalizowany na wysokości 2 m i w odległości 1,6 m od tylnej ściany komory, natomiast w stanie rzeczywistym odległości te wynoszą odpowiednio: 1,95 m oraz 1,62 m.

Dane wejściowe do symulacji przyjęto na podstawie prowadzonych obserwacji rzeczywistego wyładowania gazu gaśniczego (tab. 4).

Tab. 4. Parametry symulacji

Parametr	Wartość
Czas symulacji [s]	60
Początkowy krok czasowy [s]	0,5
Temperatura otoczenia [°C]	17,82
Model turbulencji	Large-Eddy (LES)
Stała Smagorinskiego [-]	0,1
Właściwości gazu gaśniczego IG-55	Przyjęto z biblioteki FDS dla 50% mieszaniny azotu i argonu
Powierzchnia otworu wylotowego dyszy gazowej [m ²]	0,01
Gęstość strumienia masowego gazu [kg/(m ² s)]	55,75 Ar i 55,75 N ₂
Sumaryczne masowe natężenie wypływu [kg/s]	1,115
Profil wypływu	Paraboliczny

Źródło: opracowanie własne

Rozwiązanie przepływu w środowisku FDS opiera się na równaniach Naviera-Stokesa dla przepływów o niewielkiej prędkości ($Ma < 0,3$). Równania te zostały wyprowadzone w oparciu o zasadę zachowania pędu oraz uzupełnione o równanie ciągłości przepływu, zasadę zachowania masy i za-

sadę zachowania energii. W celu domknięcia równań różniczkowych cząstkowych Naviera-Stokesa dla przepływu, w którym występują turbulencje, tworzy się dodatkowe równania niezależne od układu, które umożliwiają jego algebraiczne rozwiązanie. W rozpatrywanym modelu numerycznym wykorzystano metodę LES (*ang. Large Eddy Simulation*). W modelu LES różnicuje się poszczególne turbulencje przepływu na wiry o rozmiarach większych i mniejszych od pojedynczej komórki obliczeniowej [14] z wykorzystaniem filtrowania obszarów gęstości zgodnie z równaniem (4).

$$\bar{\rho}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\Delta} \int_{\mathbf{x}-\Delta/2}^{\mathbf{x}+\Delta/2} \rho(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (4)$$

Małe wiry są opisywane przy użyciu dodatkowych członów naprężeń i modelowane przy pomocy modeli podsiatkowych SGS (*ang. sub-grid-scale*), a wiry duże są rozwiązywane w sposób bezpośredni. Stała Smagorinskiego wymieniona w tabeli 4 jest związana z modelem Smagorinskiego, który stanowi podsiatkowy model turbulencji SGS wykorzystywany w programie FDS. Zadaniem modelu podsiatkowego jest modelowanie małych wirów oraz opisanie ich interakcji z dużymi wirami, rozwiązywanymi w sposób bezpośredni. W rozpatrywanej symulacji przyjęto model ze stałym współczynnikiem Smagorinskiego. Lepkość turbulentna opisana przy pomocy modelu wyrażona jest równaniem (5).

