PRACE NAUKOWE Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie
Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa 2018, t. VI, s. 383–397

http://dx.doi.org/10.16926/tiib.2018.06.27

Tomasz Prauzner[1], Sebastian Kostrzewa
[1]*Instytut Techniki i Systemów Bezpieczeństwa*
Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie
al. Armii Krajowej 13/15, 42–200 Częstochowa
e-mail: t.prauzner@ajd.czest.pl

ANALIZA PORÓWNAWCZA WYNIKÓW BADAŃ OPARTYCH NA SYMULACJI POŻARU W PROGRAMIE PYROSIM

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę porównawczą wyników symulacji pożaru w programie PyroSim. Do opracowania symulacji wykorzystano materiały i analizy popożarowe uzyskane na podstawie dokumentacji realnego zdarzenia pożaru mieszkania. Na tej podstawie opracowano scenariusze symulacji komputerowej uwzględniające różne założenia autorów. Uzyskane wyniki posłużyły również do oceny poprawności działania programu w ujęciu prezentacji rzeczywistych przebiegów zdarzenia.
Słowa kluczowe: programy symulacyjne, PyroSim, pożar.

COMPARATIVE ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS BASED ON FIRE SIMULATION IN THE PYROSIM PROGRAM

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the results of fire simulation in the PyroSim program. Materials and post-fire analysis obtained on the basis of documentation of a real fire event were used to develop the simulation. On this basis, computer simulation scenarios were developed, taking into account different assumptions of the authors. The results obtained were also used to assess the correctness of the program in terms of presenting the actual course of the event.
Keywords: simulation programs, PyroSim, a fire.

Wstęp

Wraz z rozwojem cywilizacji i wynikającymi z niego zmianami technologicznymi pojawiały się coraz to nowsze zagrożenia, którym należało przeciwdziałać. Punktem zwrotnym w dziejach człowieka, który skutkował nagłym wzrostem ryzyka powstania pożaru, stało się wprowadzenie do domów ognia. Powstające w procesie spalania dwutlenek węgla i tlenek węgla często stanowiły większe zagrożenie, aniżeli sam ogień. Następnym krokiem w rozwoju ludzkości były aglomeracje miejskie. Rosnące zaludnienie na małej przestrzeni przyczyniło się do budowy budynków wielokondygnacyjnych, a także niosło za sobą większe prawdopodobieństwo zaprószenia ognia przez ich mieszkańców [5]. Budowanie coraz bardziej skomplikowanych budynków przyczyniło się do rozpowszechnienia równie złożonych systemów zabezpieczeń. Za wprowadzanymi zmianami podążały modyfikacje prawne dotyczące bezpieczeństwa, m.in. budowlanego i pożarowego. Pożar jest zjawiskiem zależnym od wielu czynników, którego nie można w prosty sposób opisać. Pojawiła się całkiem nowa dziedzina nauki, jaką jest modelowanie pożarowe. Bliższe poznanie m.in. cech poszczególnych materiałów, ich reakcji na ogień i towarzyszącej mu temperatury umożliwiły wyprowadzenie algorytmów zdarzeń, które, przy użyciu odpowiednich narzędzi komputerowych, są wstanie wskazać prawdopodobny przebieg pożaru. Symulacja komputerowa może być również wykorzystywana w ocenie skuteczności ewakuacji osób z budynków mieszkalnych [6].

Przebieg i rozwój pożarów wewnętrznych

Jednymi z najtrudniejszych do opisania są pożary wewnętrzne zachodzące w halach produkcyjnych lub mieszkaniach. Wynika to z faktu, iż o jego rozwoju decyduje wiele czynników, m.in. układ pomieszczeń, rozmieszenie materiałów palnych oraz kierunki, w których mogą wytworzyć się ciągi powietrza i gazów spalinowych [2]. W momencie ograniczania wysokości płomienia przez sufit, następuje ich pełzanie w kierunkach poziomych, wzdłuż powierzchni sufitu. Towarzyszące temu zjawisku intensywne promieniowanie cieplne, prowadzi do powstania tzw. zjawiska rozgorzenia, charakteryzującego się gwałtownym zapłonem palnych elementów wyposażenia pomieszczenia w całej jego przestrzeni objętej pożarem. Analizując przebieg pożarów, można stwierdzić, że na otwartej przestrzeni przebieg pożaru różni się od tych w przestrzeniach zamkniętych. Wydzielająca się podczas spalania materiałów wysoka temperatura, na otwartej przestrzeni nie jest w żaden sposób ograniczona, oddając ciepło bezpośrednio do otoczenia. Pożar wewnętrzny, w początkowej fazie ogranicza się do wielkości pomieszczenia i znajdującego się w nim powietrza. Sam proces

oddawania ciepła do otoczenia jest utrudniony i ograniczony przez ściany i stropy pomieszczeń, w których zachodzi. Powstała wysoka temperatura dociera do ścian budynku, ogrzewając je. Duże ilości ciepła są pochłaniane przez przegrody, natomiast część jest zwracana w kierunku pożaru, wzmagając tym samym jego intensywność wynikającą ze wzrostu temperatury i zwiększonej prędkości spalania pozostałych materiałów. Równie ważną cechą charakteryzującą pożar wewnętrzny jest ograniczona możliwość usuwania z pomieszczeń dymu i wydzielających się gazów oraz dostarczanie do pożaru tlenu niezbędnego do podtrzymania procesu spalania [3].

