

st. kpt. dr inż. **Norbert TUŚNIO**¹

Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Katedra Podstaw Rozwoju i Gaszenia Pożarów, Zakład
Badania Przyczyn Pożarów

st. kpt. mgr inż. **Damian SALETA**²

Jednostka Ratowniczo-Gaśnicza Państwowej Straży Pożarnej w Bytomiu

MODELOWANIE ROZWOJU POŻARU W MIESZKANIACH PRZY UŻYCIU PROGRAMU CFAST

Fire spread modeling in flats using CFAST

Streszczenie

W artykule przedstawiono wykorzystanie programu CFAST do modelowania rozwoju pożaru mieszkania, który miał miejsce 9 czerwca 2010 roku w Bytomiu. Konsekwencją szybkiego rozwoju pożaru były tragiczne skutki tego zdarzenia. Uzyskane wyniki są w znacznym stopniu zbieżne z faktycznym przebiegiem pożaru. Przedstawiony tok obliczeń jest przydatny w trakcie modelowania przebiegu pożarów w pomieszczeniach mieszkalnych. W przeprowadzonych badaniach odnotowano dobrą zgodność obliczonego położenia warstwy gorącej ze stanem faktycznym zarejestrowanym na zdjęciu kamienicy w czasie pożaru. Obliczenia wykazały obniżenie się warstwy gorącej w pokoju do poziomu 2,18 m, natomiast zdjęcie obrazuje wydobywanie się dymu na wysokości górnej części okna. Dostępne materiały fotograficzne przebiegu pożaru i śladów popożarowych (okopcenia, stopienia i nadpalenia materiałów wyposażeniowych i wykończeniowych) stanowią dobrą bazę do weryfikacji założonego scenariusza pożaru i wprowadzonych danych wejściowych. Nie osiągnięto zgodności obliczonego stężenia tlenu węgla w pokoju ze stwierdzoną przyczyną zgonu znajdującego się w tym pomieszczeniu lokatora. Użyty model pożaru nie został zaprojektowany z przeznaczeniem do badania pożarów z początkową fazą w postaci spalania bezpłomieniowego tak, jak miało miejsce w przypadku przedmiotowego pożaru.

Summary

The paper presents the application of CFAST to model the apartment fire spread that occurred on 9th June , 2010 in Bytom. The consequences of the rapid growth of fire were tragic. The results obtained are largely consistent with the real fire spread. The presented calculation procedure is useful in dwelling fire modeling. Good agreement of the calculated position of the hot layer with the field observations is achieved. Calculations have shown the hot layer decreasing in the room to the level of 2.18 m, while the picture of the building during fire shows the extraction of smoke at the top of the upper window. Available photographic materials and traces of fire spread (fume stains, melt of dwelling equipment) are a good basis for the verification of the assumed fire

¹ wkład merytoryczny 50%

² Wkład merytoryczny 50%

scenario and assumed input data. There has been no compliance of the calculated concentrations of carbon monoxide with a known cause of death occupant found in the room. The reason is that applied fire model was not designed for initial phase of fire in the form of flameless combustion simulation, as in the case of the presented fire.

Słowa kluczowe: modelowanie komputerowe, model strefowy pożaru;

Keywords: computer modeling, zone fire model;

Metody modelowania komputerowego procesów spalania znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie w prognozowaniu rozwoju pożarów w pomieszczeniach. Sprzyja temu systematyczny wzrost mocy obliczeniowej i pamięci operacyjnej komputerów. Opracowane dotychczas programy w połączeniu z coraz bardziej wydajnym sprzętem pozwalają ze znaczną dokładnością prognozować rozwój pożaru umożliwiając tym samym szacunkowe określenie czasu niezbędnego do ewakuacji ludzi z zagrożonych pomieszczeń. Pozwala to przewidzieć maksymalną odległość i czas dojazdu ekip ratunkowych na miejsce zdarzenia. Przedstawione w opracowaniu argumenty nie tylko przekonują, ale utwierdzają co do słuszności stosowania wymienionych metod badawczych. Uzyskane informacje i wiedza na temat badanych zjawisk pozwolą nie posiadającemu kwalifikacji zawodowych czytelnikowi zrozumieć istotę zagadnienia, z kolei strażakom umożliwią poszerzenie wiedzy na temat mechanizmów rządzących pożarem. Jest to wiedza niezbędna podczas prowadzonych działań ratowniczo-gaśniczych, np. przy ocenie stopnia zagrożenia ludzi i podejmowaniu decyzji, od których niejednokrotnie zależy ludzkie życie.

Dzięki zastosowaniu metod komputerowych możliwe jest zbliżone do rzeczywistości przedstawienie warunków panujących w środowisku pożaru bez konieczności prowadzenia tego typu badań w warunkach rzeczywistych. Wynika z tego korzyść w postaci ograniczenia kosztów związanych z przygotowaniem doświadczalnych stanowisk badawczych lub strat materialnych powodowanych samym pożarem. Jednakże z uwagi na konieczność przeprowadzenia przez komputer bardzo trudnych operacji matematycznych, oprócz odpowiedniego oprogramowania wymagany jest również sprzęt komputerowy o dużej mocy obliczeniowej, który będzie gwarantował rzetelność otrzymanych wyników.

Ponadto, nie bez znaczenia jest fakt, iż każdy rzeczywisty pożar charakteryzuje się zmiennością i złożonością przebiegu w stosunku do danych przyjętych na potrzeby jego symulacji [4]. Dlatego zdaniem autorów korzystne byłoby zastosowanie modelowania komputerowego z wykorzystaniem znanych od ponad 20 lat modeli strefowych do prognozowania rozwoju rzeczywistego pożaru oraz na potrzeby przeprowadzania

szczegółowych analiz przebiegu działań ratowniczo-gaśniczych a także wstępnego ustalania okoliczności, które przyczyniły się do powstania pożaru. Skonfrontowanie uzyskanych wyników z dokumentacją dotyczącą przebiegu i skutków pożaru oraz z wiedzą strażaków będących uczestnikami akcji, z pewnością ułatwi wydawanie zaleceń pokontrolnych przez właściwe w tej kwestii komórki a także usprawni procedury dochodzeń popożarowych. Jednym z pierwszych analizowanych w ten sposób w Polsce zdarzeń był pożar Teatru Polskiego we Wrocławiu w 1994 r., który całkowicie zniszczył widownię teatru [7]. Zastosowanie modelu matematyczno-komputerowego w analizie czterech znaczących pożarów w Polsce: kina w Sławnie (1986), Teatru Narodowego w Warszawie (1985), restauracji „Kaskada” w Szczecinie (1981) i fabryki FSO (1987) podano w [6]. Przykładem zastosowania modelowania komputerowego za granicą były analizy pożaru na stacji metra Kings Cross w Londynie w 1987 r., w wyniku którego zginęło 31 osób [2]. Innym podlegającym analizom wydarzeniem był skutkujący śmiercią trzech strażaków pożar trzypiętrowego budynku na Manhattanie w Nowym Jorku w 1994 r., podczas którego wystąpiło groźne zjawisko backdraft [1]. Od połowy lat 90-tych XX wieku podjęto próby zastosowania tego rodzaju modelowania w profilaktyce pożarowej.

