

mł. kpt. mgr inż. **Mateusz FLISZKIEWICZ**¹
mł. kpt. mgr inż. **Andrzej KRAUZE**¹
dr hab. inż. **Tadeusz MACIAK**²

MOŻLIWOŚCI STOSOWANIA PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH W INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO³

The possibility of applying computer programs in fire safety engineering

Streszczenie

W artykule przedstawiono ogólny zarys i problematykę związaną z wykorzystaniem programów komputerowych w zakresie analizy i prognozowania wybranych zagrożeń. Dokonano przeglądu oprogramowania i jego możliwości wykorzystania w świetle polskiego prawa. Szczególną uwagę skupiono na dwupoziomowej formule przepisów, która w przyszłości umożliwić będzie projektowanie obiektów budowlanych w oparciu o metody obliczeniowe. Opisano obszary, w których obecnie wykorzystuje się programy komputerowe w celu oszacowania bezpieczeństwa. Ponadto, autorzy omawiają podstawowe wymagania, jakie powinny spełniać programy do modelowania wybranego zagrożenia. W artykule przedstawiono możliwości programów komputerowych z zakresu modelowania rozwoju pożaru, modelowania zachowania się konstrukcji w czasie pożaru oraz modelowania skutków awarii przemysłowych. Dla każdej z wymienionych dziedzin przygotowano przegląd oprogramowania wraz ze spisem podstawowych funkcji. Zaproponowano wymagania dotyczące formy wprowadzania danych wejściowych oraz formy prezentacji danych wyjściowych. Wszystkie informacje zaprezentowano w formie tabel porównujących możliwości wybranych programów.

Summary

The article describes general outline and main problems connected with using computer programs for analysis and forecasting of selected threats. An overview of the software and its possibility to apply in the light of Polish law was presented. Particular attention is focused on the two-tier formula regulations, which in the future will allow to design buildings based on computational methods. The areas in which computer programs are used to assess safety are shown. In addition, the authors discuss the basic requirements to be met by the selected software. The article discusses the possibilities of software development in the field of fire modeling, modeling behavior of the structure during the fire, and modeling the effects of industrial accidents. For each of these areas overview of the software, together with a list of basic functions was prepared. Proposed requirements for input data entry form and presentation of the output were also discussed. All information is presented in the form of tables comparing the capabilities of selected programs.

Słowa kluczowe: inżynieria bezpieczeństwa pożarowego, modelowanie pożarów, bezpieczeństwo, przegląd oprogramowania;

Keywords: fire safety engineering, fire modeling, safety, software overview;

1. Wprowadzenie

Rozwój technologii komputerowych oraz związanych z tym zaawansowanych metod obliczeniowych, jak na przykład numeryczna mechanika płynów, pozwolił na zastosowanie komputerów do symulacji różnorodnych problemów inżynierskich, włączając w to m.in. pożary budynków czy też skut-

ki awarii przemysłowych. Obecnie dostępne modele numeryczne umożliwiają przeprowadzenie skomplikowanych obliczeń uwzględniających wpływ wielu czynników oddziałujących na bezpieczeństwo. Dają możliwość wykonywania globalnych analiz obejmujących dużą ilość procesów fizycznych i chemicznych. Poniżej wymieniono kilka najważniejszych gałęzi inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, do analizy których można wykorzystać programy komputerowe w celu rozwiązania problemów projektowych:

1. modelowanie rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu przy wykorzystaniu technik CFD (z ang.

¹ Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Katedra Techniki Pożarniczej, Zakład Informatyki i Łączności

² prof. SGSP, Politechnika Białostocka

³ Każdy ze współautorów wniósł równy wkład merytoryczny w powstanie artykułu (po 33%).

- Computational Fluid Dynamics*, czyli numeryczna mechanika płynów),
2. modelowanie ewakuacji,
 3. modelowanie zachowania się konstrukcji w czasie pożaru, przy wykorzystaniu technik FEM (z ang. *Finite Element Method*, czyli metoda elementów skończonych),
 4. modelowanie skutków awarii przemysłowych,
 5. modelowanie probabilistyczne na potrzeby szacowania ryzyka pożarowego,
 6. modelowanie zjawiska spalania i rozwoju pożaru na potrzeby analiz popożarowych.

Problematyka modelowania zagrożeń z zakresu bezpieczeństwa jest warta szczególnej uwagi, tym bardziej że współcześnie coraz częściej powstają obiekty budowlane o nietypowych funkcjach i układach architektonicznych. W związku z tym jednym z głównych problemów jest zaprojektowanie nowoczesnych budynków zgodnie z przepisami budowlanymi, które nie obejmują tak szerokiego zakresu szczegółowej problematyki technicznej. To z kolei zmusza do opracowania nowego podejścia do projektowania budynków bez ustalania konkretnych rozwiązań oraz obligatoryjnych sposobów osiągania wymaganych właściwości użytkowych. Takie ujęcie problemu przyczynia się do postępu w budownictwie poprzez zastosowanie m.in. odpowiednich narzędzi inżynierskich, jak np. symulacje komputerowe. Programy komputerowe ze względu na swoje szerokie możliwości mogą być stosowane do rozpatrywania skutków wielu zagrożeń, między innymi pożarów. Analiza rozprzestrzeniania się produktów spalania i rozkładu temperatury w budynku umożliwia określenie warunków panujących podczas pożaru oraz daje możliwość ustalenia czasu, po którym wystąpią warunki zagrażające życiu ludzi. Dodatkowo bezpośrednie wyznaczenie temperatury przegród lub sprawdzenie rozkładu temperatury pod stropem i jej zmian w trakcie pożaru umożliwia określenie bezpieczeństwa konstrukcji danego budynku. Kolejnym krokiem analizy inżynierskiej może być oszacowanie wymaganego czasu ewakuacji oraz porównanie go z wyznaczonymi warunkami krytycznymi ze względu na ewakuację i wytrzymałość konstrukcji.

Kolejnym obszarem analiz inżynierskich może być bezpieczeństwo w przemyśle. Dostępne modele numeryczne umożliwiają modelowanie awarii przemysłowych i ich skutków. Dobrym przykładem jest projektowanie wentylacji w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Obecnie najczęściej stosuje się metody analityczne podane w przepisach i normach dotyczących zapobiegania wybuchom [1, 2, 3]. Niestety przedstawione sposoby postępowania bazują na uśrednionych wartościach stężeń, zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. Nie jest możliwe obliczenie metodami analitycznymi pionowego rozkładu stężeń substancji o gęstości większej lub mniej-

szej od powietrza. Tymczasem stężenia te mogą znacznie różnić się na poszczególnych wysokościach. Ponadto nie jest możliwe precyzyjne określenie zasięgu strefy niebezpiecznej w dużych pomieszczeniach. Trudne jest też ustalenie maksymalnego stężenia substancji palnej w powietrzu usuwanym z pomieszczenia, w celu kwalifikacji wnętrza przewodów oraz przestrzeni za ich wylotem.

2. Zastosowanie symulacji komputerowych w kontekście wymagań przepisów przeciwpożarowych oraz warunków techniczno-budowlanych dla budynków

Zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami programy komputerowe, jako narzędzia inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, mogą być wykorzystywane w szczególności do rozwiązywania następujących zagadnień:

1. analizy rozwiązań niestandardowych w fazie projektowania obiektów, jako uzasadnienie przyjętych rozwiązań we wniosku o odstępstwo od przepisów techniczno-budowlanych, zgodnie z art. 9 ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz. U. z 2006 r. Nr 156, poz. 1118, z późniejszymi zmianami),
2. opracowania i uzasadniania rozwiązań niestandardowych w obiektach tj.:
 - a. warunków zamiennych zgodnie z zapisami rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów, czy też rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych,
 - b. warunków zastępczych według wymagań rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, a także rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 21.11.2005 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie,
3. teoretycznego sprawdzania skuteczności przyjętych rozwiązań w ramach koncepcji zabezpieczenia obiektu.