Projekt symulacji pożaru

Charakterystyka obiektu

Na wstępie prac nad modelem istotne było przeanalizowanie dostępnych danych, zdjęć, szkiców sytuacyjnych i ekspertyz popożarowych, sporządzonych w ostatnim czasie, a których odtworzenie byłoby możliwe. Przed przystąpieniem do prowadzenia badań komputerowych przygotowany został model numeryczny odwzorowujący budynek mieszkalny [7]. Za wzór przyjęto pożar, który miał miejsce w Częstochowie w styczniu 2015 r. (Rys.1, 2). Symulację rozwoju zdarzenia przeprowadzono przy użyciu interfejsu programowego Pyrosim, natomiast obliczenia zostały wykonane za pomocą narzędzi FDS. Wzorcowe mieszkanie składało się z pokoju oraz kuchni (Rys. 3). Na podstawie wykonanych zdjęć i dokumentów znajdujących się w bazie danych PSP odwzorowano rozmieszczenie mebli, okna, drzwi oraz ich gabaryty. Wszystkie modelowane elementy wyposażenia pomieszczeń uwzględniały w swoich właściwościach materiały użyte do ich produkcji. Na podstawie ustaleń biegłych pożarowych zainicjowanie pożaru miało miejsce na powierzchni łóżka. W trakcie przygotowania modelu wzięto również pod uwagę nieszczelności mieszkania. Zamodelowane zostały one jako okno, które po 420 sekundach pożaru pęka od temperatury, udostępniając dopływ świeżego powietrza.

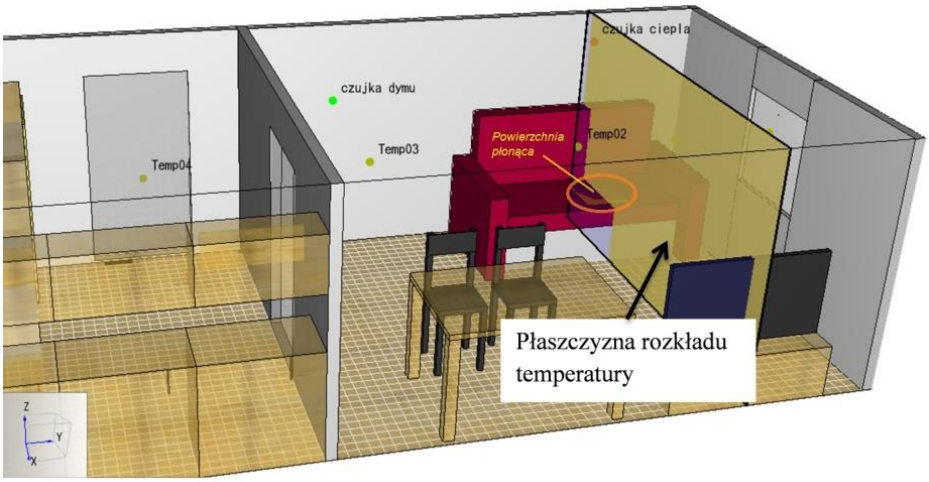
Odpowiednie zaadaptowanie przez FDS utworzonego modelu graficznego umożliwia zobrazowanie wielu zjawisk, takich jak: rozchodzenie się dymu, rozkład temperatury, tlenku węgla oraz innych substancji powstających w trakcie pożaru. Daje to szerokie możliwości zastosowania programu do analizy i dobrania zabezpieczeń budynków przed powstaniem zagrożenia na etapie projektowania, jak również podwyższenie bezpieczeństwa istniejących już budynków.



Rys. 1. Widok pokoju po pożarze



Rys. 2. Widok pokoju po pożarze



Rys. 3. Model wirtualny umeblowanego mieszkania

Kluczowym algorytmem pracy FDS wykorzystywanym do prowadzenia symulacji obliczeniowych jest mechanika płynów (CFD – Computational Fluid Dynamics). Program rozwiązuje numerycznie równanie Naviera-Stokesa dla niskich prędkości przepływu wymuszonego, ze szczególnym uwzględnieniem przepływu ciepła i dymu [4]. Program FDS dodatkowo połączony jest z programem Smokeview, który przeznaczony jest do wykonania wizualizacji symulacji. Umożliwia on graficzne przedstawienie przepływu cząstek, gazów, wizualizację rozkładu temperatury bądź wektorów kierunku przepływu, powstałych zmian wynikających z zadziałania tryskaczy, otwarcia klap dymowych itp. Smokeview posiada możliwość tabelarycznego przedstawienia danych dla wybranego czasu analizy.