Do weryfikacji przeprowadzonych obliczeń może służyć dokumentacja pożaru w postaci filmu nagranych przez osoby postronne, informacje uzyskane w wyniku czynności kontrolno-rozpoznawczych, ustalenia biegłego z zakresu pożarnictwa, który do opracowania opinii wykorzystuje zeznania świadków zdarzenia, dokumentację fotograficzną wykonaną w trakcie trwania i po pożarze oraz spostrzeżenia ratowników – uczestników akcji ratowniczo-gaśniczej.

Charakterystyka zagrożeń zabudowy miejskiej

Jedną z przyczyn dużej liczby pożarów w zabudowie miejskiej na Śląsku jest bardzo zły stan techniczny wielu starych kamienic, z których znaczną część stanowią pustostany. Oprócz osiedli mieszkaniowych z wielkiej płyty, w krajobraz miast tego regionu wkomponowane jest starsze budownictwo oficynowe. Jego charakter powoduje, że dojazd straży pożarnej do miejsca pożaru jest często utrudniony. W charakterystykę tę doskonale wpisuje się będący przedmiotem przeprowadzonej analizy przypadek tragicznego pożaru mieszkania, który miał miejsce w centrum Bytomia w czerwcu 2010 roku (ryc. 1).



Ryc. 1. Widok okien oficyny przy pl. Grunwaldzkim w Bytomiu w czasie pożaru w dn. 09.06.2010 r. o godz. 5.10 (ze zbiorów Komendy Miejskiej PSP w Bytomiu)

Fig. 1. Windows of back premises at Grunwald Square in Bytom in fire on 06.09.2010, 5.10 a.m. (from the collection of the Municipal State Fire Service in Bytom)

Konstrukcja budynku kamienicy przy Placu Grunwaldzkim w Bytomiu

Pożar został zauważony w oficynie budynku czterokondygnacyjnego w Bytomiu przy pl. Grunwaldzkim, mieszczącego się w zwartej zabudowie. Z karty zdarzenia straży pożarnej nr 1205001-1305 wynika, że jest to budynek mieszkalny wielorodzinny z funkcjami usługowymi na parterze, gospodarczym podpiwniczeniem oraz nieużytkowym strychem.

Kolejne dane na temat obiektu ustalone przez funkcjonariuszy KM PSP w Bytomiu w trakcie przeprowadzonych po pożarze czynności kontrolno-rozpoznawczych [8] wskazują, że budynek składa się z trzech części o zróżnicowanej wysokości:

- pięciokondygnacyjna część frontowa o pow. użytkowej 536,7 m² i kubaturze 2521 m³,
- czterokondygnacyjna oficyna I o powierzchni użytkowej 445,4 m² i kubaturze 2352 m³,
- czterokondygnacyjna oficyna II (miejsce zdarzenia) o powierzchni użytkowej 354,14 m² i kubaturze 2184,7 m³.

Zlokalizowane na parterze budynku dwie restauracje nie posiadają połączenia komunikacyjnego z częścią mieszkalną a budynek tworzy jedną strefę pożarową, z uwagi na połączenie komunikacyjne przez strych oraz usytuowanie otworów okiennych. Budynek ma tradycyjną murowaną konstrukcję, z drewnianymi stropami międzykondygnacyjnymi oraz dachem krytym na całej połaci papą. Wewnątrz znajdują się klatki schodowe o konstrukcji stalowej z drewnianymi stopnicami. Standardowo budynek wyposażony jest w instalację elektryczną z przeciwpożarowym wyłącznikiem prądu zlokalizowanym przy złączu kablowym w bramie przejazdowej i oznakowanym znakiem bezpieczeństwa. Ponadto obiekt budowlany wyposażony jest w instalację gazu ziemnego z głównym kurkiem na ścianie frontowej oraz instalację wodną i kanalizacyjną. W części frontowej znajduje się 9 lokali

mieszkalnych i 2 lokale użytkowe na parterze. W oficynie I znajduje się 7 lokali mieszkalnych, a w oficynie II cztery lokale mieszkalne, z czego na parterze jeden wyłączony z eksploatacji ze względu na zły stan techniczny. Budynek wzniesiony został w 1895 roku. Powierzchnia mieszkania objętego pożarem wynosi $36,5 \text{ m}^2$, a jego kubatura $127,5 \text{ m}^3$.

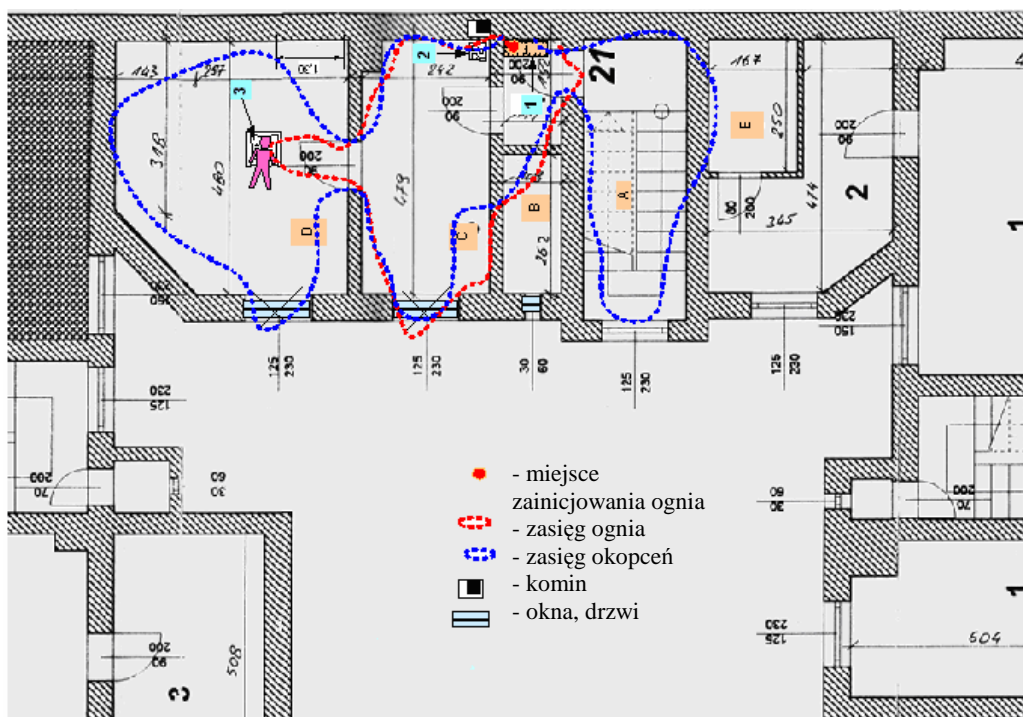
Z ustaleń biegłego powołanego do zbadania przyczyn tego pożaru wynika, że do oficyny prowadzi brama przejazdowa przez kamienicę o szerokości 2,5 m i długości 14 m [5].