Ponadto w Komendzie Głównej Państwowej Straży Pożarnej zostały opracowane procedury [4], które zawierają zalecenia dotyczące zakresu i formy ekspertyz technicznych oraz wniosków w zakresie rozwiązań zastępczych i zamiennych, a także za-

sad postępowania komendantów wojewódzkich PSP związanych z uzgadnianiem tych koncepcji. Zgodnie z tymi zaleceniami, ekspertyza powinna zawierać m.in. część analityczno-ocenną, w której należy uzasadnić zastosowanie proponowanych rozwiązań. We wspomnianych wytycznych, Komenda Główna PSP zaleca, aby w uzasadnionych przypadkach stosować narzędzia inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, czyli np. komputerowe modele symulacyjne. W szczególności dotyczy to obiektów, dla których opracowuje się scenariusz pożarowy lub w których niemożliwe jest wykazanie w sposób niebudzący wątpliwości niepogorszenia warunków ochrony przeciwpożarowej bez przeprowadzenia dokładnej analizy oraz oceny warunków powstania i rozprzestrzeniania się pożaru z uwzględnieniem wpływu zastosowanych zabezpieczeń technicznych i organizacyjnych. W związku z tym według Komendy Głównej PSP, zasadne jest przeprowadzenie symulacji komputerowych w kontekście oceny warunków ewakuacji w obiektach o skomplikowanym układzie komunikacyjnym, w przypadku istotnych odstępstw od kryteriów określonych w przepisach.

Trzeba podkreślić, że obecnie toczą się prace nad zupełnie nową formułą przepisów techniczno-budowlanych dla budynków. Dwupoziomowa struktura (część obligatoryjna i opcjonalna) tych przepisów, która odpowiada najnowszym światowym trendom w tej dziedzinie, wprowadza ogromne ułatwienia w stosowaniu metod inżynierskich. Przede wszystkim ze względu na rezygnację z uciążliwej procedury odstępstw od obowiązujących warunków techniczno-budowlanych na rzecz przyjmowania innowacyjnych rozwiązań projektowych. Jeśli te przepisy wejdą w życie, znajdzie konieczność obiektywnego wykazania zgodności przyjętego rozwiązania z wymaganiami zawartymi w tej nowej, dwupoziomowej formule warunków techniczno-budowlanych. Takie obiektywne wykazanie zgodności będzie mogło nastąpić poprzez metody analityczne, metody eksperymentalne i wreszcie symulacje komputerowe, które dają bardzo szerokie możliwości sprawdzenia poziomu bezpieczeństwa w danym obiekcie. Jednocześnie symulacje komputerowe są sposobem bardzo praktycznym i funkcjonalnym, w odróżnieniu od metod np. eksperymentalnych. Na stronie internetowej Instytutu Techniki Budowlanej [5], przedstawiono propozycję nowej formuły warunków techniczno-budowlanych. Cały czas trwają konsultacje środowiskowe, przy czym warto zaznaczyć, że żaden z ich uczestników nie neguje przedstawionego zamierzenia. W związku z powyższym należy przypuszczać, że nowe przepisy zostaną wprowadzone w Polsce w nieodległym czasie. Niemniej jednak zapisy nowej formuły warunków techniczno-budowlanych mogą być dzisiaj traktowane jako zasady wiedzy technicznej (szczególnie w kwestiach nieuregulowanych przez aktualne przepisy) [6].

Wprowadzenie dwupoziomowej formuły warunków techniczno-budowlanych w Polsce jest wzorowane na metodach i doświadczeniach kanadyjskich. W Kanadzie wprowadzenie przepisów przeciwpożarowych opartych na wymaganych właściwościach użytkowych poprzedzone było długimi konsultacjami. Warto również podkreślić wyjątkowe zaangażowanie środowisk, uczestniczących w tych pracach, co dodatkowo pozwoliło na przygotowanie wytycznych dotyczących stosowania nowoczesnych metod projektowych. Wdrożenie wspomnianych przepisów trwało prawie dziesięć lat. Efektem było uzgodnienie tzw. przepisów modelowych (*Model Codes*) w kształcie odpowiadającym wszystkim zainteresowanym stronom, w tym również poszczególnym stanom kanadyjskim. Taki sposób formułowania zapisów prawa jest charakterystyczny także dla USA. We wspomnianym kraju przepisy są opracowywane przez niezależne instytucje, takie jak np. ICC (*International Code Council*), czy NFPA (*National Fire Protection Association*). Po pięciu latach od momentu publikacji przepisów, władze kanadyjskie rozpoczęły monitorowanie efektów ich funkcjonowania. Okazało się, że środowiska projektantów oraz osób związanych z ochroną przeciwpożarową wysoko oceniają przejrzystą strukturę nowych przepisów. Taka konstrukcja prawa pozwala na lepsze zrozumienie wymagań osobom odpowiedzialnym za ich egzekwowanie. Prowadzi to do większej otwartości na innowacyjne rozwiązania. Podobne zmiany w formule warunków techniczno-budowlanych, wprowadzono w Republice Południowej Afryki. Uwagę zwraca fakt, że w tym kraju przepisy oparte na wymaganych właściwościach użytkowych funkcjonują już od 20 lat. Niestety w RPA wyraźnie zarysowały się liczne trudności w stosowaniu tychże przepisów. Głównym problemem jest brak specjalistycznych kierunków kształcenia na uczelniach. Z tego względu osoby uczestniczące w procesie projektowania są zmuszone do zdobywania wiedzy oraz kwalifikacji za granicą. Ponadto brak doświadczenia i wiedzy w tym kraju, nie sprzyja tworzeniu norm lokalnych i zmusza do korzystania z uznanych standardów światowych. Prowadzi to bardzo często do mieszania wymagań oraz szczególnych rozwiązań technicznych ze standardów opracowanych w różnych krajach. Niestety często wpływa to negatywnie na poziom bezpieczeństwa. Wydaje się, że już w tej chwili problem ten przynajmniej częściowo pojawia się również w Polsce. W związku z powyższym w naszym kraju konieczne wydaje się podjęcie kroków zmierzających do podniesienia m.in. standardów kształcenia osób, które mają udział w projektowaniu budynków [7].

3. Wymagania dla programów CFD przeznaczonych do modelowania pożarów

Proces zapobiegania pożarom wewnętrznym, wymaga nieustannego doskonalenia. Występujący aktualnie dynamiczny postęp techniczny i związany z nim rozwój, dotyczący przede wszystkim budownictwa niosą nowe wyzwania w obszarze bezpieczeństwa pożarowego. Powstające rozległe centra handlowe mogą skupiać w okresach zwiększonego ruchu nawet kilkanaście tysięcy osób. Powstaje coraz więcej budynków wysokościowych, nie tylko użyteczności publicznej, ale również mieszkalnych. Pojawiła się nowa grupa obiektów, wcześniej w Polsce niespotykanych, a mianowicie centra logistyczne, czyli wielkokubaturowe obiekty magazynowe, o znacznym nagromadzeniu materiałów palnych. Wszystko to przyczynia się nie tylko do konieczności odpowiedniego przygotowania do zwalczania związanych z tym niebezpiecznych pożarów, ale także wymaga nasilenia działań prewencyjnych, zarówno na etapie projektowania, jak i eksploatacji obiektów, w tym przeprowadzania analiz i prognoz zagrożenia w oparciu o nowoczesne narzędzia informatyczne. Programy przeznaczone do symulacji rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu, powinny umożliwiać modelowanie szeregu zjawisk fizycznych, do których można zaliczyć:

1. modelowanie zjawiska rozprzestrzeniania się dymu oraz gorących gazów pożarowych przy określonych przez użytkownika warunkach brzegowych,
2. modelowanie wpływu instalacji oddymiania (grawitacyjnego, mechanicznego, strumieniowego) na rozprzestrzenianie się dymu lub weryfikacji efektywności wymienionych instalacji,
3. modelowanie zadziałania tryskaczy oraz ich wpływu na rozwój pożaru (obecnie ze względu na złożoność procesu gaszenia powyższe zjawisko jest dość mocno ograniczone, ponieważ wymaga zaimplementowania modelu fazy rozproszonej tj. kropli wody),
4. określenie czasu zadziałania czujek dymu i ciepła oraz wpływu ich zadziałania na warunki brzegowe (np. uruchomienie wentylatorów, otwarcie klap dymowych).

