

Piotr Smardz, Janusz Paliszek-Saladyga

ZALECENIA DOTYCZĄCE PRAWIDŁOWEGO STOSOWANIA MODELU CFD W SYMULACJACH POŻAROWYCH DLA PROGRAMU FIRE DYNAMICS SIMULATOR

Symulacje komputerowe wykorzystujące metody numerycznej mechaniki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics, CFD) są cennym narzędziem stosowanym w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. W artykule przedstawiono zalecenia dotyczące prawidłowego przeprowadzania symulacji pożarowych z uwzględnieniem specyfiki programu FDS. Omówiono zasady doboru siatki obliczeniowej, warunków brzegowych, modelowania klap dymowych, opisu przyjętego pożaru projektowego a także metody weryfikacji poprawności uzyskanych wyników.

1. WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich kilku lat, wraz ze wzrostem możliwości obliczeniowych komputerów osobistych a także dzięki większej dostępności specjalistycznego oprogramowania, modelowanie pożarów z użyciem modeli CFD stało się przydatnym narzędziem w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Metoda ta jest szczególnie pomocna przy weryfikacji rozwiązań projektowych dotyczących systemów oddymiania dla dużych i skomplikowanych obiektów budowlanych.

Ze względu na złożoność symulacji pożarowych wykonanych z użyciem metody CFD, istotne jest aby symulacje takie przeprowadzane były przez osoby posiadające odpowiednie doświadczenie projektowe w dziedzinie inżynierii bezpieczeństwa pożarowego a także przygotowanie merytoryczne w zakresie mechaniki płynów, transportu ciepła, chemii procesów spalania, dynamiki pożarów oraz innych pokrewnych dziedzin. Bardzo istotne jest również przestrzeganie podstawowych zaleceń dotyczących modelowania CFD. Zalecenia takie określa się często mianem „dobrej praktyki” lub „przyjętych zasad postępowania” (ang. *good practice rules*).

Jednym z najpopularniejszych modeli CFD stosowanych obecnie w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego jest Fire Dynamics Simulator (FDS) rozwijany przez National Institute of Standards and Technology (NIST) w Stanach Zjednoczonych, przy współpracy z fińskim instytutem naukowo-badawczym VTT. Obecnie dostępna jest wersja 5.2 programu. Wraz z programem FDS dostarczany jest pakiet Smokeview, który służy do graficznej prezentacji otrzymanych wyników. Szczegółowy opis programu FDS znaleźć można w dokumentacji udostępnianej przez NIST [1-4].

W programie FDS zastosowano tzw. wielkowirowy model turbulencji (ang. Large Eddy Simulation, LES). W odróżnieniu od stosowanych wcześniej modeli RANS, modele

LES uwzględniają wiry o wielkości porównywalnej z wielkością komórki siatki obliczeniowej.

Ze względu na różnice w przyjętym modelu turbulencji, niektóre zalecenie dotyczące stosowania programu FDS (szczególnie te dotyczące rozdzielczości siatki obliczeniowej) różnią się od zaleceń podawanych dla modeli typu RANS. Równocześnie istnieje duża grupa zaleceń uniwersalnych, min. dotyczących wstępnej weryfikacji uzyskanych wyników, które powinny być stosowane we wszystkich symulacjach pożarów z użyciem metody CFD, niezależnie od przyjętego modelu turbulencji.

Zalecenia opisane w niniejszym artykule dotyczą typowych symulacji CFD dla celów weryfikacji systemów oddymiania. W symulacjach takich moc pożaru jest zazwyczaj parametrem „wejściowym” definiowanym *a priori* przez użytkownika, np. w oparciu o powszechnie uznane wytyczne projektowe.

Symulacje, w których szybkość rozprzestrzeniania się płomienia, a w rezultacie także moc chwilowa pożaru, wyznaczana jest przez program, uznać można za znacznie bardziej złożone ze względu na konieczność szczegółowego opisu właściwości fizykochemicznych materiałów występujących w przestrzeni ogarniętej pożarem. Symulacje takie wymagają również bardzo dużej mocy obliczeniowych ze względu na potrzebę zastosowania znacznie dokładniejszych siatek obliczeniowych. Z tego też powodu, w chwili obecnej symulacje takie nie nadają się do zastosowań inżynierskich.