$$\mu_t = \rho(C_s \Delta)^2 |S| \quad (5)$$

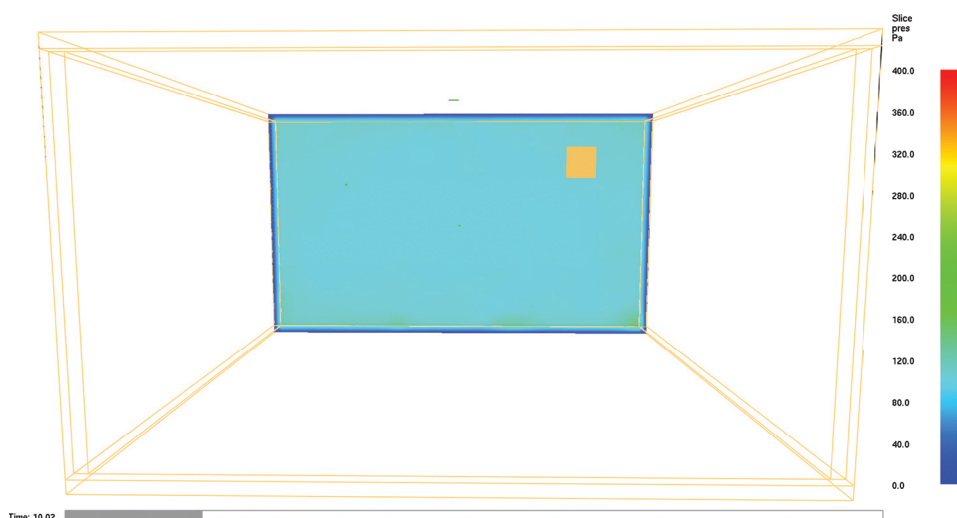
Średnia wartość stałej Smagorinskiego wynosi 0,18 i taka również została przyjęta domyślnie w programie FDS (dokładnie 0,20). Natomiast próby doświadczalne i publikacje wskazują, iż zasadnym jest przyjmować jej wartość jako 0,1, gdyż wartość średnia okazuje się za wysoka w przypadku przepływów w całej domenie obliczeniowej i reprezentuje model zbyt dyssypatywny [15, 16].

3. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH

Wyniki prowadzonych obliczeń zapisano w postaci płaszczyzn wynikowych (*ang. slice*) oraz danych liczbowych. Płaszczyzny wynikowe były zapisywane przez cały czas trwania symulacji średnio co około 4 ms, natomiast dane

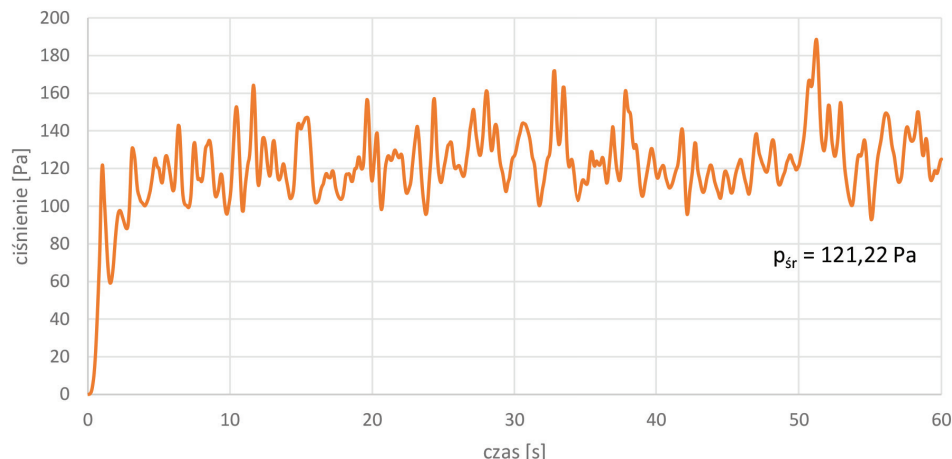
liczbowe były rejestrowane co 60 ms. Ze względu na mnogość możliwych do eksportowania powierzchni wyników w funkcji czasu zdecydowano się przedstawić wyniki w dwóch charakterystycznych etapach symulacji. Pierwszy etap, zarejestrowany po 0,5 s od uruchomienia wyładowania gazu gaśniczego, przedstawia burzliwy przebieg początku procesu wyładowania. Natomiast drugi etap, wyznaczony po 10 s od rozpoczęcia wyładowania, reprezentuje stan chwiejnej stabilizacji parametrów przepływu wewnątrz rozpatrywanej komory pomiarowej. Nadal występują fluktuacje parametrów przepływu, czego nie sposób przedstawić na statycznym rysunku, lecz ich średnia wartość pozostaje stała, co jest widoczne na wykresach przedstawiających uzyskane dane liczbowe.