Programy CFD przeznaczone do zastosowań w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego powinny posiadać co najmniej dwa podstawowe modele turbulencji tj. model RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) oraz model LES (*Large Eddy Simulation*). Model turbulencji RANS umożliwia modelowanie pożarów na potrzeby szybkiej weryfikacji (krótki czas obliczeń i małe wymagania sprzętowe), jak również na potrzeby weryfikacji wentylacji strumieniowej (umożliwia najlepsze odzwierciedlenie warunków rzeczywistych przy wykorzystaniu nie-

dużych mocy obliczeniowych). W przypadku modelu RANS równania Naviera-Stokesa są uśrednione w czasie, dlatego w ten sposób otrzymane równania nie dążą do rozwiązania bezpośrednio ruchu turbulentnego, ale do dostarczenia uśrednionych w czasie charakterystycznych wielkości przepływów. Dlatego też w przypadku tego modelu obszar obliczeniowy nie musi być bardzo dokładnie podzielony, żeby uchwycić najważniejsze uśrednione w czasie właściwości przepływów. Do najczęściej stosowanych modeli RANS należą: k-epsilon, k-omega, Spalart-Allmaras. W inżynierii bezpieczeństwa pożarowego zazwyczaj używa się modelu k-epsilon. Z kolei model turbulencji LES daje możliwość wnikliwej weryfikacji zjawiska pożaru poprzez odpowiednio dokładne podzielenie obszaru obliczeniowego. W przypadku modelu LES wszystkie przepływy turbulentne oprócz tych najmniejszych, których wielkość jest mniejsza od pojedynczej komórki obliczeniowej, są rozwiązywane przez równania Naviera-Stokesa. Najdokładniejsze (najmniejsze) wiry są pomijane. Model LES może być również wykorzystany do modelowania wentylacji strumieniowej, jednakże wymaga to bardzo dokładnego podzielenia obszaru obliczeniowego, a co za tym idzie, zachodzi potrzeba dużego wzrostu mocy obliczeniowej komputerów. Do najczęściej stosowanych należą: Smagorinsky-Lilly, Dynamic Smagorinsky-Lilly. W inżynierii bezpieczeństwa pożarowego wykorzystuje się model Smagorinsky-Lilly. Wszystkie ruchy turbulentne są rozwiązywane poprzez bezpośrednie rozwiązanie równań Naviera-Stokesa. Aby skutecznie używać modelu DNS niezbędne jest bardzo dokładne podzielenie obszaru obliczeniowego, jak również posiadanie bardzo dużych mocy obliczeniowych [8].

Ponadto oprogramowanie powinno posiadać modele spalania dyfuzyjnego, składników niezmieszanych wstępnie – „*non-premixed combustion*” (taki sposób spalania zachodzi w pożarach). Nie jest konieczne stosowanie modelu spalania kinetycznego. Do najczęściej wykorzystywanych modeli spalania dyfuzyjnego należą: „*Mixture Fraction*” oraz „*Finite-Rate Reaction*”. Model spalania dyfuzyjnego nie opisuje samego procesu spalania, jednakże zamiast tego uzyskuje się końcowy efekt tego procesu, czyli produkcję ciepła i dymu (poprzez narzucenie charakterystycznego, równomiernego rozkładu tych parametrów na określonej objętości). Parametry te powinny odpowiadać przewidywanemu pożarowi, który może powstać w danym pomieszczeniu lub obiekcie, a jego wielkości powinny być określone na podstawie eksperymentalnych doświadczeń lub aktów normatywnych. We wspomnianym modelu możliwe jest zdefiniowanie różnych materiałów palnych na potrzeby reakcji spalania, jednakże w symulacji może być wykorzystany tylko jeden rodzaj paliwa. Model przyjmuje, że paliwo miesza

się z powietrzem w sposób idealny i jednocześnie z mieszaniami zachodzi spalanie. Głównym ograniczeniem takiego podejścia jest moc obliczeniowa komputerów oraz złożoność rozwiązywanych równań w przypadku wielu rodzajów paliwa. Trzeba zauważyć, że to jeden z łatwiejszych sposobów przedstawienia źródła pożaru, jednakże na potrzeby inżynierii pożarowej jest on wystarczający. „*Finite-Rate Reaction*” to model, który znajduje również zastosowanie w przypadku wykorzystania modelu turbulencji DNS, gdzie bardzo dokładny podział obszaru obliczeniowego umożliwiłby bezpośrednie modelowanie dyfuzji cząsteczek chemicznych (paliwo, tlen i produkty spalania). Jeżeli model płomienia jest rozwiązywany w bezpośrednich obliczeniach DNS, wtedy lokalna temperatura gazu może być użyta do określenia kinetyki reakcji spalania. W ten sposób możliwe jest zaimplementowanie względnie prostego zbioru jednej lub wielu reakcji chemicznych do modelu spalania [8].

Model transportu ciepła przez promieniowanie stosowany w symulacjach pożarowych powinien uwzględniać podział pasma promieniowania na przedziały, odpowiadające częstotliwościom emisji dla poszczególnych produktów spalania (pary wodnej, tlenku i dwutlenku węgla, popiołu), a w pewnych przypadkach także gazu pirolitycznego. Poza płomieniem intensywność promieniowania powinna być obliczana z prawa Stefana-Boltzmana, natomiast w bezpośrednim sąsiedztwie płomienia taki sposób liczenia powoduje duże błędy niedoszacowania ze względu na uśrednienie temperatury płomienia po całej komórce (jest ona niższa niż w rzeczywistości). Model powinien uwzględniać korekcję tego zjawiska. Modele promieniowania mające zastosowanie w procesach spalania to: P-1 lub DO (*Discrete Ordinates*). Model DO jest najbardziej odpowiedni, ponieważ uwzględnia podział pasma promieniowania na przedziały [8].

Oprogramowanie powinno umożliwiać definiowanie właściwości fizycznych i pożarowych elementów konstrukcyjnych budynków, jak również znajdującego się w nim wyposażenia, które może wpływać na rozprzestrzenianie się ciepłych gazów pożarowych poprzez odbieranie temperatury. Do parametrów tych należy zaliczyć m.in. gęstość materiału, ciepło właściwe, przewodność właściwą. W oprogramowaniu powinna być możliwość definiowania warunków atmosferycznych, a w szczególności: ciśnienia atmosferycznego, wilgotności powietrza, kierunku i siły wiatru oraz temperatury powietrza. Aplikacje przeznaczone do symulacji pożarów powinny umożliwiać wprowadzenie odpowiedniej reakcji spalania oraz właściwości materiałów spalanych, a w szczególności:

1. skład chemiczny paliwa,
2. ciepło rozkładu i spalania paliwa,

3. ułamek masowy dymu, warunkujący ilość powstającego dymu z 1 kg spalonego paliwa,
4. gęstość optyczna dymu, warunkująca intensywność pochłaniania promieniowania widzialnego przez dym o danym stężeniu,
5. ułamek masowy tlenku węgla, warunkujący ilość powstającego tlenku węgla z 1 kg spalonego paliwa.

Oprogramowanie powinno posiadać możliwość wprowadzania następujących geometrii: prostych geometrii opartych o siatkę kartezjańską (prostokątną), powierzchni zakrzywionych wykorzystywanych do modelowania np. tuneli, nietypowych obiektów użyteczności publicznej o nieregularnych kształtach (poprzez zastosowanie siatki czworokątnej lub wielokątnej). Ponadto powinna istnieć opcja importowania geometrii z rysunków CAD (*Computer Aided Design*), przy pomocy popularnych formatów, takich jak: STEP (*Standard for the Exchange of Product model data*), IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*), DXF (*Data Exchange Format*) oraz DWG (*Drawing*). Ponadto oprogramowanie powinno umożliwiać definiowanie właściwości czujek i tryskaczy.