Sieć obliczeniowa

Pierwszą czynnością, konieczną do wykonania modelu symulacji, było stworzenie siatki elementów zgodnie z wcześniej przyjętymi wymiarami pomieszczenia. Każdy obiekt użyty w symulacji, np. ściany, meble, musi być przystosowany do sieci obliczeniowej. W innym przypadku, gdy obiekt nie pokrywa się dokładnie z siatką, przed przystąpieniem do obliczeń program sam automatycznie dopasuje dany przedmiot do siatki. Natomiast przedmioty wystające poza obręb sieci obliczeniowej zostaną odcięte na jej granicy, a graficzny interfejs Smokeview ich nie wyświetli.

Biblioteki danych

Poprzez odpowiednie wykorzystanie bibliotek materiałowych i innych odnoszących się do modelu, możliwe jest ograniczenie liczby błędów i usprawnienie procesu tworzenia nowych modeli. Do dyspozycji użytkownika są biblioteki reakcji i danych materiałowych, które wykonane zostały w oparciu o doświadczalne badania laboratoryjne. Każda z reakcji i danych materiałowych ma odniesienie w opisie na temat źródła danych [9].

Przeszkody

Przeszkody są głównymi elementami graficznymi w symulacjach FDS. Określają rozwój pożaru, jego możliwości przechodzenia i wydzielania się określonych ilości dymu. Za pomocą interfejsu PyroSim rysowane są jako prostokątne bryły określone przed dwa punkty. Właściwości powierzchni wyznaczane są na podstawie danych materiałowych utworzonej biblioteki.

Parametry pożaru, powierzchnie, wenty i reakcje

Każdy nowo utworzony obiekt w modelu wymaga określenia jego powierzchni. Pod pojęciem tym kryje się zadanie odpowiednich właściwości ciał

stałych, a w przypadku otworów odpowiednich wentów. Konieczne więc staje się indywidualne dobranie odpowiednich powierzchni materiałów mających różne właściwości cieplne i izolacyjne. Wykonanie ścian, sufitu, podłogi z tynku gipsowego przyczynia się do zupełnie odmiennego rozwoju pożaru, aniżeli w przypadku zastosowania drewna. Dużego znaczenia nabierają również reakcje zachodzące w trakcie spalania, ubytek masy i ilość wydzielanego ciepła. Podstawowym algorytmem matematycznym dla programu było przyjęcie, iż rozwój pożaru następuje zgodnie z funkcją kwadratową, do momentu uzyskania pełnej mocy.

Rejestratory danych

Jedną z najważniejszych cech symulacji FDS jest możliwość ciągłej rejestracji wielu parametrów wewnątrz sieci obliczeniowej oraz symulowania bardziej złożonych czujników i systemów wpływających na rozwój pożaru, np. tryskacze i zraszacze. W trakcie wykonywania modelu symulacyjnego zaimplementowane zostały trzy płaszczyzny monitorujące rozkład temperatury. Rozmieszczone zostały: na suficie, w osi mieszkania i równolegle do okna, przecinając środek źródła pożaru. Do celów badawczych wykorzystano również czujkę temperatury umieszczoną nad źródłem pożaru oraz czujkę dymu zlokalizowaną przy drzwiach wejściowych do pokoju.

Modelowanie stałych urządzeń gaśniczych

Aby w pełni wykorzystać możliwości, jakie daje program, przeprowadzone zostały dwie symulacje, dla których zadano te same zmienne, z wyjątkiem jednego z parametrów – tryskaczy. Pierwsza symulacja została wykonana bez stałych urządzeń gaśniczych, natomiast w drugiej dodany został tryskacz. Umiejscowienie tryskacza oraz zadanie jego parametrów zostało wykonane na podstawie normy [8].