Wyznaczono wartości ciśnienia wywieranego przez mieszaninę gazu gaśniczego z powietrzem na ścianę pomieszczenia zlokalizowaną przeciwległe do otworu odciążającego (rys. 3). Parametr ten opisuje wzrost wartości ciśnienia względem otoczenia spowodowany wpływem gazy gaśniczego i nie stanowi wartości bezwzględnej ciśnienia całkowitego wywieranego na tę ścianę. Formalnie więc wielkość ta jest nadciśnieniem, lecz ze względu na operowanie wyłącznie na wartościach względnych ciśnienia utrzymano w niniejszym artykule nazewnictwo parametru *pressure* wprost przejęte z programu FDS. Ciśnienie było wywierane równomiernie na całą powierzchnię ściany.



Rys. 3. Ciśnienie wywierane na ścianę po 10 s – odciążenie przez krótki przewód
Źródło: opracowanie własne

Maksymalna wartość średniego ciśnienia uzyskiwanego przy odciążeniu przez krótki przewód wyniosła 188,53 Pa i była tylko o 67,31 Pa wyższa od wartości średniej podczas całego okresu wyładowania gazu gaśniczego (rys. 4.)



Rys. 4. Wykres średniej wartości ciśnienia wywieranego na ścianę przeciwną w funkcji czasu przy odciążeniu przez krótki przewód

Źródło: opracowanie własne

4. DYSKUSJA WYNIKÓW

4.1. Wprowadzenie do dyskusji wyników

Kluczowym parametrem opisującym możliwy przyrost ciśnienia podczas gaszenia gazem w pomieszczeniu chronionym jest wartość ciśnienia oddziałującego na ściany pomieszczenia. Pomimo obowiązującego prawa Pascala to ciśnienie było nieco wyższe niż średnia wartość ciśnienia wewnątrz pomieszczenia ze względu na tworzenie się lokalnych powierzchni spiętrzenia w bezpośrednim otoczeniu przegród budowlanych, spowodowanych zamianą znacznej części energii kinetycznej płynu na energię potencjalną ciśnienia. Prezentacja wyników w formie wartości średniej na całej powierzchni ściany pozwoliła na odniesienie wartości ciśnienia do ewentualnych skutków oddziaływania takiej siły powierzchniowej, nie rozpatrując lokalnie występujących ekstremów. Zgodnie z wynikami symulacji (rys. 4) wartość średnia

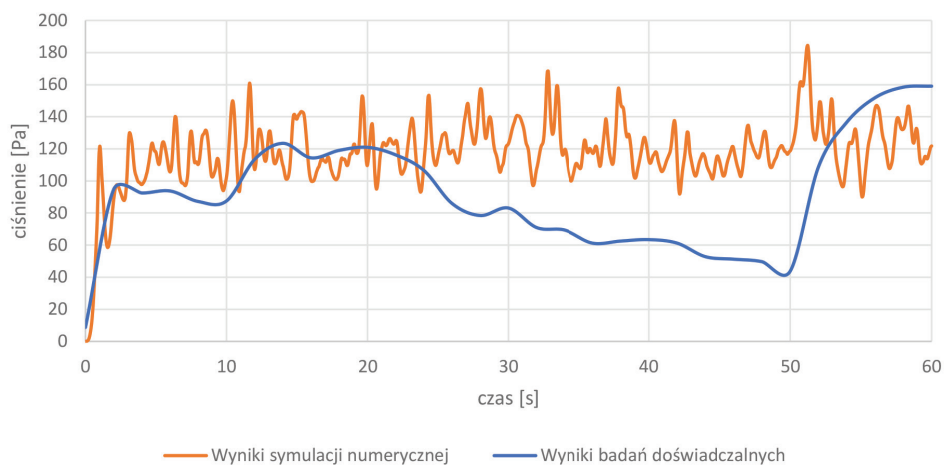
ciśnienia oddziałującego na ścianę po wstępnym ustabilizowaniu przepływu wynosiła 121,22 Pa.