Oprogramowanie musi umożliwiać otrzymanie następujących wyników symulacji:

1. temperatury,
2. zasięgu widzialności,
3. nad/podciśnienia,
4. prędkości przepływu gazów,
5. stężenia toksycznych i obojętnych gazów np. CO, O₂, CO₂, N₂,
6. mocy pożaru,
7. gęstości gazów,
8. czasu zadziałania tryskaczy, czujek dymu i temperatury.

Przy wykorzystaniu funkcji programu powinno być możliwe otrzymanie powyższych wartości za pomocą punktu pomiarowego, przekroju w dowolnym miejscu obszaru obliczeniowego, a także trójwymiarowej wizualizacji rozkładu badanych parametrów.

3.1. Proponowane oprogramowanie do zastosowań w symulacjach pożarów wewnętrznych

Programy umożliwiające modelowanie CFD należy podzielić na dwie grupy, tj. oprogramowanie ogólnego przeznaczenia oraz oprogramowanie dedykowane dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Opisane powyżej wymagania odnoszą się do oprogramowania dedykowanego, ponieważ w większości programów ogólnego przeznaczenia wykorzystujących modele numerycznej mechaniki płynów dostępnych jest o wiele więcej modeli turbu-

lencji, transportu promieniowania, czy też spalania. Programy te umożliwiają modelowanie każdego rodzaju przepływów bez względu na rodzaj substancji, która jest definiowana przez użytkownika.

Programy bazujące na numerycznej mechanice płynów – ogólnego przeznaczenia:

1. PHOENICS FLAIR,
2. ANSYS FLUENT,
3. ANSYS CFX,
4. STAR-CD,
5. OPENFOAM.

Programy bazujące na numerycznej mechanice płynów – dedykowane dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego:

1. FDS,
2. JASMINE,
3. SMARTFIRE,
4. KOBRA 3D,
5. KAMELEON,
6. SOFIE.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące oprogramowania dedykowanego dla inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

4. Wymagania dla programów przeznaczonych do modelowania zachowania się konstrukcji w czasie pożaru

4.1. Wymagania stawiane proponowanemu oprogramowaniu w zakresie modelowania zjawisk fizycznych oraz posiadanych modeli obliczeniowych

Modele stosowane w ocenie zachowania się konstrukcji w czasie pożaru, muszą być modelami zaawansowanymi, czyli umożliwiać globalną analizę całości konstrukcji, a nie tylko wyizolowanych elementów. W tym wypadku najwłaściwszą metodą dyskretyzacji konstrukcji rozpatrywanego obiektu jest metoda elementów skończonych (MES). Oprogramowanie powinno umożliwiać analizę zarówno elementów stalowych, jak i zespolonych. Niezbędne jest posiadanie funkcji modelowania odpowiedzi termicznej, tj. nieustalonego (zmiennego w czasie) przewodzenia ciepła (w dwóch lub trzech wymiarach). Do przeprowadzenia właściwej analizy, wykorzystywany program musi również umożliwiać szerokie modelowanie odpowiedzi mechanicznej, jak np.:

1. nieustalonych (zmiennych w czasie) stanów naprężeń – odkształceń,
2. analizy stanu naprężeń – odkształceń w dwóch i trzech wymiarach,
3. rozwiązywania zagadnień nieliniowych (odkształcenia plastyczne),

4. definiowania właściwości fizycznych materiałów (ciepło właściwe, przewodnictwo, gęstość, moduł Younga, granica plastyczności) jako funkcji temperatury.

Ponadto w programie powinna być zapewniona możliwość importu danych temperaturowych (promieniowanie oraz konwekcja w funkcji czasu) z modeli CFD i strefowych.

4.2. Wymagania dotyczące wprowadzania danych wejściowych oraz warunków brzegowych

Funkcje oprogramowania muszą umożliwiać wprowadzanie geometrii konstrukcji obiektu wraz z detalami konstrukcyjnymi (np. przekrojami elementów). Kolejnym ważnym wymogiem jest możliwość definiowania właściwości fizycznych materiałów w funkcji temperatury. Dodatkowo niezbędnymi opcjami w zakresie wprowadzania warunków brzegowych jest definiowanie przyłożonych sił, przemieszczeń, temperatury, a także strumieni ciepła oraz ich zmiany w czasie (na skutek zniszczenia części konstrukcji).

4.3. Wymagania dotyczące danych wyjściowych oraz formy ich prezentacji

Oprogramowanie musi umożliwiać otrzymanie rozkładu naprężeń i odkształceń w elementach w funkcji czasu, rozkładu temperatury w elementach w funkcji czasu, a także czasu do przekroczenia poszczególnych parametrów krytycznych w każdym elemencie. Wskazane jest posiadanie możliwości prezentacji za pomocą punktu pomiarowego, przekroju w dowolnym miejscu obszaru obliczeniowego, a także trójwymiarowej wizualizacji rozkładu badanych parametrów.

4.4. Proponowane oprogramowanie służące do modelowania zachowania się konstrukcji w czasie pożaru

Dostępne modele można podzielić na programy wykorzystujące MES (Metoda Elementów Skończonych) ogólnego przeznaczenia oraz służące do analizy wytrzymałości konstrukcji w czasie pożaru. Do modeli ogólnego przeznaczenia należą: ANSYS, ALGOR, ABAQUS oraz NASTRAN. Do programów mających zastosowanie w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego należy program: SAFIR. W tabeli 3. przedstawiono krótką charakterystykę wymienionych programów.

Tabela 1.

Zestawienie funkcji programów przeznaczonych do modelowania pożarów

Table 1.

List of features software intended to fire modeling

Model, funkcja, cecha	FDS	JASMINE	SMARTFIRE
Producent	National Institute of Standards & Technology	Building Research Establishment	Fire Safety Engineering Group, The University of Greenwich
Kraj	USA	Wielka Brytania	Wielka Brytania
Licencja	open source	Akademicka/komercyjna	Akademicka/komercyjna
Przeznaczenie	Modelowanie wolnych przepływów wyporowych, szczególnie pożarów	Modelowanie pożarów i działania urządzeń przeciwpożarowych	Modelowanie pożarów wewnętrznych
Obliczenia równoległe	MPI, OpenMP	-	możliwe
Interfejs graficzny	Komercyjny: np. Pyrosim	Josefine	posiada
Preprocesor	brak	brak danych	posiada
Rząd metody	2	1	brak danych
Metoda dyskretyzacji	FD (z ang. Finite Difference – metoda różnic skończonych)	FV (z ang. Finite Volume – objętości skończonych)	FV (z ang. Finite Volume – objętości skończonych)
Rodzaje siatek	Regularna sześcienna	Regularna sześcienna	Regularna sześcienna, możliwe stosowanie siatek nieregularnych
Import CAD (formaty)	Z DWG przez nakładkę na AutoCAD-a	brak danych	DXF
Modele turbulencji	LES Smagorinsky, DNS	RANS k-epsilon z modyfikacją dla wyporu	RANS k-epsilon z modyfikacją dla wyporu
Modele spalania	Mixture fraction, Finite Rate	eddy-break-up model, laminar flamelet model	SCRS (Simple Chemical Reaction Scheme)
Modele promieniowania	DO (z ang. Discrete Ordinates – model rzędnych dyskretnych), gaz szary z 6 lub 9 przedziałami częstotliwości	six flux model, DTRM (z ang. Discrete Transfer Radiation Model – model dyskretny transferu promieniowania)	Radiosity, Six Flux, Multi Ray
Parametry czujek i tryskaczy	możliwe	możliwe	możliwe
Faza rozproszona – interakcja kropli wody z płomieniem	możliwe	możliwe	możliwe
Wpływ urządzeń ppoż. na warunki brzegowe	możliwe	-	możliwe
Walidacja	[9]	[14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23]	[24], [25], [26], [27]
Dokumentacja	[10], [9], [11], [12], [13]	[23]	[28]

Tabela 2.

Zestawienie funkcji programów przeznaczonych do modelowania pożarów

Table 2.