Rozwój pożaru i przebieg akcji ratowniczo-gaśniczej

Powiadomienie o pożarze mieszkania w centrum Bytomia na pl. Grunwaldzkim w oficynie budynku nastąpiło 9 czerwca 2010 roku, o godz. 4⁵². Po dojeździe do miejsca zdarzenia dowódca z uwagi na duże zadymienie wezwał dodatkowe siły i środki. Widok zastany po przyjeździe wskazywał na zagrożenie życia ludzkiego. Tymczasem pożar przechodził w kolejną fazę rozwoju, stając się jeszcze bardziej groźnym. Świadczyły o tym kłęby czarnego dymu wydobywające się z otwartego okna na drugim piętrze. Na zewnętrzną ścianę budynku z ogarniętego pożarem pomieszczenia wyszły dwie osoby, kobieta i mężczyzna, które utrzymywały się tylko parapetu okna. Zachowanie tych ludzi wskazywało, że pożar odciął im drogę ucieczki i osiągając bardzo wysoką temperaturę zmusił do opuszczenia mieszkania przez okno.

W trakcie działań ratowniczych w pierwszej kolejności użyto drabiny D14W. W chwili tej pożarem objęte było całe mieszkanie, a płomienie wydobywały się już na klatkę schodową przez przepalone i otwarte drzwi wejściowe. Powodowało to zadymienie klatki schodowej oraz pomieszczeń powyżej drugiego piętra (ryc. 1).

Mężczyzna utrzymujący się dotychczas w oknie spadł na wchodzącego po drabinie strażaka, obydwaj uderzyli o ziemię odnosząc obrażenia. Po chwili kobieta trzymająca się parapetu również odpadła. Stojący na dole strażak próbował bezskutecznie chwycić spadającą kobietę, spowodowało to, że oboje upadli na ziemię. Poszkodowanym pierwszej kwalifikowanej pomocy medycznej udzielili strażacy PSP. W trakcie dogaszania i przeszukiwania mieszkania objętego pożarem znaleziono na fotelu w pokoju w pozycji siedzącej nieprzytomnego mężczyznę bez czynności życiowych. Po przygaszeniu płomieni na klatce schodowej, przystąpiono do przeszukiwania pomieszczeń na trzecim piętrze oraz poddaszu. W trakcie tych czynności w mieszkaniu na trzecim piętrze odnaleziono dwie nieprzytomne osoby, które natychmiast ewakuowano i przekazano lekarzowi pogotowia ratunkowego. Po opanowaniu sytuacji przystąpiono do ewakuacji osób znajdujących się w sąsiednich klatkach schodowych. W sumie do miejsca ewakuacji, gdzie był podstawiony autobus, ewakuowano 52 osoby.



Ryc. 2. Rzut mieszkania nr 21 położonego na II piętrze oficyny w Bytomiu przy pl. Grunwaldzkim 7. A – klatka schodowa, B – łazienka, C – kuchnia, D – pokój, E – mieszkanie sąsiednie, 1 – spalona szafka, 2 – nieczynny piec kuchenny, 3 – spalony fotel, miejsce odnalezienia zwłok [5]

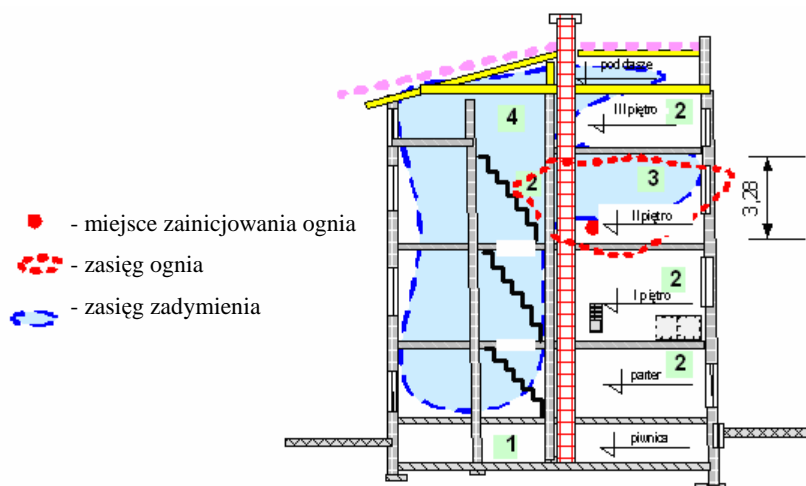
Fig. 2. Plan of the flat No 21 situated on 2nd floor of back premises in Bytom at Grunwaldzki Square No 7. A – staircase, B – bathroom, C – kitchen, D – living-room, E – neighbouring flat, 1 – burnt cupboard, 2 – inactive kitchen stove, 3 – burnt armchair, place where corpse was found [5]

Opis zdarzenia w kontekście przyczyny i zagrożenia

Według biegłego sędziego w mieszkaniu nr 21 położonym na drugim piętrze oficyny w Bytomiu przy Placu Grunwaldzkim 7 w czasie przebywania w nim 3 osób (śpiących i po spożyciu alkoholu) doszło do zainicjowania ognia na poziomie szafki kuchennej stojącej przy nieczynnym piecu kuchennym w kuchni. Doszło do zaprószenia ognia i powolnego procesu spalania w fazie tlenia z wydzieleniem dużej ilości dymów i gazów pożarowych. Rozprzestrzeniając się w objętości mieszkania spowodowały one wybudzenie śpiącego mężczyzny, który wszczął alarm i obudził swą konkubinę oraz drugiego z mężczyzn. W pokoju było silne zadymienie a w kuchni (na jedynej drodze ucieczki z mieszkania) widoczne były płomienie co spowodowało, że kobieta i mężczyzna wyszli przez okno na zewnętrzny parapet okienny i w konsekwencji już w czasie obecności przybyłych strażaków odpadli powodując obrażenia usiłujących ratować ich strażaków. Natomiast ostatni mężczyzna pozostał w pokoju na fotelu, gdzie uległ śmiertelnemu zaccadzeniu a jego zwłoki częściowemu spalaniu.