2. ROZDZIELCZOŚĆ SIATKI OBLICZENIOWEJ

Odpowiedni dobór rozdzielczości siatki obliczeniowej jest jednym z najistotniejszych elementów poprawnie przeprowadzonej symulacji CFD.

W pierwszej kolejności rozważyć należy rozdzielczości siatki obliczeniowej w kontekście geometrycznych wymiarów symulowanego problemu (a więc budynku, jego poszczególnych elementów takich jak pomieszczenia, okna, drzwi, a także geometrycznej wielkości pożaru).

Wytyczne opublikowane przez Health and Safety Laboratory w Wielkiej Brytanii [5] zalecają aby obszar pożaru (jeżeli jest to pożar projektowy o stałym polu powierzchni) podzielony był na co najmniej 16 komórek obliczeniowych (tj. 4 komórki w każdym kierunku, zakładając obszar pożaru o kształcie zbliżonym do kwadratu).

Należy założyć, iż powyższe zalecenie może być zastosowane również w odniesieniu do liczby komórek siatki przypadających na poszczególne elementy budynku istotne ze względu na rozprzestrzianie się dymu i ciepła, takie jak drzwi, okna i klapy dymowe.

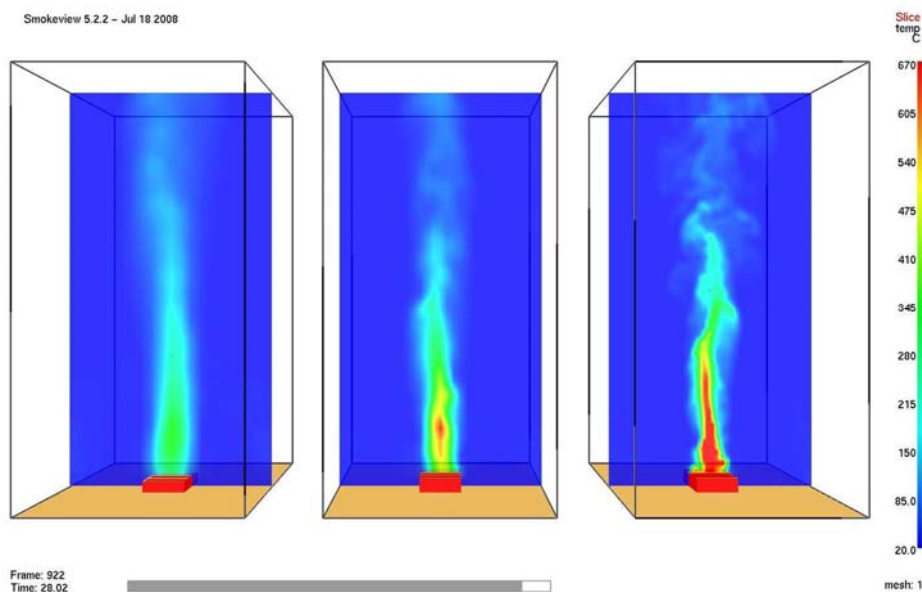
Kolejnym istotnym problemem jest relacja pomiędzy rozdzielczością siatki obliczeniowej a charakterystyczną średnicą pożaru D^* , zdefiniowaną jako:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

Charakterystyczna średnica pożaru, jest parametrem opisującym wielkość pożaru w odniesieniu do jego mocy całkowitej \dot{Q} , a nie wymiarów geometrycznych *sensu stricte*. Rozdzielczość siatki obliczeniowej w odniesieniu do charakterystycznej średnicy pożaru określa bezwymiarowy stosunek $D^*/\delta x$, gdzie δx jest największym wymiarem komórki obliczeniowej w danym rejonie siatki. Zachowanie właściwego stosunku $D^*/\delta x$ ma

istotny wpływ na wyniki dotyczące temperatury kolumny konwekcyjnej dymu w strefie bezpośrednio nad pożarem. Dlatego też, zagadnienie to jest szczególnie istotne dla rejonów siatki obliczeniowej obejmujących symulowany pożar a także bezpośrednio do niego przylegających. Zgodnie z raportem dotyczącym weryfikacji i walidacji programu FDS dla zastosowań w dziedzinie bezpieczeństwa instalacji atomowych [6], siatki obliczeniowe dla których stosunek $D^*/\delta x$ mieści się w zakresie 5 do 10, pozwalają uzyskać zadowalającą dokładność wyników symulacji. Dla przykładowego pożaru projektowego o mocy 2,5 MW, oznacza to rozdzielczość siatki obliczeniowej rzędu 0,15m do 0,30m.