List of software features intended to fire modeling

Model, funkcja, cecha	KAMELEON KFX	KOBRA 3D	FLAIR	SOFIE
Producent	FireEx	Integrierte Sicherheits-Technik GmbH	CHAM	Kranfield University
Kraj	Norwegia	Niemcy	Wielka Brytania	Wielka Brytania
Licencja	Akademicka/komercyjna	komercyjna	komercyjna	Akademicka/komercyjna
Przeznaczenie	Pożary i dyspersja gazów	Modelowanie pożarów wewnętrznych	Wentylacja, jakość powietrza	Modelowanie pożarów wewnętrznych
Obliczenia równoległe	-	-	możliwe	-
Interfejs graficzny	posiada	-	posiada	posiada
Preprocesor	posiada	posiada	posiada	-
Rząd metody	brak danych	-	-	1 i 2
Metoda dyskretyzacji	FV (z ang. Finite Volume – objętości skończonych)	-	-	FV (z ang. Finite Volume – objętości skończonych)
Rodzaje siatek	-	-	Regularna sześcienna, nieregularna	-
Import CAD (formaty)	IGES, PDS, PDMS	-	-	-
Modele turbulencji	RANS k-epsilon	LES Smagorinsky	RANS k-epsilon	RANS k-epsilon z modyfikacją dla wyporu

Model, funkcja, cecha	KAMELEON KFX	KOBRA 3D	FLAIR	SOFIE
Modele spalania	EDC (Eddy Disipation Concept)	-	-	-
Modele promieniowania	DTRM (z ang. Discrete Transfer Radiation Model – model dyskretny transferu promieniowania)	-	IMMERSOL	DTRM (Discrete Transfer Radiation Model) z WSGGM (Weighted Sum of Gray Gas Model)
Parametry czujek i try-skaczy	możliwe	możliwe	-	-
Faza rozproszona – interakcja kropli wody z płomieniem	możliwe	możliwe	możliwe	-
Wpływ urządzeń ppoż. na warunki brzegowe	możliwe	możliwe	-	-
Walidacja	[31], [32], [33]	[34], [35], [36], [37], [38], [39], [40]	-	[44], [45], [46], [47], [48], [49], [50]
Dokumentacja	[29], [30]	[41]	[42], [43]	[51]

Tabela 3.

Zestawienie funkcji programów do modelowania zachowania się konstrukcji

Table 3.

List of software features intended to modeling behaviour of building structures

Model lub cecha	ANSYS	ALGOR	ABAQUS	NASTRAN	SAFIR
Producent	Ansys, Inc (USA)	ALGOR, Inc. (USA)	SIMULIA, the Dassault Systèmes (USA)	NEi Software (USA)	University of Liege (Belgia)
Licencja	komercyjna	komercyjna	komercyjna	komercyjna	komercyjna
Metoda modelowania	MES (Metoda Elementów Skończonych)	MES (Metoda Elementów Skończonych)	MES (Metoda Elementów Skończonych)	MES (Metoda Elementów Skończonych)	MES (Metoda Elementów Skończonych)
Analiza termiczna i mechaniczna w trzech wymiarach	tak	tak	tak	tak	tak
Stany nieustalone	tak	tak	tak	tak	tak
Zagadnienia nieliniowe	tak	tak	tak	tak	tak
Możliwość definiowania właściwości elementów w funkcji czasu	tak	tak	tak	tak	tak

5. Wymagania dla programów przeznaczonych do modelowania skutków awarii przemysłowych

5.1. Wymagania stawiane proponowanemu oprogramowaniu w zakresie modelowania zjawisk fizycznych oraz posiadanych modeli obliczeniowych

Programy przeznaczone do oceny skutków awarii przemysłowych, powinny umożliwiać modelowanie następujących zagrożeń:

1. uwolnienia i dyspersji substancji niebezpiecznych (cieczy i gazów, palnych i toksycznych),
2. pożarów substancji palnych (dotyczy to pożarów rozlewisk cieczy palnych i strumieni gazu palnego ze zbiornika pod ciśnieniem),
3. wybuchów (zarówno mieszanin gazów palnych z powietrzem, jak również materiałów wybuchowych w postaci stałej),

4. wzajemnego oddziaływania (efekt domino, czyli możliwość uszkodzenia zbiornika z substancją niebezpieczną na skutek promieniowania cieplnego lub nadciśnienia wybuchu zbiornika sąsiedniego).

Poniżej przedstawiono wymagania dla programów w zakresie możliwości modelowania różnych rodzajów emisji, dyspersji, pożarów, wybuchów, a także przewidywania efektu domino.

Oprogramowanie powinno umożliwiać modelowanie następujących rodzajów emisji (ze względu na czas oraz ze względu na stan skupienia):

1. chwilowej (uwolnienie całej substancji w jednym momencie np. rozerwanie zbiornika),
2. ciągłej (substancja wydostaje się ze zbiornika przez nieszczelność lub paruje z rozlewiska),
3. gazu sprężonego (będącego w postaci gazowej niezależnie od ciśnienia, np. sprężony metan),
4. gazu skroplonego (ciecz wrząca – substancja w postaci gazowej pod ciśnieniem atmosferycznym)

- nym skraplająca się pod większym ciśnieniem, np. LPG, chlor),
5. cieczy niewrzającej (każda substancja będąca w postaci ciekłej pod ciśnieniem atmosferycznym np. benzyna, olej napędowy).

Programy muszą posiadać zaimplementowane modele dyspersji:

1. dla gazów lekkich – gęstość względem powietrza mniejsza niż 0,8 (takie gazy jak wodór, metan),
2. gazów pasywnych – gęstość względem powietrza pomiędzy 0,8 a 1,1 (gazy takie jak tlenek węgla),
3. gazów ciężkich – gęstość względem powietrza większa niż 1,1 (gazy takie jak chlor, pary benzyny, spirytusu).

Funkcje oprogramowania powinny umożliwiać modelowanie pożarów cieczy palnej z rozlewiska, zbiornika, a także pożarów strumieniowych (*jet*). Ponadto możliwości aplikacji muszą obejmować modelowanie wybuchów fazy skondensowanej (materiały wybuchowe) oraz wybuchów chmury gazu palnego (wewnątrz i w bezpośrednim sąsiedztwie budynków, na otwartym terenie, wybuchy BLEVE – *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*). Niemniej ważnym zagadnieniem jest przewidywanie efektu domino jako zniszczenia sąsiedniego zbiornika wskutek promieniowania cieplnego pożaru lub wskutek nadciśnienia wybuchu. Wymagane są dwa podstawowe tryby obliczeń. Pierwszy to tryb planowania (systematyczna analiza potencjalnej awarii, czas obliczeń może być dłuższy, użytkownik zna wszystkie parametry mające wpływ na wynik), natomiast drugi to tryb działań ratowniczych (symulacje na potrzeby trwającego zdarzenia, wiele parametrów jest domyślnych, obliczenia niezależnie od klasy posiadanego komputera nie powinny trwać dłużej niż kilka sekund).

5.2. Wymagania dotyczące wprowadzania danych wejściowych oraz warunków brzegowych

W zakresie wprowadzania danych wejściowych, w przypadku modelowania emisji, wskazana aplikacja powinna umożliwiać definiowanie:

1. substancji i jej parametrów początkowych (początkowa temperatura, ciśnienie w zbiorniku, stan skupienia),
2. warunków meteorologicznych,
3. geometrii zbiornika, rozlewiska, szczelności, rodzaju podłoża (czy zbiornik jest poziomy czy pionowy, jakie ma wymiary, na jakiej wysokości względem lustra cieczy i podłoża jest otwór).

Funkcje aplikacji w obszarze definiowania danych wejściowych dla dyspersji muszą zapewnić możliwość wprowadzania:

1. prędkości i kierunku wiatru,

2. temperatury, ciśnienia, wilgotności oraz zachmurzenia,
3. klasy stabilności atmosfery (w zależności od stopnia turbulencji wyróżnia się kilka klas stabilności, im atmosfera bardziej stabilna, tym słabsze jest mieszanie i tym większe zasięgi obłoków substancji),
4. szorstkości podłoża (uśredniona – w zależności czy przepływ jest po powierzchni wody, polu, lesie, czy np. w mieście),
5. dokładnej geometrii terenu, z uwzględnieniem rzeźby i pokrycia (dotyczy możliwości wprowadzania konkretnych budynków, wzniesień, obniżeń terenu).