O prawdziwości przedstawionej wersji wydarzeń świadczą przede wszystkim spójne zeznania poszkodowanych, świadków i strażaków oraz to, że interweniujący strażacy jako przypuszczalną przyczynę wskazali zaproszenie ognia w mieszkaniu (papierosy, zapalniczki). Wyeliminowano wstępnie przyczyny tzw. eksploatacyjne związane z poborem energii elektrycznej oraz wady grzewczo-kominowe. Wystąpienie silnego zadymienia mieszkania i klatki schodowej w oficynie świadczyło o powolnym procesie spalania w fazie tlenia co czyni mało prawdopodobną tezę, że doszło do podpalenia z użyciem np. cieczy palnej.

Jedynym czynnikiem rozróżniającym zaproszenie ognia i podpalenie jest szybkość procesu, która w przypadku podpalenia jest o wiele większa niż w przypadku zaproszenia. W omawianym przypadku ślady sugerujące podpalenie z użyciem cieczy palnej nie zostały ujawnione.



Ryc. 3. Poglądowy przekrój oficyny z zaznaczeniem miejsca powstania pożaru, jego zasięgu i zadymienia. 1 – poziom piwnic, 2 – mieszkania, 3 – mieszkanie nr 21, 4 – klatka schodowa [5]

Fig. 3. Demonstrative horizontal section of back premises with start of fire, its radius and amount of smoke. 1 – level of cellars, 2 – flats, 3 – flat No 21, 4 – staircase [5]

W trakcie oględzin powołany do zbadania okoliczności i przyczyn pożaru biegły sądowy ustalił następujące fakty stanowiące podstawę do budowy modelu rozwoju pożaru [5]:

- miejscem zainicjowania pożaru jest mieszkanie nr 21 położone na drugim piętrze (część południowa klatki schodowej),
- wyżej wymienione mieszkanie składa się z: kuchni z oknem wschodnim o wymiarach 4,7 x 3,65 m z wydzielonym pomieszczeniem łazienki o wymiarach 1,15 x 2,5 m oraz pokoju o wymiarach 4,7 x 4,3 m i wysokości 3,28 m z oknem w ścianie wschodniej,

które zostało intensywnie okopcone na skutek trwania procesu spalania różnych materiałów palnych i mebli,

- na klatce schodowej poziomym drugiego piętra występują ślady uszkodzeń futryn drzwi i tynków ściennych oraz sufitowych o dużej intensywności w rejonie drzwi do mieszkania nr 21 oraz uszkodzonych w wyniku spalania drzwi do sąsiedniego mieszkania,
- skrzynka zabezpieczenia prądowego została okopcona ze stopieniem elementów obudowy liczników a w miejscu wskazanym jako przynależne do mieszkania nr 21 brak jest licznika elektrycznego i widoczne są przewody ze stopioną izolacją,
- stwierdzono intensywne okopcenia klatki schodowej w kierunku wyższej kondygnacji,
- zainicjowanie ognia nastąpiło w kuchni w obszarze drewnianej szafki stojącej obok nieczynnego pieca kuchennego przy zachodniej ścianie,
- nastąpiło uszkodzenie tynku ściennego i powierzchniowe wypalenie sufitu trzcinowo-wapiennego (na powierzchni 2 x 2 m) bez jego przepalenia w rejonie pieca kuchennego i spalonej szafki,
- widoczne są wypalenia drewnianego wydzielenia łazienki najintensywniejsze od strony pieca kuchennego oraz ramy okiennej i konstrukcji okna,
- w ścianie południowej kuchni znajduje się otwór drzwiowy prowadzący do pokoju a wypalenia ramy drzwiowej są intensywniejsze od strony spalonej kuchni,
- w pokoju w odległości 1,1 m od ściany zachodniej i 1,3 m od ściany północnej stoi fotel tapicerski (jest to miejsce ujawnienia zwłok),
- cały pokój jest intensywnie okopcony z uszkodzeniami tynku sufitowego nad drzwiami,
- widoczne są okopcenia wewnętrzne klatki schodowej w kierunku wyższego piętra i na poziomie niższego piętra.

Zbyt późne powiadomienie straży pożarnej o zaistniałym zdarzeniu doprowadziło do szybkiego rozwoju pożaru. W wyniku pożaru stwierdzono następujące straty ludzkie: ofiara śmiertelna (jeden lokator), poszkodowani w wyniku upadku (2 lokatorów), zatrucie gazami pożarowymi (4 lokatorów), poszkodowani w wyniku upadku lub próby złapania spadającej osoby (2 strażaków) oraz odwodnienie i osłabienie organizmu (jeden strażak). W czasie pożaru doszło do silnego zadymienia klatki schodowej oficyny w stopniu zagrażającym jej lokatorom, co skutkowało koniecznością ewakuacji wszystkich 52 osób.

Wykorzystanie programu CFAST w analizie przedmiotowego pożaru

CFAST (ang. Consolidated Fire And Smoke Transport model) to komputerowy model strefowy pożaru przeznaczony do analizy warunków i oddziaływania pożaru na wielopomieszczeniowe struktury budowlane. Program przystosowany jest do obliczania czasu przemieszczania się dymu i gorących gazów pożarowych w danym budynku podczas pożaru. Program analizując warunki w pomieszczeniu, dzieli je na warstwy. Temperatura, właściwości dymu i stężenie gorących gazów pożarowych w takiej strefie przyjmowane są przez program jako uśrednione. CFAST dzieli dane pomieszczenie na dwie warstwy – warstwę gorącą (górną) i chłodną (dolną), więc warunki mogą się jedynie różnić między warstwą podsufitową a podłogową. Za pomocą modelu uzyskuje się obliczenia parametrów pożaru takich jak temperatura, zasięg widzialności, stężenia gazów. Program CFAST jest aplikacją stworzoną przez amerykański instytut NIST [3].

Walidacja doświadczalna modelu strefowego CFAST wskazuje na zgodność wyników generowanych przez program z parametrami zmierzonymi podczas testów w pełnej skali: dla pojedynczego pomieszczenia – 18%, dla pojedynczego pomieszczenia z pożarem materiałów wykończeniowych ściennych – 20%, dla układu trzech pomieszczeń z korytarzem – 28%, natomiast w przypadku budynku wielopiętrowego – 33% [3]. Podana stosunkowo duża dokładność obliczeń programu wynika z zastosowania w kodzie zależności empirycznych i jest wystarczająca do analizy rozwoju pożarów w pomieszczeniach. Modele strefowe służą do przybliżenia pierwszego rzędu procesów pożaru, dają możliwość prognozowania dynamiki rozwoju pożaru dla danej sytuacji pożarowej po stwierdzeniu adekwatności modelu, cechują się względną prostotą i szybkością obliczeń (niezbędną na potrzeby różnych dziedzin pożarnictwa).