4.2. Odniesienie symulacji numerycznej do stanu rzeczywistego

Porównanie wyników symulacji numerycznej dla krótkiego przewodu z próbami doświadczalnymi, w których założenia odpowiadają modelowi numerycznemu, pozwoliło na zweryfikowanie uzyskanych wyników symulacji ze stanem rzeczywistym. Należy podkreślić, iż takie jednostkowe porównanie nie stanowi pełnej walidacji modelu numerycznego. Zatem konstatacje dotyczące tego porównania znajdują uzasadnienie jedynie dla rozpatrywanego przypadku i bez przeprowadzenia walidacji nie mogą być przeniesione na inne przypadki.

Zestawiono ze sobą przebieg wartości ciśnienia uzyskanego w wyniku symulacji numerycznej oraz próby doświadczalnej [12] (rys. 5). W celu obliczenia wartości ciśnienia wewnątrz komory wyznaczono dodatkowy punkt pomiarowy w symulacji numerycznej rejestrujący zmiany w dokładnie jednej komórce obliczeniowej, której krawędzie były oddalone o 1,1 m od obydwu ścian bocznych i o 1,9 m od poziomu podłogi. Różny pozostał jedynie krok czasowy w rejestracji pomiarów, wynoszący 0,06 s dla symulacji numerycznej oraz 2 s dla próby doświadczalnej. Taka różnica w kroku czasowym znacznie wpłynęła na kształt przebiegu funkcji zmian ciśnienia. Wykres wyników badań doświadczalnych przebiegł bez tak dynamicznych zmian, jak ma to miejsce w przypadku wyników symulacji numerycznej. Nie sposób więc porównać charakteru zmian ciśnienia w obu przypadkach, gdyż w pierwszym przypadku zarejestrowano wartości chwilowe w bardzo krótkim odstępie czasowym, natomiast w drugim przypadku zarejestrowano wartości praktycznie uśrednione w przedziale 2 s. Należy także wspomnieć o niepewności pomiaru empirycznego, który również był obciążony błędem, chociażby samego przetwornika ciśnienia.

Niemniej jednak możliwe jest porównanie wartości średnich i maksymalnych ciśnienia, uzyskiwanych w trakcie całego procesu wyładowania. W celu przeprowadzenia powyższego zestawienia zaniehdano przedział argumentów $\langle 0 ; 2 \text{ s} \rangle$ ze względu na występowanie w nim nagłego wzrostu i obliczono średnią wartość w przedziale $\langle 2 ; 60 \text{ s} \rangle$. Uzyskane wyniki pomiarów ciśnienia przedstawiono w tabeli 5.



Rys. 5. Wykres średniej wartości ciśnienia wewnątrz pomieszczenia w funkcji czasu
 Źródło: opracowanie własne

Tab. 5. Porównanie wartości ciśnienia w trakcie symulacji i badań doświadczalnych

	Symulacja numeryczna [Pa]	Badania doświadczalne [Pa]	Błąd bezwzględny [Pa]	Błąd względny [%]
Wartość średnia	120,24	93,91	26,33	28,04
Wartość maksymalna	184,42	159,06	25,36	15,94