Opcje programu, w przypadku modelowania pożaru, powinny również umożliwiać definiowanie kierunku i siły wiatru. Ponadto dla rozlewiska musi istnieć funkcja określania wielkości oraz szybkości wypływu cieczy palnej. W zakresie wprowadzania danych wejściowych dla modelowania wybuchów chmury gazu palnego aplikacja musi umożliwiać definiowanie kształtu chmury w momencie zapłonu otrzymanego z obliczeń uwolnienia, momentu zapłonu, wpływu geometrii i przeszkód na przebieg wybuchu, a także wpływu ukształtowania terenu na przebieg wybuchu. Natomiast dla BLEVE ilości substancji biorącej udział w wybuchu oraz prędkości i kierunku wiatru. Dla fazy skondensowanej wystarczy opcja definiowania masy materiałów.

5.3. Wymagania dotyczące danych wyjściowych oraz formy ich prezentacji

W celu pełnego wykorzystania programów do oceny skutków awarii przemysłowych, kluczowe znaczenie mają możliwości w zakresie odczytywania danych wyjściowych. W przypadku modelowania uwolnień ze zbiorników musi być dostępny odczyt natężenia wypływu w funkcji czasu, sposób zachowania się substancji (czy tworzy rozlewisko, wrze, czy istnieje możliwość zapalenia lub wybuchu chmury par), całkowity czas uwolnienia (uwzględniając możliwość spadku temperatury poniżej temperatury wrzenia), a także informacja czy wypływ jest jedno- czy dwufazowy. Natomiast w przypadku parowania z rozlewiska istotnymi danymi z punktu widzenia analiz jest odczyt natężenia parowania w funkcji czasu (dla rozlewiska swobodnego – powierzchnia na jaką rozplynie się ciecz).

Istotne dane wyjściowe w przypadku par i gazów toksycznych są następujące:

1. zasięg i kształt stref o zadanych stężeniach (wyrażonych w dowolnych jednostkach NDS – Najwyższe Dopuszczalne Stężenie, AEGL – *Acute Exposure Guideline Levels*, LD – *Lethal Dose*),
2. stężenie w dowolnym punkcie w funkcji czasu, wewnątrz i na zewnątrz budynków (informacja na temat warunków wewnątrz budynków po danym

czasie pozwala ocenić, na ile korzystniejsze jest pozostawienie ludzi w budynkach niż ewakuowanie ich z zagrożonej strefy).

Ważne dane wyjściowe w przypadku par i gazów palnych:

1. zasięg i kształt stref o zadanych stężeniach (dowolny procent dolnej granicy wybuchowości, stężenie w dowolnych jednostkach),
2. nadciśnienie wybuchu chmury par w przypadku określonego momentu zapłonu (również z możliwością modelowania najbardziej niekorzystnej sytuacji, gdy moment zapłonu nie jest znany).

Ponadto oprogramowanie powinno umożliwiać uzyskanie następujących parametrów dotyczących symulacji pożarów:

1. całkowitej mocy pożaru,
2. wysokości płomienia (wartość szczególnie istotna w trakcie prowadzenia działań, gdy nie jest znana wielkość rozszczelnienia, można ją oszacować po wysokości płomienia),
3. ilości substancji spalanej w funkcji czasu,
4. całkowity czas trwania pożaru w zależności od ilości cieczy w rozlewisku lub zbiorniku,
5. zasięg i kształt stref oddziaływania promieniowania cieplnego o zadanej natężeniu (z uwzględnieniem wpływu wiatru na pochylenie płomienia),
6. natężenie promieniowania w dowolnym punkcie.

W obszarze odczytywania danych wyjściowych dotyczących modelowania wybuchów, chmur gazów i par palnych ważna jest możliwość sprawdzenia zasięgu i kształtu strefy o danym nadciśnieniu wybuchu. Natomiast w przypadku wybuchów BLEVE do istotnych parametrów wyjściowych trzeba zaliczyć: zasięg i kształt strefy o danym natężeniu promieniowania cieplnego, nadciśnienie na poszczególnych elementach budynków i ludziach, a także procent zniszczeń elementów budynków i obrażeń u ludzi. Niemniej istotna jest możliwość przewidzenia scenariusza awaryjnego w rezultacie wtórnego uszkodzenia, łącznie z określeniem zasięgu i rodzaju oddziaływań na skutek tego uszkodzenia. Wszystkie wyniki otrzymywane w postaci stref powinny być wyświetlane graficznie i mieć możliwość bezpośredniego naniesienia na mapę terenu. Wyniki w postaci funkcji czasu powinny mieć formę wykresów $y=f(t)$.

5.4. Proponowane oprogramowanie przeznaczone do modelowania skutków awarii przemysłowych

W tabeli 4. przedstawiono zestawienie z podstawową charakterystyką oprogramowania przeznaczonego do modelowania skutków awarii przemysłowych. W poszczególnych wierszach określono możliwości poszczególnych aplikacji w zakresie

spełnienia wymagań opisanych w poprzednich rozdziałach.

6. Podsumowanie

W wielu rozwiniętych gospodarczo krajach na świecie, coraz powszechniejsza staje się idea projektowania ukierunkowana na spełnienie wymaganych kryteriów użytkowych. Oznacza to możliwość szerszego stosowania rozwiązań alternatywnych wobec wymagań zawartych w przepisach nakazowych. Dzięki takiemu podejściu do projektowania mogą powstawać nowoczesne budowle. Bardzo dynamiczny rozwój architektury oraz technologii w ostatnich latach spowodował, że tradycyjna formuła przepisów techniczno-budowlanych nie jest odpowiednia dla coraz większej ilości projektowanych obiektów. W takich przypadkach jedyną alternatywną ścieżką to stosowanie nowoczesnych metod obliczeniowych jako procesu wspomagającego projektowanie. Warto przy tym zwrócić uwagę na fakt, że istnieje już obecnie szeroki zasób narzędzi oraz możliwości ich wykorzystania w ochronie przeciwpożarowej. Dla potwierdzenia tej tezy w ramach niniejszego artykułu dokonano obszernego przeglądu oraz wstępnej selekcji oprogramowania, które z powodzeniem może zostać wykorzystane w różnych gałęziach inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Niestety jest to droga znacznie bardziej skomplikowana w porównaniu z prostą formułą przepisów nakazowych (choć również one są kłopotliwe, ze względu na różne interpretacje zapisów). Nowoczesne projektowanie, z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe, wymaga przede wszystkim posiadania dużo większej wiedzy na temat funkcjonowania obiektów, zachowań ludzi, rozwoju pożaru, a także wpływu pożaru na poszczególne elementy konstrukcji budynku. Kolejny problem stanowi weryfikacja symulacji komputerowych. Zagadnienie jest bardziej złożone ze względu na to, że modele fizyczne oraz numeryczne zaimplementowane w programach do symulacji opisuje się za pomocą bardzo dużej liczby różnych parametrów. Każdy z tych składników może mieć znaczny wpływ na wyniki symulacji. W związku z powyższym autorowi analizy, użytkownikowi programu służącego do przeprowadzania symulacji, niezbędna jest bardzo dobra znajomość fundamentów naukowych wykorzystywanego modelu. Niestety w chwili obecnej ciężko odnaleźć jakiegokolwiek formalne wymagania kwalifikacyjne dla analityków wykonujących symulacje komputerowe. Natomiast w środowisku związanym z ochroną przeciwpożarową coraz częściej pojawiają się opinie o konieczności oceny ich umiejętności, a także o obowiązkowym nadaniu odpowiednich uprawnień.