Elementy składowe modelu pomieszczeń

W ramach tworzenia modelu w programie CFAST zaprojektowano geometrię złożoną z pięciu pomieszczeń podanych w tabeli 1.

Tabela 1.

Pomieszczenia w modelu pożaru

Table 1.

Rooms in the model of fire

Nr pomieszczenia	Wymiary	Wysokość	Rodzaj pomieszczenia
1	1,15 x 2,2 m	3,28 m	część kuchni, gdzie powstał pożar
2	2,5 x 4,8 m	3,28 m	pozostała część kuchni „C”
3	4,3 x 4,8 m	3,28 m	pokój „D”
4	1,15 x 2,6 m	3,28 m	łazienka „B”
5	2 x 5,3 m	10 m	fragment klatki schodowej „A”

Pomieszczenia połączone są ze sobą otworami drzwiowymi i wyposażone są w okna jak podano w tabeli 2.

Tabela 2.

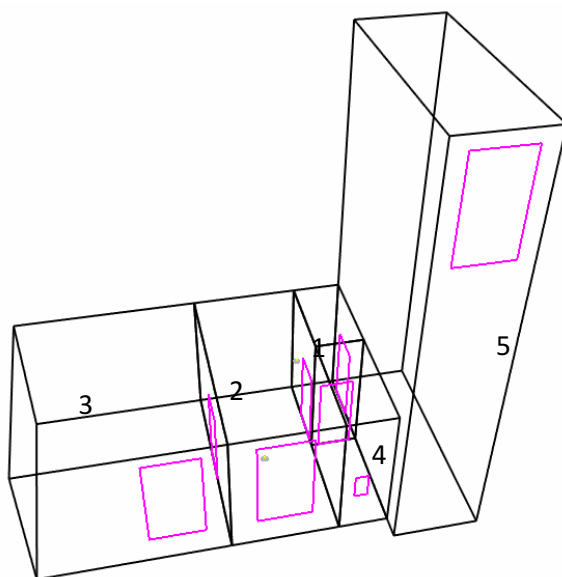
Otwory wentylacyjne w modelu pożaru

Table 2.

Ventilation openings in the model of fire

Nr otworu	Nr pomieszczeń	Wymiary	Rodzaj otworu	Czas otwarcia
1	2-3	0,9 x 2 m	drzwi do pokoju	600 s
2	1-2	0,9 x 2 m	drzwi w kuchni	0 s
3	1-4	0,8 x 2 m	drzwi do łazienki	90 s
4	1-5	0,9 x 2 m	drzwi na klatkę schodową	900 s
5	3	1,25 x 2,3 m	okno w pokoju	600 s
6	2	1,25 x 2,3 m	okno w kuchni	30 s
7	4	0,3 x 0,6 m	okno w łazience	170 s
8	5	1,25 x 2,3 m	okno na klatce schodowej	0 s

Ogólny widok modelu zaprezentowano na ryc. 4.



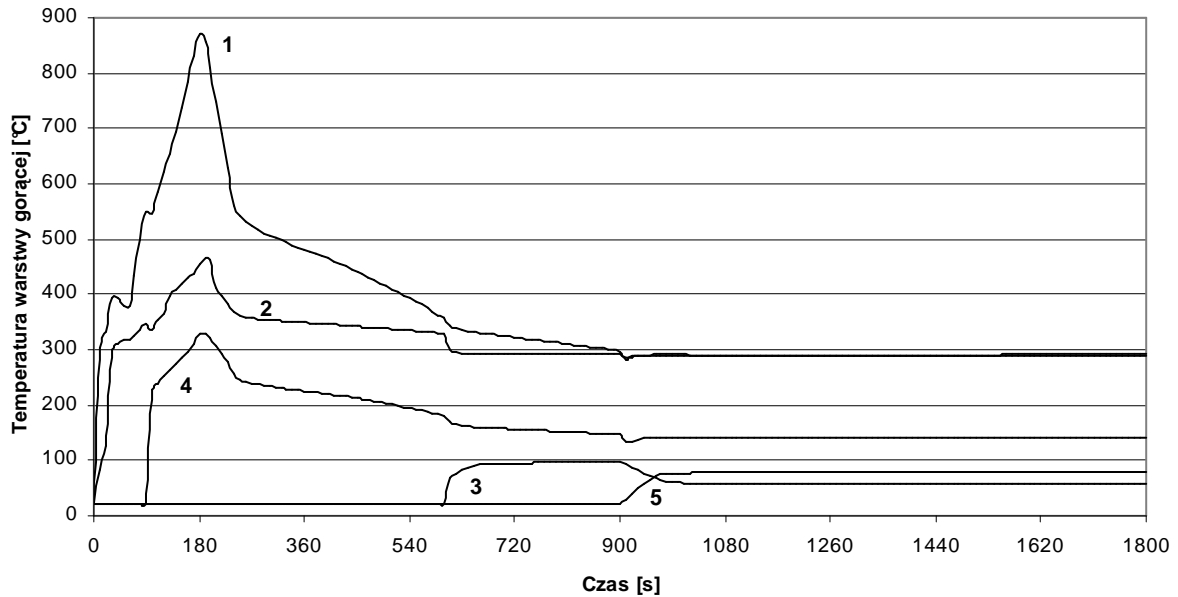
Ryc. 4. Widok modelu budynku wizualizowany w programie Smokeview [badania własne]
Fig. 4. Model of building visualised in Smokeview program [own research]

Scenariusz pożaru

Za pierwotne źródło pożaru przyjęto drewnianą szafkę, która charakteryzuje się maksymalną szybkością wydzielania ciepła wynoszącą 4500 kW w czasie 170 s. Pożar rozprzestrzenia się następnie na całą kuchnię, gdzie osiąga stałą moc 1000 kW typową dla pożarów obiektów mieszkalnych. Czas trwania symulacji ustalono na 1800 s (30 min).