Źródło: opracowanie własne

Wartość błędu bezwzględnego wynosiła 26,33 Pa, co nie jest zbyt wysoką wartością ciśnienia, rozważając ewentualne skutki oddziaływania na konstrukcje budowlane. Błąd względny wynosił 28,04% i jest stosunkowo duży, niemniej jednak należy pamiętać, że otrzymane w obu przypadkach wartości były niewielkie. Dokładność symulacji numerycznej zdaje się być wystarczająca do szacowania przyrostu ciśnienia w trakcie wyładowania. Należy przy tym podkreślić, że z uwagi na bezpieczeństwo istotne jest ciśnienie maksymalne, które zostało wyznaczone z dokładnością błędu względnego na poziomie 15,94%.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone analizy teoretyczne i próby badawcze pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) Przeprowadzenie analiz numerycznych za pomocą oprogramowania PyroSim 2020, z wykorzystaniem modelu turbulencji LES, pozwala oszacować średnie i maksymalne wartości ciśnienia występujące w pomieszczeniu chronionym podczas gaszenia gazem. Zaletą przedstawionego sposobu przeprowadzenia obliczeń jest względnie krótki czas oczekiwania na wynik (modelowanie 60-sekundowego przepływu gazu gaśniczego, przy przyjętych założeniach modelu numerycznego, trwało około 6 godzin) oraz możliwość ich wykonania na powszechnie dostępnym sprzęcie komputerowym.
- 2) Dokładność uzyskanych wyników (błąd względny wyniósł około 28% dla wartości średniej i 16% dla wartości maksymalnej) nie pozwala na szczegółową analizę przebiegu procesu wyładowania gazu gaśniczego. W celu zwiększenia dokładności prowadzonych obliczeń należy skorzystać z innych metod obliczeniowych. Należy jednak podkreślić, że analiza numeryczna przewymiarowała wartość nadciśnienia w stosunku do danych eksperymentalnych, co umożliwia wnioskowanie po bezpiecznej stronie. Ponadto sam pomiar empiryczny również był obciążony pewnym błędem.
- 3) W obliczeniach wypływu gazu z pomieszczenia chronionego należy uwzględnić ściśliwość strumienia gazu. Prosty model matematyczny, opracowany w ramach pracy dyplomowej magisterskiej [11] i zakładający nieściśliwość gazu w rozpatrywanych warunkach przepływu, nie pozwala na otrzymanie wiarygodnych wyników.

Kierunkiem dalszych badań prowadzonych w powyższym zakresie może być porównanie modeli LES oraz DNS w ramach programu FDS i wybór optymalnego rozwiązania pod względem dokładności i czasu obliczeń, a także opracowanie modelu matematycznego uwzględniającego ściśliwość gazu i pozwalającego na otrzymanie szacunkowych wyników. Istotnym elementem będzie również uzupełnienie modelu numerycznego o pierwotne źródło ciepła, w postaci pracującego urządzenia o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia, a także dodanie zjawisk termicznych związanych z pożarem. W miarę możliwości technicznych przetworników ciśnienia warto

również zapewnić synchronizację czasową pomiarów doświadczalnych oraz wyników symulacji w celu porównania dynamiki zmian parametrów. Wówczas możliwe będzie przeprowadzenie dyskusji dotyczącej błędów w różnych chwilach czasowych.

Wnioski płynące z niniejszych badań mogą wykorzystać projektanci stałych urządzeń gaśniczych gazowych na początkowym etapie projektowania urządzeń w celu porównania dostępnych sposobów prowadzenia odciążenia oraz wyboru rozwiązania pozwalającego na uzyskanie możliwie najniższego przyrostu ciśnienia.