Scenariusze pożarowe

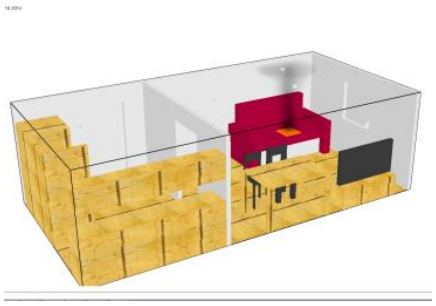
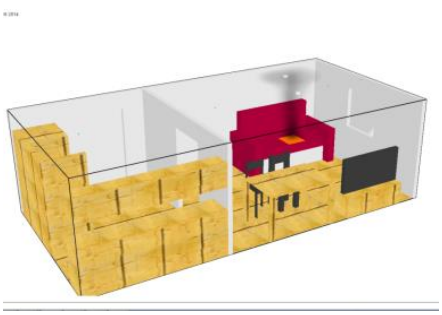
Na postawie posiadanych materiałów oraz przygotowanego modelu wykonane zostały dwie symulacje według odrębnych scenariuszy pożarowych:

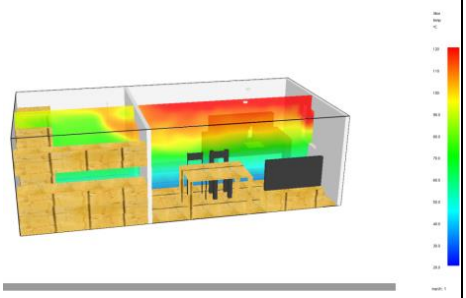
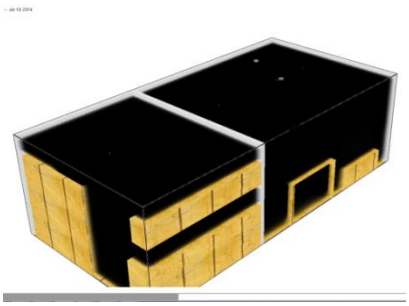
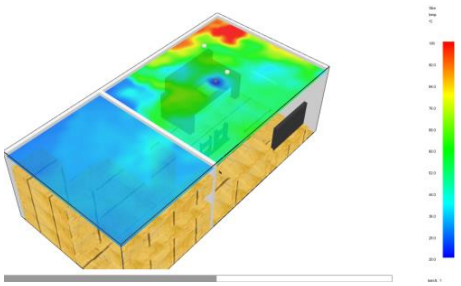
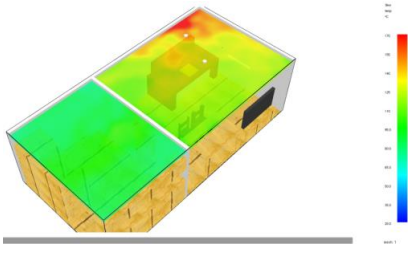
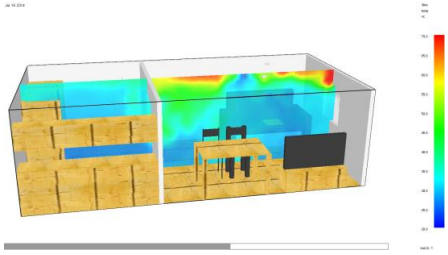
Pierwszy scenariusz pożarowy dotyczył odwzorowania rzeczywistego pożaru. Uwzględniono rozmieszczenie wielu składowych elementów wyposażenia mieszkania oraz zachodzące w nich reakcje mogące mieć wpływ na przebieg i rozwój pożaru. Podobnie jak w przypadku realnego zdarzenia pożar ograniczony został do powierzchni łóżka. Na podstawie ustaleń biegłych, jako przyczynę pożaru przyjęto żarzący się papieros, który spowodował zapalenie się materiałów wykończeniowych łóżka. Otrzymane wyniki symulacyjne zostały

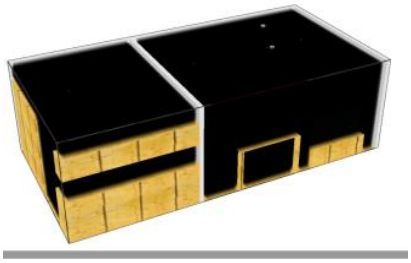
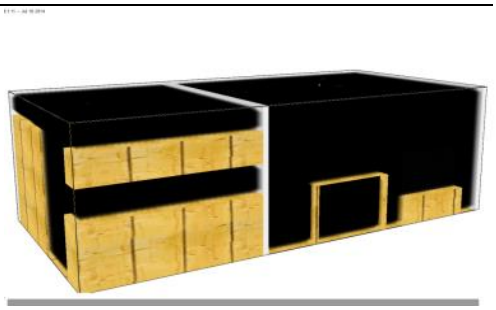
skonfrontowane z zdjęciami popożarowymi w celu weryfikacji przydatności komputerowych metod inżynieryjnych do prognozowania potencjalnych zagrożeń pożarowych.

Drugi scenariusz opracowano dla tego samego pomieszczenia oraz takich samych warunków zainicjowania pożaru. Jako dodatkową zmienną mającą wpływ na rozwój pożaru wprowadzono system zabezpieczający w postaci stałych urządzeń gaśniczych o parametrach zgodnych z wymaganiami adekwatnych przepisów i dokumentów normatywnych. Dla obu scenariuszy przyjęty czas trwania pożaru ustalono na poziomie 1080 sekund, a temperaturę początkową otoczenia wynoszącą 20°C, przyjęto gęstość mocy pożaru na poziomie 250 kW/m^2, która została osiągnięta po czasie 420 sekund.