Wyniki symulacji

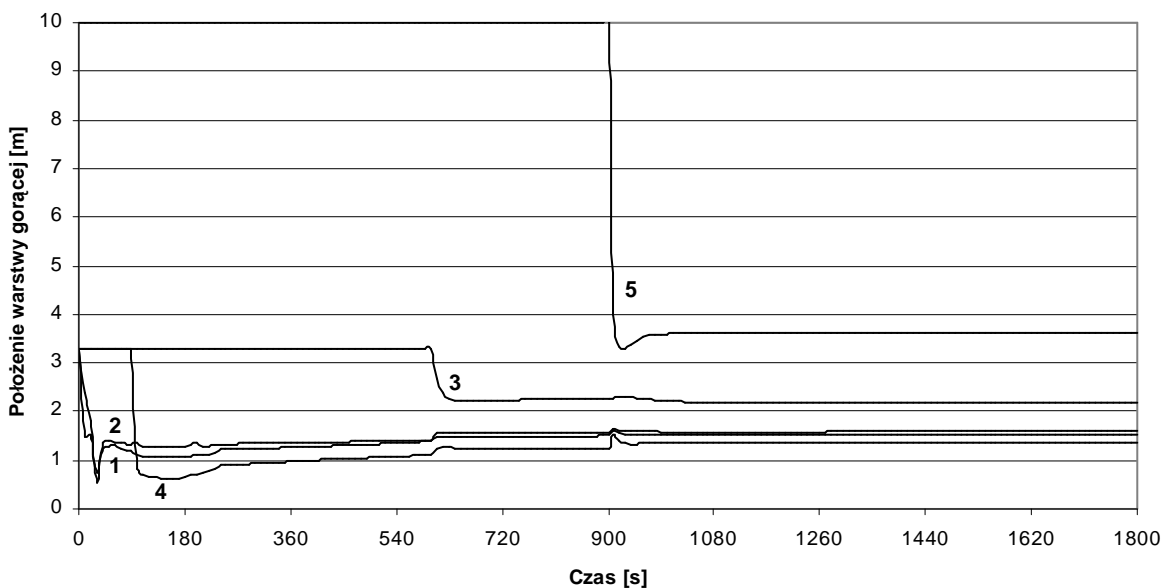
Wyniki symulacji przedstawiono na kolejnych wykresach (ryc. 5-8).



Ryc. 5. Temperatura warstwy gorącej w funkcji czasu w pomieszczeniach oznaczonych zgodnie z ryc. 4 [badania własne]

Fig. 5. Temperature of hot layer in time function in rooms marked in accordance with fig. 4 [own research]

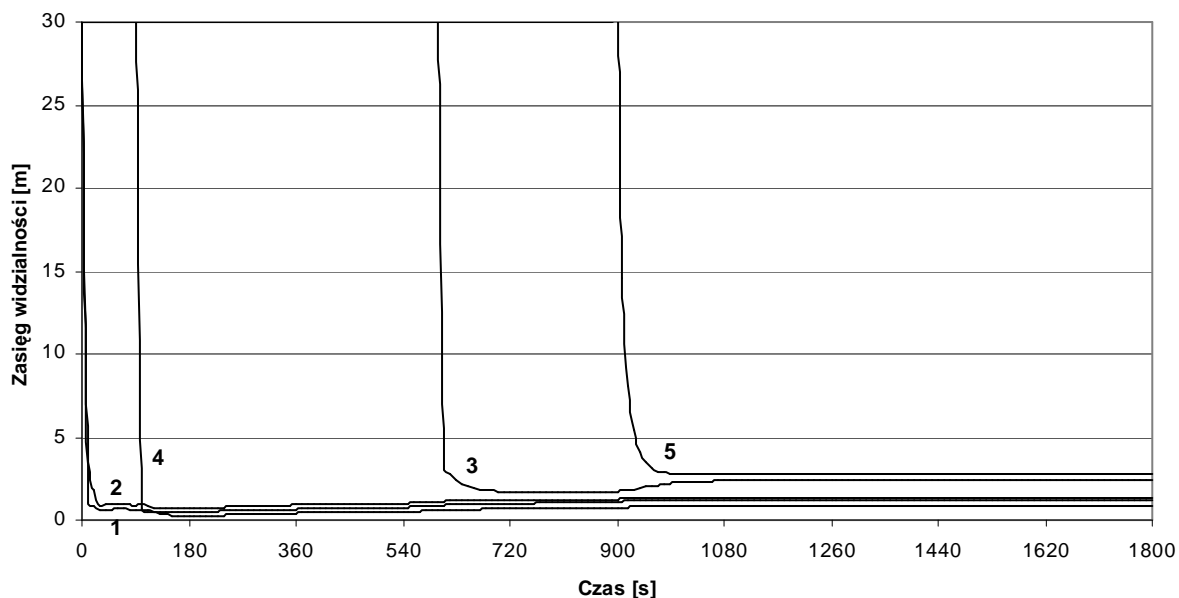
Najwyższa temperatura warstwy gorącej 1145 K (872 °C) została osiągnięta w części kuchni, gdzie powstał pożar. W pozostałej części kuchni oraz łazience najwyższa temperatura miała wartość odpowiednio 740 K (467 °C) i 603 K (330 °C). Maksymalna temperatura w pokoju wynosiła 369 K (96 °C), natomiast w górnej części klatki schodowej 353 K (80 °C).



Ryc. 6. Zmiana położenia warstwy gorącej w pomieszczeniach oznaczonych zgodnie z ryc. 4 [badania własne]

Fig. 6. Change of position of hot layer in accordance with fig. 4 [own research]

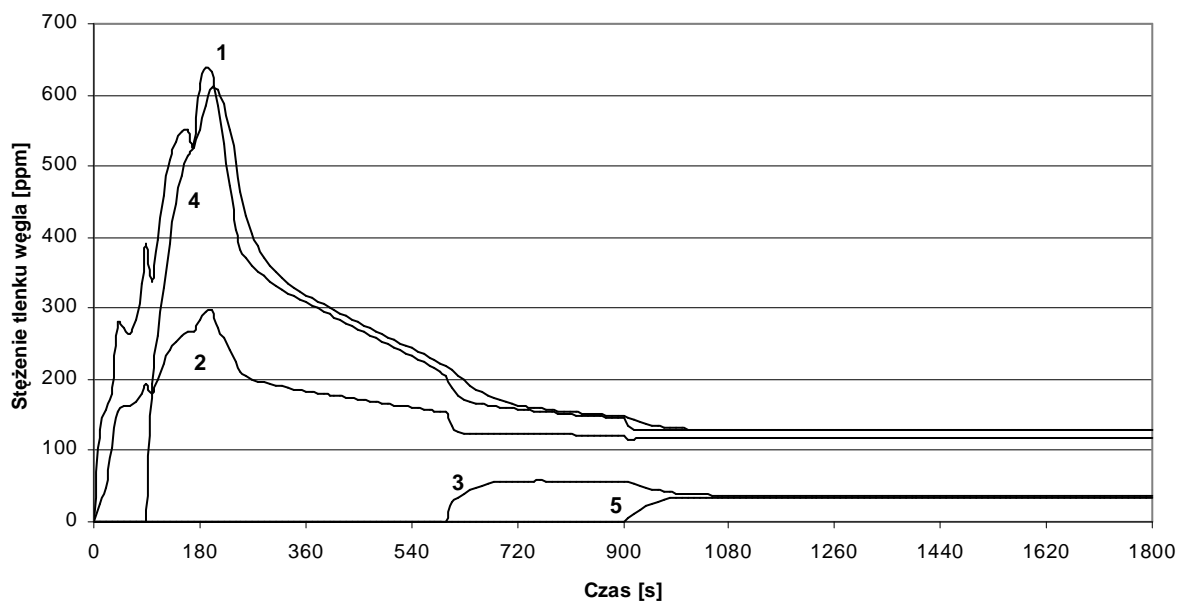
Zmiana położenia warstwy gorącej przebiegała podobnie w części kuchni, gdzie powstał pożar i w pozostałej części kuchni osiągając pod koniec czasu symulacji odpowiednio wartości 1,52 i 1,58 m. Podobnie w łazience położenie warstwy gorącej spadło do wartości 1,34 m. W pokoju warstwa gorąca obniżyła się do poziomu 2,18 m a klatka schodowa wypełniła się warstwą dymu o grubości 6,38 m.