W Polsce istnieją obecnie dwa niezależne ośrodki, które wykorzystują najnowsze techniki komputerowe przy wykonywaniu opracowań z zakresu ochrony przeciwpożarowej. Tymi ośrodkami są In-

Tabela 4.

Zestawienie funkcji programów do modelowania skutków awarii przemysłowych

Table 4.

List of software features intended to uncontrolled hazardous processes modeling

Model	EXDAM	BREEZE HAZ PRO	BREEZE CHARM COMPLEX TERRAIN	PHAST	ALOHA	TNO EFFECTS	EXPERT RIZIKON
Uwolnienie i dyspersja	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Gazy lekkie i pasywne	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Gazy ciężkie	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Uniwersalny model dyspersji	-	-	Tak	Tak	-	Tak	Tak
Wpływ uśrednionej szorstkości terenu	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Pionowy rozkład stężeń	-	-	Tak	Tak	-	Tak	Tak
Uwolnienie z wielu źródeł	-	-	Tak	-	-	-	-
Reakcje chemiczne, wpływ terenu rozlewisko	-	-	Tak	-	-	-	-
Natężenie emisji zmienne w czasie	-	-	Tak	-	-	-	-
Wpływ szczegółowej geometrii terenu i poszczególnych budynków	-	-	Tak	-	-	-	-
Pozary	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Pożar cieczy w zbiorniku	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Pożar rozlewiska	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Pożar strumieniowy	-	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Wybuchy	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Fazy skondensowanej	Tak	-	-	-	-	-	-
Chmury gazu palnego	Tak	-	Tak	Tak	-	Tak	-
Wpływ geometrii budynków na przebieg wybuchu, wybuchy wewnątrz budynków	Tak	-	-	-	Tak	-	-
Wybuchy na otwartym terenie	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Wpływ ukształtowania terenu na przebieg wybuchu	-	-	Tak	-	-	-	-
BLEVE	-	Tak	Tak	Tak	-	Tak	Tak
Efekt domino	-	-	-	-	-	-	Tak
Dla promieniowania cieplnego	-	-	-	-	-	-	-
Dla nadciśnienia wybuchu	-	-	-	-	-	-	Tak
Wbudowany moduł GIS	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Tryb czasu rzeczywistego	***	Tak	***	Tak	Tak	Tak	Tak
Ilościowa ocena ryzyka	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Walidacja	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Dokumentacja	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak

stytut Techniki Budowlanej – jednostka badawczo-rozwojowa nadzorowana przez Ministerstwo Infrastruktury oraz Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Pożarnictwa – organizacja naukowo-techniczna przynależąca do Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Naczelnej Organizacji Technicznej (NOT). Ponadto istnieje wiele firm oraz osób prywatnych, które świadczą swoje usługi w oparciu o symulacje komputerowe rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu. Niestety również w Polsce nie powstały jeszcze wytyczne dotyczące prawidłowych założeń wykonywanej symulacji, nie powołano również ośrodków certyfikujących tego typu ekspertyzy. Zgodnie z obowiązującym w Polsce prawem, nadzór nad prawidłowością sporządzania specjalistycznych opracowań z wykorzystaniem najnowocześniejszych narzędzi inżynierii bezpieczeństwa pożarowego spoczywa na Państwowej Straży Pożarnej. Niemniej należy stwierdzić, że Wydziały Kontrolno-Rozpoznawcze PSP nie są w tej chwili w pełni przygotowane do rzetelnej oceny prawidłowości wykonania symulacji komputerowych. Głównym problemem jest brak odpowiedniego sprzętu, oprogramowania oraz przeszkolenia funkcjonariuszy pracujących w ww. wydziałach. W związku z powyższym konieczne jest powołanie ośrodka zajmującego się rozwojem najnowocześniejszych narzędzi inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w ochronie przeciwpożarowej, którego jednym z głównych zadań byłoby szkolenie pracowników PSP oraz weryfikacja symulacji wykonanych przez prywatne podmioty. Oczywiście ośrodek taki powinien powstać w jednej z jednostek organizacyjnych Państwowej Straży Pożarnej. Szkoła Główna Służby Pożarniczej, jako jednostka organizacyjna PSP kształcąca m.in. strażaków Państwowej Straży Pożarnej oraz osoby cywilne, na kierunku inżynieria bezpieczeństwa pożarowego, byłaby niewątpliwie dobrym miejscem do utworzenia specjalistycznego ośrodka ds. zastosowania symulacji komputerowych w ochronie przeciwpożarowej.

Literatura

1. *Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 roku w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków innych obiektów budowlanych i terenów* (Dz.U. nr 80 poz. 563).
2. PN-EN 60079-10-1:2009. Atmosfery wybuchowe. Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni. Gazy atmosfery wybuchowe.
3. PN-EN 60079-10:2003. Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część 10: Klasyfikacja przestrzeni zagrożonych wybuchem.
4. *Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń: Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż określono to w przepisach techniczno-budowlanych*. 10.2008.
5. www.itb.pl. Dostęp 10.07.2011.
6. Ratajczak D., *Co dalej z przepisami nowej formuły?*, „Ochrona Przeciwpożarowa”, 2010, nr 4, s. 2-3.
7. Tofiło P., *Przepisy nowej formuły i nowoczesne metody projektowania. Konferencja SFPE w Lund*, „Ochrona Przeciwpożarowa”, 2010, nr 3, s. 48-50.
8. Yeoh G.H., Yuen K.K., *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering: Theory, modeling and practice*, Elsevier, 2009.
9. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018-5, 2010.
10. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., *NIST Special Publication 1019-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, 2010.
11. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. Volume 2: Verification*. NIST Special Publication 1018-5, 2010.
12. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., *NIST Special Publication 1018-5, Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. Volume 3: Validation*, 2010.
13. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. Volume 4: Configuration Management Plan*. NIST Special Publication 1018-5, 2010.
14. Kumar S., Cox G., *The Application of a Numerical field Model of Smoke Movement to the Physical Scaling of Compartment Fires* [w:] *Proc. Numerical Methods in Thermal Problems*, (red.) Lewis R. W., Johnson J. A., Smith W R, Pinerridge Press, 1983, pp. 837-848.
15. Markatos N. C., Malin M. R. and Cox G., *Mathematical Modelling of Buoyancy-Induced Smoke Flow in Enclosures*, „International Journal of Heat and Mass Transfer”, 25, 1982, pp. 63-75.
16. Kumar S., Hoffmann N., Cox G., *Some validation of JASMINE for fires in hospital wards* [w:] *Lecture Notes in Engineering Volume 18. Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Mass Transfer Processes*, Springer, 1986, pp. 159-169.
17. Kumar S., Cox G., *Mathematical modelling of fire in road tunnels*. In *Proc 5th Intl Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, BHRA, 1985, pp. 61-76.
18. Pericleous K. A., Worthington D. R. E., Cox G., *The Field Modelling of Fire in an Air-Supported*