REFERENCES/ BIBLIOGRAFIA

1. Tuzimek Z., Kubica P., *Zagrożenia związane ze stosowaniem stałych urządzeń gaśniczych gazowych*, „Przegląd Pożarniczy” 2003, 8, s. 15–17.
2. PN-EN 15004-1:2019-06. *PN-EN 15004-1 – Stałe urządzenia gaśnicze – Urządzenia gaśnicze gazowe – Część 1: Projektowanie, montaż i konserwacja*. 2019.
3. NFPA 2001. *NFPA 2001: Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems*. NFPA. An International Codes and Standards Organization, 2012.
4. VdS 2380. *VdS 2380:2016-06 VdS-Richtlinien für Feuerlöschanlagen – Feuerlöschanlagen mit nicht verflüssigten Inertgasen – Planung und Einbau*. VdS Guidelines for Fire Extinguishing Systems – Fire Extinguishing Systems Using Non-liquefied Inert Gases – Planning and Installation. VdS, 2016.
5. VdS 2381. *VdS 2380:2016-06 VdS-Richtlinien für Feuerlöschanlagen – Feuerlöschanlagen mit halogenierten Kohlenwasserstoffen – Planung und Einbau*. 2016.
6. Kubica P., Krupa R., *Odciążenie w pomieszczeniach chronionych SUG gazowymi*, „Ochrona Przeciwpożarowa” 2011, 3, s. 21–25.
7. Październik M., Praca dyplomowa inżynierska: *Problematyka wyznaczania masy gazu gaśniczego dla stałych urządzeń gaśniczych*, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2019.
8. Peszynski K., Tesar V., *Algebraic model of turbulent flow in ducts of rectangular cross-section with rounded corners*, “Flow Measurement and Instrumentation” 2020, 75.
9. Rudolf P., Desova M., *Flow Characteristics of Curved Ducts*. 1, “Applied and Computational Mechanics” 2007, 1, s. 255–264.

10. Gladyszewska-Fiedoruk K., Demaniuk A.B., Gajewski A., Olow A., *Measurement of velocity distribution for air flow through perforated plastic foil ducts*, 43, "Energy and Buildings" 2011, 43, s. 374–378.
11. Październik M., Praca dyplomowa magisterska: *Analiza numeryczna odciążania pomieszczeń gaszonych gazem*, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2021.
12. Boroń S., Rozprawa doktorska: *Modelowanie zabezpieczenia przeciwpożarowego pomieszczeń budowlanych gazami gaśniczymi*, promotor: prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2019.
13. Nocola W., *FDS 6 – Nowe funkcje i możliwości: Modelowanie instalacji HVAC – część 2 – zagadnienia hydrauliczne*, Stigo sp. z o. o., Kraków 2014.
14. Chybowski R., Konecki M., Tuśnio N., *Wykorzystanie programu komputerowego FDS do modelowania pożaru w tunelu kablowym*, Zeszyty Naukowe SGSP 2009, nr 39, s. 61–79.
15. Górecki B., Kubacki S., *Materiały dydaktyczne. Large Eddy Simulation – modele podsiatkowe*, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska 2013.
16. Tekielak-Skałka I., Burdzy T., Wiche J., *Metoda weryfikacji poprawności pracy wentylacji strumieniowej*, „Chłodnictwo & Klimatyzacja” 2013, 6, s. 83–86.

MICHAŁ PAŹDZIERNIK – w 2021 r. ukończył studia na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności Szkoły Głównej Służby Pożarniczej. Obecnie pełni służbę w Wydziale Kontrolno-Rozpoznawczym Komendy Miejskiej PSP w Katowicach.

MICHAŁ PAŹDZIERNIK – graduated from the Faculty of Security Engineering and Civil Protection at the Main School of Fire Service in 2021. He is currently on duty at the Control and Reconnaissance Department of the City HQ of the SFS in Katowice.

SYLWIA BOROŃ – w 2013 r. ukończyła Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Jest prodziekanem Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności, kierownikiem kierunku studiów inżynieria bezpieczeństwa, członkiem Komitetu Technicznego nr 264 przy PKN. Specjalność – inżynieria bezpieczeństwa pożarowego.

SYLWIA BOROŃ – graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in 2013. She is Vice Dean of the Faculty of Safety Engineering and Civil Protection, Head of the Safety Engineering course, member of Technical Committee No 264 at PKN. Specialty – fire safety engineering.

PRZEMYSŁAW KUBICA – w 2001 r. 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.

PRZEMYSŁAW KUBICA – graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service in 2001. He is the Head of the Technical Protection Systems Department at the Main School of Fire Service, a member of the Technical Committee No. 244 at the PKN (Polish Committee for Standardization), and also works as a certified fire protection expert.