Ryc. 7. Zmiana zasięgu widzialności w pomieszczeniach oznaczonych zgodnie z ryc. 4 [badania własne]

Fig. 7. Change of radius of visibility in rooms marked in accordance with fig. 4 [own research]

Zasięg widzialności w części kuchni, gdzie powstał pożar, w pozostałej części kuchni oraz w łazience spadł do podobnej wartości, odpowiednio do 1,18 m, 1,28 m i 0,87 m. W pokoju zasięg widzialności pod koniec symulacji osiągnął wartość 2,44 m a na klatce schodowej 2,75 m.



Ryc. 8. Zmiana stężenia tlenku węgla w pomieszczeniach oznaczonych zgodnie z ryc. 4 [badania własne]

Fig. 8. Change of carbon monoxide concentration in rooms marked in accordance with fig. 4 [own research]

Stężenie tlenku węgla osiągnęło najwyższy poziom w części kuchni, gdzie powstał pożar oraz w łazience – odpowiednio 638 i 609 ppm. W pozostałej części kuchni najwyższe stężenie CO wyniosło 297 ppm. W pokoju i na klatce schodowej maksymalne stężenie tlenku węgla wyniosło odpowiednio 58 i 35 ppm. Stężenie tlenku węgla w pokoju, gdzie znaleziono zwłoki lokatora, wydaje się być nieadekwatne do stwierdzonej przyczyny zgonu (zaczadzenie). Należy jednak zauważyć, że użyty model strefowy pożaru przeznaczony jest do badania spalania płomieniowego a nie bezpłomieniowego, które miało miejsce w pierwszej fazie przedmiotowego pożaru. Wskazują na to wprowadzane do modelu parametry dotyczące materiałów palnych takie jak: ciepło spalania, czy też rodzaj korelacji do obliczeń strumienia powietrza wciąganego do kolumny konwekcyjnej ognia.

Podsumowanie i wnioski

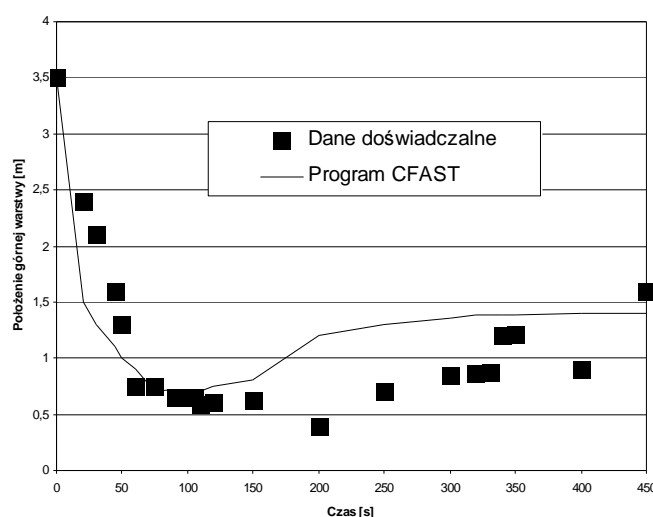
Program CFAST został opracowany do stosowania w rozwiązywaniu problemów w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Najszersze zastosowanie model znajduje w analizie rozprzestrzeniania się ognia i dymu w budynkach.

W ramach weryfikacji i walidacji programu dokonano szeregu porównań pomiędzy wynikami symulacji modelu i eksperymentem w układzie wielopomieszczeniowym (Jones i Peacock, 1988). W eksperymencie wykorzystano stałą szybkość wydzielania ciepła około

100 kW w układzie trzech pomieszczeń o objętości około 100 m³. Zauważono, że model zawyżał temperaturę górnej warstwy o około 20%, natomiast z zadowalającym efektem przewidywał położenie warstwy rozdziału. Porównanie przewidywanych i mierzonych ciśnień w pomieszczeniach wykazało zgodność również w 20% [3].

Przeprowadzono badanie zgodności testów pożarowych w pełnej skali z wynikami symulacji pożaru w budynku mieszkalnym (Levine i Nelson, 1990). Podstawę badań stanowił pożar z 1987 roku, który powstał w kuchni na parterze domu i spowodował śmierć trzech osób w sypialni na górnym poziomie. Zawartość karboksyhemoglobiny we krwi jednej z ofiar wynosiła 91%. Odtworzono ten pożar w pełnej skali z oprzyrządowaniem w układzie siedmiu pomieszczeń na dwóch poziomach. Dane zebrane podczas badań zostały wykorzystane do sprawdzenia zgodności wyników modeli komputerowych dla struktur wielopomieszczeniowych. Najlepsza zgodność wystąpiła dla przepływu warstwy dymu i stężenia tlenu węgla w pomieszczeniach najbardziej oddalonych od źródła ognia. Przewidywanie wzrostu temperatury w fazie przedrozgorzeniowej było także skuteczne według badaczy [3].

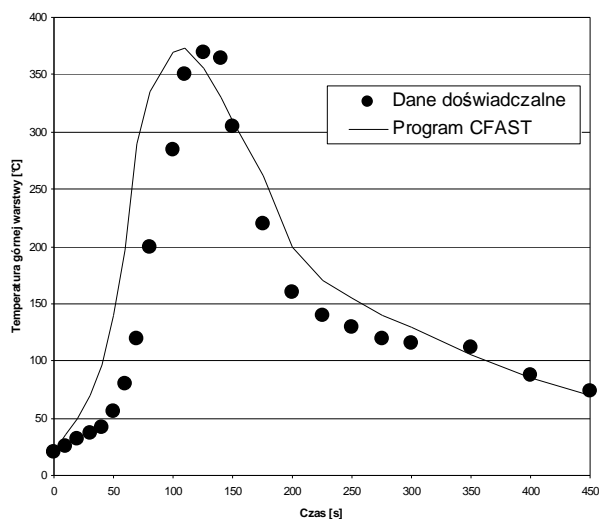
Na ryc. 9 podano wyniki położenia górnej warstwy w czasie. Dane eksperymentalne otrzymano dla pożaru pianki poliuretanowej o maksymalnej szybkości wydzielania ciepła 1100 kW. Obserwowano szybsze zmniejszanie się obliczeniowego położenia górnej warstwy w czasie w stosunku do wyników eksperymentalnych na początku trwania pożaru, co jest charakterystyczne dla pozostałych pożarów doświadczalnych.