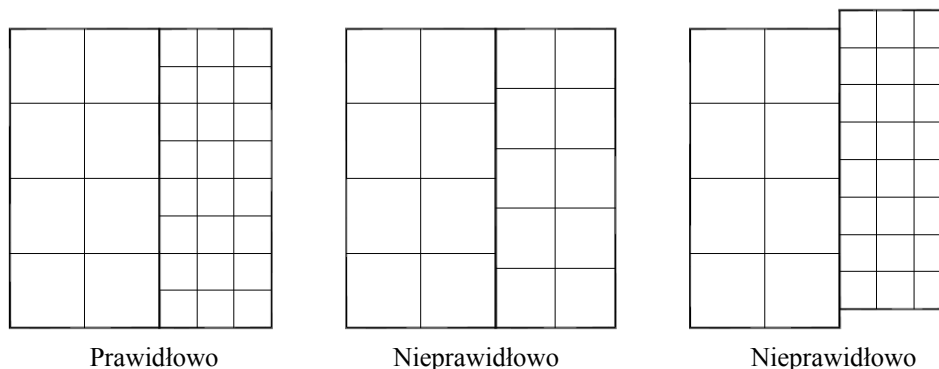
Wpływ rozdzielczości siatki obliczeniowej na wyniki w zakresie temperatury bezpośrednio nad pożarem ilustruje poniższy przykład. Przedstawia on trzy symulacje pożaru o mocy całkowitej 1000 kW i wymiarach 1,20 x 1,20 m w przestrzeni otwartej o wymiarach 6 x 6 x 12 m. W symulacjach wykorzystano siatki obliczeniowe o rozdzielczości 30cm, 20cm i 10 cm co odpowiada stosunkowi $D^*/\delta x$ 3,3; 5 i 10. Im gorsza rozdzielczość siatki obliczeniowej, tym bardziej niedoszacowana jest temperatura w strefie płomienia. W miarę oddalania się od źródła ognia różnice w wynikach temperatury zmniejszają się. Podobne wnioski znaleźć można w pracy porównawczej J. Schulz'a [7].



Rys. 1. Porównanie wyników temperatur kolumny konwekcyjnej bezpośrednio nad pożarem dla rozdzielczości siatki obliczeniowej 30cm, 20cm i 10cm

Warto zaznaczyć, iż ze względu na lepsze wykorzystanie dostępnej mocy obliczeniowej, korzystne jest budowanie domeny obliczeniowej z kilku przylegających do siebie siatek o różnych gęstościach, stosując zasadę, iż rozdzielczość siatek powinna być najlepsza w rejonie pożaru i jego bezpośrednim sąsiedztwie, natomiast części domeny odległe od pożaru (ang. *far field*) mogą być opisywane siatkami o gorszych rozdzielczościach. Należy przy tym pamiętać, iż w wersji 5.1 programu FDS

wprowadzono dodatkowe wymogi dotyczące dopasowania siatek obliczeniowych w miejscach ich styku. Jeżeli dwie przylegające do siebie siatki obliczeniowe mają różne rozdzielczości, to rozmiary większej komórki musi być całkowitą wielokrotnością komórki mniejszej (np. siatki o rozdzielczości 0,10 m i 0,20 m). Ponadto węzły przylegających siatek muszą się pokrywać.



Rys. 2. Zasady dopasowywania przylegających siatek obliczeniowych

Dla modeli RANS powszechnie przyjmuje się, iż poprawa rozdzielczości siatki obliczeniowej (tj. zmniejszenie rozmiaru komórek siatki) prowadzi do lepszych (tj. dokładniejszych) wyników symulacji. W przypadku modelu LES stosowanego w programie FDS zasada ta nie zawsze się sprawdza, a nadmierne zagęszczenie siatki prowadzić może do pogorszenia jakości uzyskanych wyników. Problem ten opisany został min. przez Toris et al. [8].