Interpretacja graficzna symulacji

Scenariusz pożarowy nr 1	**Scenariusz pożarowy nr 2**
	
Rys. 4. Stan po czasie T=30 s, początek pożaru	Rys. 5. Stan po czasie T=30 s, początek pożaru
	
Rys. 6. Stan po czasie T=150 s, rozwój pożaru	Rys. 7. Stan po czasie T=150 s, rozwój pożaru

Scenariusz pożarowy nr 1	Scenariusz pożarowy nr 2
	
Rys. 8. Rozkład temperatury w miejscu pożaru względem płaszczyzny X	Rys. 9. Stan po czasie T=308 s, zadziałanie tryskacza.
	
Rys. 10. Stan po czasie T=420 s, osiągnięcie maksymalnej gęstości mocy pożaru i otwarcie okna	Rys. 11. Rozkład temperatury w miejscu pożaru względem płaszczyzny Z.
	
Rys. 12. Rozkład temperatury w miejscu pożaru względem płaszczyzny Z.	Rys. 13. Rozkład temperatury w miejscu pożaru względem płaszczyzny X.

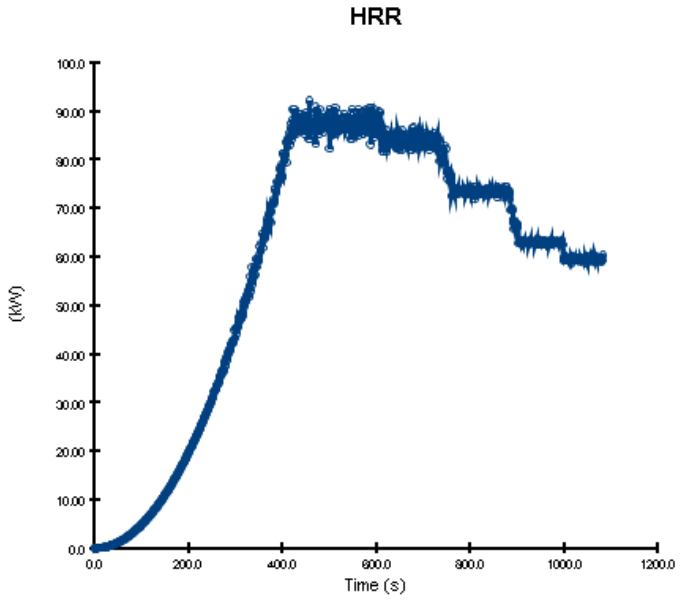
Scenariusz pożarowy nr 1	**Scenariusz pożarowy nr 2**
	
Rys. 14. Stan po czasie T=1080 s, Koniec symulacji	Rys. 15. Stan po czasie T=700 s, koniec pożaru.

Analiza wyników symulacji scenariusza pożarowego nr 1

Scenariusz rozwoju pożaru nr 1 odzwierciedla warunki panujące w obiekcie w czasie wystąpienia pożaru, a więc bez wyposażenia w systemy ochrony przeciwpożarowej. Do symulacji przyjęto skrajnie niekorzystną sytuację zakładającą, iż pożar może rozwijać się swobodnie przez 18 minut. Badanie rozpoczęto w momencie zainicjowania pożaru obicia łóżka w czasie t = 0,0 s. Po 30 sekundach widoczne były pierwsze cząsteczki dymu docierające do sufitu, a wzrost temperatury był niezauważalny w skali całego pomieszczenia. Niewidoczne były również płomienie oraz ubytek masy materiału. Z biegiem czasu następuje rozrost pożaru, wytworzona ilość dymu i ciepła gwałtownie wzrasta. Po upływie czasu t = 150 s połowa pomieszczenia w którym zainicjowany został pożar wypełniona została przez dym. Widoczny jest już niewielki płomień i wzrost temperatury w płaszczyźnie Y przebiegającej przez źródło pożaru. Kolejny punkt pomiarowy nastąpił w momencie osiągnięcia przez pożar maksymalnej mocy (t = 420 s). Płomień nabrał dużych rozmiarów, a temperatura w miejscu ogniska pożaru wyniosła ok. 370°C. Analizując rozkład temperatury względem płaszczyzny Y można zaobserwować duże ilości ciepła obejmujące swym zakresem źródło ognia oraz oparcie łóżka. Nastąpił proces przekazywania ciepła przez kondukcję i częściowo przez konwekcję. W strefie podsufitowej nad miejscem pożaru, temperatura osiągnęła 170°C. Natomiast w pozostałej poziomej przestrzeni pomieszczenia wartość ta oscyluje w granicach 110–125°C. W drugim pomieszczeniu poziom temperatury jest znacznie niższy i z biegiem czasu wzrasta. Wynika to z ograniczeń stawianych przez ściany, gdzie droga przepływu ciepła skupia się w obrębie drzwi. Dla płaszczyzny pionowej rozkład temperatury w osi pomieszczeń przebiega w sposób regularny. Największe nagromadzenie gorących mas powietrza znajduje się w stre-