Ryc. 9. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów położenia górnej warstwy. Pożar pianki poliuretanowej. Szybsze zmniejszanie się obliczeniowego położenia górnej warstwy w czasie w stosunku do wyników eksperymentalnych na początku trwania pożaru [9]

Fig. 9. Comparison of the results of calculations and measurements of the upper layer (polyurethane foam) [9]

Na ryc. 10 przedstawiono zależność temperatury górnej warstwy od czasu, określoną dla eksperymentu podanego wyżej. Pokazany przebieg danych doświadczalnych w porównaniu z obliczeniowymi jest charakterystyczny dla innych testów. Średnie nadwyżki temperatury obliczeniowej w stosunku do eksperymentalnej nie przekraczały 50 K.



Ryc. 10. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów temperatury górnej warstwy. Pożar pianki poliuretanowej [9]

Fig. 10. Comparison of the results of calculations and measurements of the temperature of the upper layer (polyurethane foam) [9]

W ramach badań własnych zbudowano model pożaru odzwierciedlający rzeczywiste warunki zdarzenia powstałego w Bytomiu w dniu 9 czerwca 2010 roku wprowadzając znane wymiary pomieszczeń i otworów wentylacyjnych. Z wbudowanej bazy danych dobrano odpowiedni materiał palny stanowiący pierwotne źródło pożaru – szafkę (wardrobe), założono moc pożaru w głównej części kuchni równą 1000 kW typową dla pożarów obiektów mieszkalnych. Na podstawie obliczonej w pomieszczeniu kuchni i łazienki temperatury warstwy dymu oszacowano czas otwarcia otworów wentylacyjnych przyjmując za warunek stłuczenia szyby w oknie osiągnięcie temperatury 573 K (300 °C). Moment otwarcia drzwi i okna w pokoju założono po czasie 10 min a moment przepalenia drzwi wejściowych – po czasie 15 min.

1. Odnotowano dobrą zgodność obliczonego położenia warstwy gorącej ze stanem faktycznym zarejestrowanym na zdjęciu kamienicy w czasie pożaru (ryc. 1). Obliczenia wykazały obniżenie się warstwy gorącej w pokoju do poziomu 2,18 m, natomiast zdjęcie obrazuje wydobywanie się dymu na wysokości górnej części okna. Dostępne materiały fotograficzne przebiegu pożaru i śladów popożarowych (okopcenia, stopienia i nadpalenia

materiałów wyposażeniowych i wykończeniowych) stanowią dobrą bazę do weryfikacji założonego scenariusza pożaru i wprowadzonych danych wejściowych.

2. Nie osiągnięto zgodności obliczonego stężenia tlenu węgla w pokoju ze stwierdzoną przyczyną zgonu znajdującego się w tym pomieszczeniu lokatora. Użyty model pożaru nie został zaprojektowany z przeznaczeniem do badania pożarów z początkową fazą w postaci spalania bezpłomieniowego tak, jak miało miejsce w przypadku przedmiotowego pożaru.
3. Do ograniczeń modelu należą:
 - a) trudności obliczeń dla skomplikowanej geometrii (do takich zastosowań właściwsze są modele obliczeniowej dynamiki płynów CFD),
 - b) ograniczenia związane z założeniem dobrego rozwarstwienia (z definicji zakłada się wyraźną granicę pomiędzy warstwą gorącą i chłodną, czego nie odnotowuje się w rzeczywistości), na przykład za pomocą modelu strefowego nie można modelować tlącego się papierosa w pomieszczeniu,
 - c) szybkość wydzielania ciepła jest określana przez użytkownika dla jednego lub więcej źródeł ognia, model dokonuje jedynie sprawdzenia dostępności tlenu niezbędnego do spalania,
 - d) wymiana ciepła przez promieniowanie między pomieszczeniami nie jest uwzględniona w modelu,
 - e) dokładność modelu jest ograniczona przez prawidłowe określenie właściwości termofizycznych paliwa, jeśli właściwości materiałów i paliw nie są dokładnie określone powoduje to wyższy poziom niepewności modelu.

Literatura

1. Bukowski R. W., *Modeling a Backdraft: The Fire at 62 Watts Street*, NFA Journal, 89 (6): 85-89, 1995;
2. Cox G., Chitty R., Kumar S., *Fire modelling and the King's Cross fire investigation*, Fire Safety Journal, 15:103-106, 1989;
3. Jones W. W., Peacock R. D., Forney G. P., Reneke P. A., *CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6): Technical Reference Guide*, Special Publication 1026, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg 2009;
4. Konecki M., *Kilka uwag na temat dynamiki i modelowania pożarów*, wykład inauguracyjny wygłoszony 30 września 2010 roku w Szkole Głównej Służby Pożarnej. http://www.sgsp.edu.pl/uczelnia/wyklady/wyklad_prof_konecki.pdf;

5. Pieśniak K., *Opinia biegłego sądowego z zakresu ochrony przeciwpożarowej dotycząca przedmiotowego pożaru*, Bytom 2010;
6. Wolanin J. i inni., *Matematyczno-komputerowy model kryminalistycznego badania przyczyn i okoliczności pożarów*, Departament Szkolenia i Doskonalenia Zawodowego MSW, Warszawa 1989;
7. Wolanin J., Ościłowska B., Starzyński E. i inni., *Analiza przyczyn i okoliczności rozwoju pożaru Teatru Polskiego we Wrocławiu*, praca niepublikowana. SGSP, Warszawa 1994;
8. Informacje ustalone w wyniku kontroli po pożarze, zleconej przez Komendanta Miejskiego PSP w Bytomiu pracownikom Wydziału Kontrolno-Rozpoznawczego KM PSP w dniu 10.06.2010 r. dokonanej w obecności zarządcy budynku – ZBM Bytom;
9. Reneke P. A., Jones W. W., Peatross M. J., Beyler C. L., Richards R., *A comparison of CFAST predictions to USCG real-scale fire tests*, J. of Fire Protection Engineering, vol. 11, 2001, s. 43-68.

st. kpt. dr inż. **Norbert TUŚNIO** w 2010 obronił doktorat w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Pracuje w Zakładzie Badania Przyczyn Pożarów (Katedra Podstaw Rozwoju i Gaszenia Pożarów) w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Specjalność – modelowanie pożarów.

st. kpt. mgr inż. **Damian SALETA** ukończył Szkołę Główną Służby Pożarniczej. Realizuje pracę doktorską na Wydziale Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Częstochowskiej.