- Structure. In *Proc 2nd International Symposium on Fire Safety Science*, 1988, p. 871.
19. Kumar S., *Field Model Simulations of Vehicle Fires in a Channel Tunnel Shuttle Wagon*. In *Proc 4th International Symposium on Fire Safety Science*, Ottawa, Canada, 1994, p. 995.
 20. Fardell P. J., Kumar S., Ellwood J. A., Rowley J. A., Vollam S., *A Study of Life Threat in Bus Fires*, Interflam '93, 1993, p. 401.
 21. Miles S. D., Cox G., *Prediction of fire hazards associated with chemical warehouses*, „Fire Safety Journal”, 27, 1996, pp. 265-287.
 22. Miles S. D., Kumar S., Cox G., *Comparisons of 'blind predictions' of a CFD model with experimental data*. *Proc 6th International Symposium on Fire Safety Science*, Poitiers 1999-to be published.
 23. Cox G., Kumar S., *Field Modelling of Fire in Forced Ventilated Enclosures*, „Combustion Science and Technology”, 52, 7, 1986.
 24. SMARTFIRE Verification and Validation Report, Report Version 4.1.1, Report Revision Date 05/2007, CMS, University of Greenwich. .
 25. *Development of Standards for Fire Field Models. Report on Phase 1 Simulations*, Grandison A.J., Galea E.R., Patel M.K., Office of the Deputy Prime Minister, Fire Research Division, Fire Research Division, Research Report 2/2003, 2003.
 26. *Development of Standards for Fire Field Models. Report on SMARTFIRE Phase 2 Simulations*, Grandison A.J., Galea E.R., Patel M.K., Office of the Deputy Prime Minister, Fire Research Division, Fire Research Division, Research Report 1/2003, 2003.
 27. *Simulating one of the CIB W14 round robin test cases using the SMARTFIRE fire field model*, Wang Z., Jia F., Galea E.R., Patel M.K., Ewer J., „Fire Safety Journal”, 36, 2001, pp. 661-677.
 28. SMARTFIRE V4.1 User Guide and Technical Manual, Doc Rev 1.0, July 2007.
 29. Kameleon FireEx 99 User Manual, SINTEF Energy Research report TRF5119, (B.E. Vembe, K.E. Rian, J.K. Holen, B. Grimsmo, B.F. Magnussen).
 30. Kameleon FireEx 99 Theory manual, SINTEF Energy Research report TRF5212, (B. Grimsmo, J.K. Holen, B. Lakså, B.F. Magnussen, T. Myhrvold, B.E. Vembe and K.E. Rian).
 31. Kameleon FireEx 99 Release Document, SINTEF Energy Research report TRF5120, B.E. Vembe, N.I. Lilleheie.
 32. Test cases calculated with Kameleon FireEx. Comparisons with measurements. SINTEF Energy Research report, TRF4811.
 33. Benchmark cases calculated with Kameleon FireEx 97, SINTEF Energy Research report TRF4709.
 34. Schneider V., Hofmann J., *Feldmodell-Simulation von Kohlenwasserstoff-Raumbränden und Sprühnebel-Löschversuchen*, vfdB-Zeitschrift 2 (1993) 67.
 35. Schneider V., Könnecke R., *Anwendung des Feldmodells KOBRA-3D zur Simulation von komplexen Brandszenarien auf Fragestellungen der automatischen Brandentdeckung*, 10. Int. Konf. über Automatische Brandentdeckung AUBE'95, 4.-6. April 1995, Duisburg, Germany.
 36. Schneider V., *Aussagefähigkeit von Feldmodell-Simulationsrechnungen im Vergleich mit Modell- und Realversuchen hinsichtlich einer Bewertung der Personensicherheit*, VdS-Fachtagung Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz, 27. April 1999, Köln, Germany.
 37. Schneider V., Löffler S., Steinert C., Wilk E., *Application of the compartment fire CFD model KOBRA-3D in fire investigation*, Proceedings Interflam '99, Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh 1999.
 38. Schneider V., *Reconstruction of experimental and actual fires in enclosed spaces using numerical simulation techniques*, International Congress on Fire Safety in Hazardous Enclosed Spaces, 8./9.11.1999, Vernon, France.
 39. Schneider V., Könnecke R., *Evaluation of design fire scenarios – Numerical simulation vs physical modelling*, Proceedings Interflam 2001, Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, 2001.
 40. Schneider V., *Mathematical and physical modelling of smoke spread in atria-type experimental set-ups*, Proceedings Interflam 2007, Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway University of London, 2007.
 41. KOBRA-3D – Users' Guide, KOBRA-3D – Technical Reference.
 42. Wu J.Z., Ludwig J.C., *Flair User's Guide*, Documentation fo Phoenix TR 313. Version 2010.
 43. Ludwig J.C., Spalding D.B., Mortimore S., *Starting with PHOENICS-VR.*, TR324. Version 2010.
 44. Aksit M., Mackie P., Rubini P.A., *Coupled Radiative Heat Transfer and Flame Spread Simulation in a compartment*, Third International Seminar on Fire and Explosion Hazards, April 2000, Windermere, UK.
 45. Lewis M.J., Moss J.B., Rubini P.A., *Field Modelling of Non-Charring Flame Spread*, Sixth Int Symp on Fire Safety Science, Poitiers, France, 1999.
 46. Sanderson V., Rubini P.A., Moss J.B., *The effect of vent size of a compartment fire: Numerical simulation and validation*, Proceedings of the Eight International Conference – INTERFLAM'99. Interscience Communications Ltd., 1999. ISBN 0-9532312-1-6.

47. Moss J.B., Rubini P.A., *Coupled soot and radiation calculations in compartment fires*, *Proceedings of the Second International Conference on Fire Research and Engineering*, Gaithersburg, Maryland, USA, August 1997, Society of Fire Protection Engineers, Beth.
48. Lewis M.J., Moss J.B., Rubini P.A., *CFD modelling of combustion and heat transfer in compartment fires*, *Proceedings of 5th International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia, March 1997, International Association for Fire Safety Science, ISBN 4-9900625-5-5.
49. Rubini P.A., *SOFIE – Simulation of Fires in Enclosures*, *Proceedings of 5th International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australia, March 1997, International Association for Fire Safety Science, ISBN 4-9900625-5-5.
50. SOFIE Version 3 Manual.
51. <http://www.mottmac.com/skillsandservices/software/stepsoftware/>, Dostęp 10.07.2011.
52. Kuligowski E. D., Peacock R. D., *A review of building evacuation models*, Technical note 1417, Washington 2005.
53. Santos G., Aguirre B. E., *A Critical Review of Emergency Evacuation Simulation Models*, University of Delaware. Delaware 2004.
54. Thompson P.A., Marchant E.W., *Computer and Fluid Modelling of Evacuation*, „*Journal of Safety Science*”, 18 (1995), pp. 277-289.
55. Thompson P.A., Marchant E.W., *A Computer Model for the Evacuation of Large Building Populations*, „*Fire Safety Journal*”, 24 (1995), pp. 131-148.
56. Thompson P.A., Wu J., Marchant E.W., *Modeling Evacuation in Multi-storey Buildings with Simulex*, „*Fire Engineers Journal*”, vol. 56, no. 185, November 1996, pp. 6-11.
57. <http://fseg.gre.ac.uk/exodus/index.html>. Dostęp 10.07.2011.
58. <http://www.legion.com/>. Dostęp 10.07.2011.
59. <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Structural+Mechanics/ANSYS+Mechanical>. Dostęp 10.07.2011.
60. <http://www.algor.info.pl/>. Dostęp 10.07.2011.
61. http://www.simulia.com/products/abaqus_fea.html. Dostęp 10.07.2011.
62. <http://www.nenastran.com/>. Dostęp 10.07.2011.
63. <http://www.argenco.ulg.ac.be/logiciels/SAFIR/contacts.html>. Dostęp 10.07.2011.
64. <http://www.breeze-software.com/software/>. Dostęp 10.07.2011.
65. Eltgroth M. W., *Complex Hazardous Air Release Model (CHARM®)*, Technical Reference Manual.
66. U.S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric, *Aloha User's Manual 2007*.
67. <http://www.dnv.com/services/software/products/safeti/safetiqra/phast.asp>. Dostęp 10.07.2011.
68. http://www.tno.nl/content.cfm?context=thema&content=markt_product&laag1=896&laag2=186&laag3=267&item_id=739. Dostęp 10.07.2011.

kpt. mgr inż. Mateusz Fliszkiewicz, absolwent dziennych studiów inżynierskich oraz zaocznych studiów magisterskich w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Od kwietnia 2012 roku zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Informatyki i Łączności w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Czynnny członek Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa.

kpt. mgr inż. Andrzej Krauze, absolwent dziennych studiów inżynierskich oraz zaocznych studiów magisterskich w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Od września 2011 roku zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Informatyki i Łączności w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Członek Zarządu Oddziału Stołecznego Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa.

dr hab. inż. Tadeusz Maciak, profesor Szkoły Głównej Służby Pożarniczej oraz kierownik Zakładu Informatyki i Łączności w tej szkole. Objął stanowisko adiunkta w Katedrze Mediów Cyfrowych i Grafiki Komputerowej Wydziału Informatyki Politechniki Białostockiej.