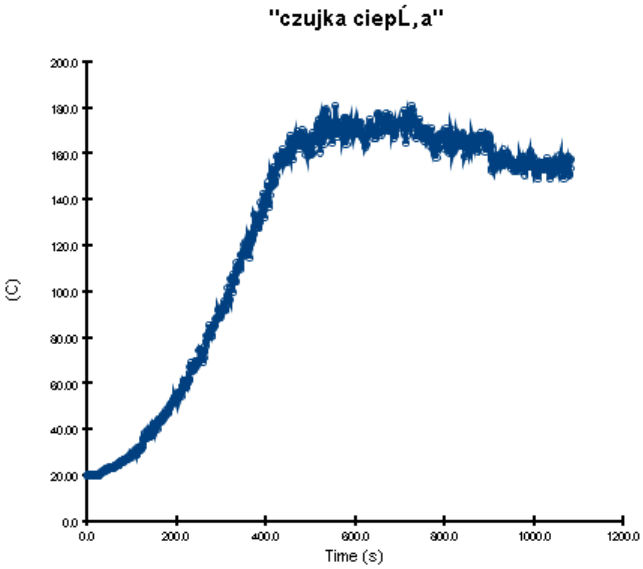
fie podsufitowej i wraz ze zmniejszeniem wysokości wartość temperaturowa maleje.

Następna próba pomiarowa miała miejsce w ¾ czasu trwania pożaru. Widoczne jest już pełne zadymienie pomieszczenia. Moc pożaru zmalała w wyniku procesu spalania tapicerki łóżka. Zauważalny jest również spadek temperatury w okolicach źródła pożaru. Względem płaszczyzny X temperatura w niższych partiach pomieszczenia osiągnęła wyższą wartość. Można dostrzec, że na wysokości dwóch metrów temperatura wynosiła ok. 110°C. Podobne zmiany możliwe są do zaobserwowania w strefie podsufitowej, gdzie również nastąpił wzrost temperatury na większym obszarze. Ostatnia próba miała miejsce na koniec badania dla czasu t = 1080 s. Widoczne jest dalsze utrzymywania się dużej ilości dymu. Podobnie jak w poprzednim pomiarze można zauważyć ubytek materiału wykończeniowego łóżka i spadek mocy pożaru. Potwierdzeniem tego jest charakterystyka HRR wykreślona przez program.



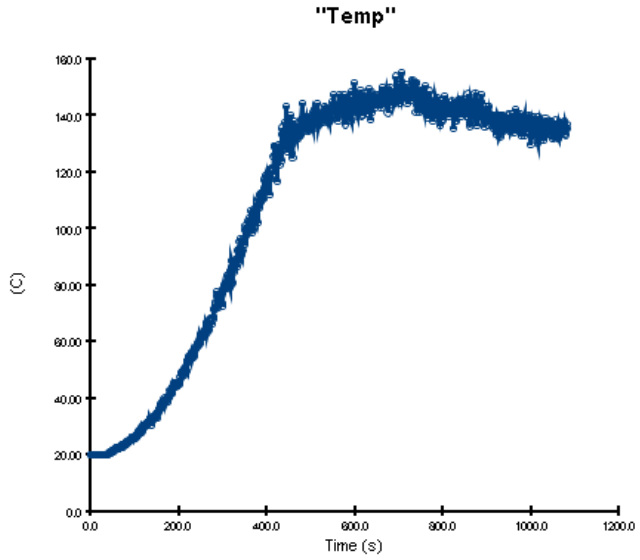
Rys. 16. Krzywa mocy pożaru w funkcji czasu

Zauważalny jest również spadek temperatury w każdej płaszczyźnie pożarowej, a w szczególności nad źródłem pożaru, gdzie umiejscowiona była czujka ciepła.



Rys. 17. Krzywa temperatury zarejestrowana przez czujkę pomiarową

Zmiany temperatury rejestrowane przez termopary pokazują, iż najwyższą temperaturę zanotowała pierwsza i druga termopara, które umiejscowione były najbliżej okna.



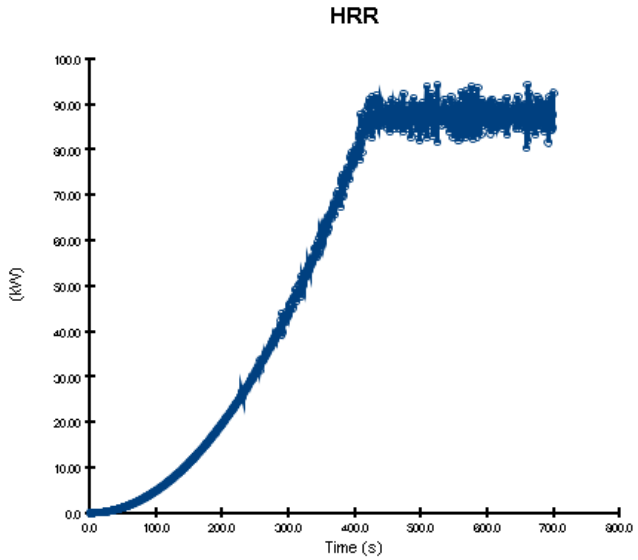
Rys. 18. Zmiany temperatury w punkcie termopary 1

Podobnie jak w przypadku graficznego obrazu przebiegu pożaru, analizując uzyskane charakterystyki można zauważyć, że pożar po ok. 800 s zaczął tracić na sile. Wnioskować można, iż mimo licznych materiałów palnych zgromadzonych w obrębie pożaru, nie nastąpiło jego dalsze przemieszczenie. Spowodowane to, być może ograniczeniami wynikającymi z samej charakterystyki programu bądź nieprawidłowo zadanymi warunkami brzegowymi. Porównując sam rozwój pożaru oraz ilość wytworzonego dymu z rzeczywistym zdarzeniem, stanowczo można stwierdzić, że wykonane symulacje odzwierciedlają faktyczny stan rzeczy. Rzucający się w oczy czarny osad na ścianach i meblach świadczyć może o występowaniu dużych ilości dymu, co w porównaniu z wynikami otrzymanymi w symulacji zdaje się potwierdzać poprawność wykonanych badań.

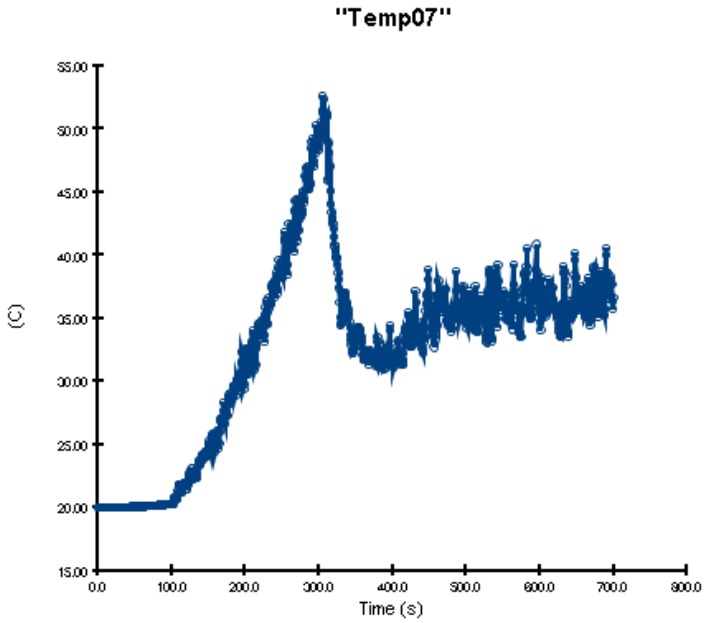
Analiza wyników symulacji scenariusza pożarowego nr 2

W oparciu o uzyskane wyniki symulacyjne wykonano jeszcze jedną serię badań. Drugi scenariusz pożarowy zakładał przeprowadzenie obliczeń komputerowych dla takich samych warunków początkowych inicjujących pożar oraz wprowadzenie do symulacji środków podwyższających bezpieczeństwo przeciwpożarowe, w postaci stałych urządzeń gaśniczych. Ten sposób badań posłużył do pełniejszego obraz wpływu czynników zewnętrznych na rozwój pożaru. Badanie rozpoczęto w momencie wystąpienia pożaru dla czasu t = 0,0 s. Jego przebieg wyglądał identycznie jak w scenariuszu nr 1, aż do czasu t = 308,0 s. Dla tego momentu symulacji temperatura znajdująca się w strefie podsufitowej w obrębie tryskacza przekroczyła wartość graniczą samej ampułki wynoszącą 74°C, doprowadzając do jej pęknięcia i wypływu wody. W początkowej fazie działania tryskacza, temperatura utrzymywała się na bardzo wysokim poziomie, dlatego niewidoczne są żadne rezultaty. W płaszczyźnie pomiarowej Y zauważalny jest duży strumień gorącego powietrza posiadający najwyższą uzyskaną temperaturę wynoszącą 170°C. Jednoznacznie można stwierdzić, iż pomimo nieosiągnięcia przez pożar swojej maksymalnej mocy, wydzielająca się temperatura wpłynęła na pełen rozwój pożaru (Rys. 19).

Po upływie czasu t = 420 s, widoczne są efekty oddziaływania wody na źródło pożaru. Wielkość płomieni wyraźnie zmalała w stosunku do symulacji nr 1 (Rys. 20). Dzięki zadziałaniu tryskacza w większości obszaru pomieszczenia rozkład wysokiej temperatury stanowczo się zmniejszył. Pojedyncze fragmenty widoczne są w rogu pomieszczenia, nad źródłem pożaru, jednak jej wartość jest niższa i wyniosła ok. 100°C, aniżeli dla badania nr 1. Symulacja została przerwana w 700 s, ponieważ dalsze działanie tryskacza nie powoduje całkowitego ugaszenia pożaru.



Rys. 19. Krzywa mocy pożaru w funkcji czasu



Rys. 20. Zmiany temperatury w punkcie termopary 4

Podsumowanie

Programy komputerowe znalazły zastosowanie w różnych aspektach szeroko pojętego bezpieczeństwa [1]. Od kilkunastu lat prowadzone są prace nad tym, aby możliwe było przewidzenie wystąpienia pożaru oraz jego skutków. Obecny rozwój techniki, możliwości komputerowych oraz posiadana wiedza w zakresie nauk ścisłych pozwala w pewnym zakresie na odwzorowanie rzeczywistego pożaru i jego następstw. Uzyskane wyniki symulacyjne w dużym stopniu odzwierciedlają przebieg pożaru. Należy jednak pamiętać, że tego typu programy wymagają posiadania szerokiej bazy zasobów materiałowych, ich reakcji na ogień, zmian wynikających z procesu pirolizy itp. oraz wielu zmiennych modelujących sam proces rozprzestrzeniania się ognia wpływający bezpośrednio na otrzymane wyniki. Przeprowadzone symulacje nie wykazały przemieszczania się ognia. Wnioskować można, że jest to spowodowane niewłaściwym zamodelowaniem samego źródła ciepła lub ograniczeniami, jakie posiada program. Ponadto, uzyskane temperatury i bliskie otoczenie materiałów łatwopalnych sugeruje przyspieszony proces pirolizy, a tym samym dalszy rozwój pożaru na znajdujących się w pobliżu ognia meblach i suficie. Niestety uzyskane wyniki nie dają odpowiedzi na to pytanie, niemniej jednak występowanie takich ograniczeń znacząco zawęża krąg potencjalnych odbiorców symulacji. Niezbędne staje się więc prowadzenie dalszych badań nad udoskonalaniem tego typu programów. Godny podkreślenia jest również fakt, iż pożar, jako zjawisko w żaden sposób niekontrolowane, podlega wielu bodźcom zewnętrznym, niemożliwym do przewidzenia na etapie projektowania w programie symulacyjnym. Konieczne zatem staje się interpretowanie uzyskanych wyników z pewną dozą zdrowego rozsądku.

Literatura

[1] Bajor T., Krakowiak M., Rydz D., Narzędzia komputerowe do prognozowania zdarzeń podczas sytuacji kryzysowych, Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne. Zmienność zagrożeń a innowacje w ratownictwie, (red.) Gil A., Nowacka U., Chmiel M., Centralna Szkoła Państwowej Straży Pożarnej w Częstochowie, Częstochowa, 2014.
[2] Bielecki P., Taktyka działań gaśniczych, Fundacja Edukacja i Technika Ratownictwa, Warszawa, 2004.
[3] Kociołek K., Fietz-Strychalska U., Półka M., Kołdej J., Król B., Fizykochemia spalania i środki gaśnicze, Fundacja Edukacja i Technika Ratownictwa, Warszawa, 2005.

[4] Kostrzewa S., Zastosowanie zaawansowanych metod inżynierskich w procesie projektowania bezpieczeństwa pożarowego obiektów na przykładzie programu PyroSim, AJD, 2015.
[5] Krakowiak M., Bajor T., Rydz D., Bezpieczeństwo przeciwpożarowe w budynkach wielokondygnacyjnych, Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne. Zmienność zagrożeń a innowacje w ratownictwie, (red.) Gil A., Nowacka U., Chmiel M., Centralna Szkoła Państwowej Straży Pożarnej w Częstochowie, Częstochowa, 2014.
[6] Krakowiak M., Warunki sprawnej i skutecznej ewakuacji, Analiza zagrożeń podstawą funkcjonowania współczesnej organizacji, (red.) Bajor T., Berski S., Monografie nr 71, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2017.
[7] McGrattan K., McDermott R., Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, NIST, USA, 2010.
[8] PN-EN 12845+A2:2010 Stałe urządzenia gaśnicze – Automatyczne urządzenia tryskaczowe -- Projektowanie, instalowanie i konserwacja.
[9] PyroSim 2011 Instrukcja obsługi, ver.2011.1, STIGO Sp. z o.o. Sp.k.