Przy stosowaniu siatek obliczeniowych o zmiennej rozdzielczości w danym kierunku lub siatek o niejednorodnej rozdzielczości w kierunkach x, y i z należy zwrócić uwagę na ograniczenie stosunku długości boków komórki. Cox i Kumar [9] zalecają aby współczynnik kształtu (ang. *aspect ratio*), tj. stosunek długości najdłuższego do najkrótszego boku komórki, nie przekroczył 50, przy czym, w przypadku modelu FDS ograniczenie to jest niewystarczające. Autorzy programu FDS zalecają [1] aby kształt komórek zbliżony był do sześcianu, z sugerowanym maksymalnym współczynnikiem kształtu równym 3. Autorzy programu zwracają również uwagę, iż używanie siatek obliczeniowych ze współczynnikiem kształtu większym niż 2 prowadzić może do numerycznej niestabilności przeprowadzanej symulacji.

3. DEFINICJA POŻARU PROJEKTOWEGO

Kolejnym istotnym elementem symulacji w programie FDS jest prawidłowy opis pożaru. Skupimy się tutaj na sytuacji, w której krzywa rozwoju pożaru (określana przez współczynnik szybkości rozwoju pożaru i wartość maksymalną strumienia ciepła) jest parametrem „wejściowym” symulacji, definiowanym *a priori* przez użytkownika, np. w oparciu o powszechnie uznane wytyczne projektowe. Podobną metodę zastosować też można dla pożarów projektowych o stałej mocy (ang. *steady-state fires*), w tym przypadku użytkownik definiuje tylko wartość strumienia ciepła.

W poniższej tabeli podsumowano zalecane wartości konwekcyjnego strumienia ciepła, powierzchni i współczynnika szybkości rozwoju pożaru dla typowych pożarów projektowych opisanych w brytyjskich normach i wytycznych projektowych.

Tabela 1. Przykładowe parametry pożarów projektowych w literaturze brytyjskiej

Rodzaj obiektu	Qc [kW]	A _{pożaru} [m ²]	γ [kW/s ²]	Źródło
Obiekty handlowe chronione tryskaczami zwykłymi	5000	10	0,0469 do 0,188	[10]
Obiekty handlowe chronione tryskaczami szybkiego reagowania	2500	5	0,0469 do 0,188	[10]
Budynki biurowe chronione instalacją tryskaczową	2700	16	0,01172	[10]
Parkingi bez instalacji tryskaczowej ¹	8000	25	-	[12]
Parkingi z instalacją tryskaczową ¹	4000	10	-	[12]

W programie FDS, procentowa wartość całkowitego strumienia ciepła, która przekazywana jest poprzez promieniowanie określana jest przez zmienną RADIATIVE FRACTION polecenia RADI. Wartość domyślna tej zmiennej to 0.35, co oznacza, iż 35% ciepła wytwarzanego w pożarze przekazywane jest do otoczenia przez promieniowanie (można w uproszczeniu przyjąć, iż pozostała część strumienia ciepła tj. 65% przekazywana jest w całości przez konwekcję). Dla typowych scenariuszy pożarów w budynkach, w których paliwem jest mieszanka materiałów celulozowych i tworzyw sztucznych, wartości powyższe można uznać za adekwatne (w brytyjskich wytycznych i normach do projektowania systemów oddymiania [10,11] przyjmuje się, iż 70% do 80% ciepła wytwarzanego w pożarach typowych materiałów występujących w budynkach przekazywane jest przez konwekcję). Jednakże dla pożarów, w których paliwem są substancje o bardzo niskim (np. alkohol etylowy) – lub bardzo wysokim (np. polistyren) - współczynniku emisji dymu, wartość zmiennej RADIATIVE_FRACTION należy odpowiednio zmodyfikować.

W przypadku kiedy zasięg widoczności jest jednym z kryteriów oceny wyników symulacji, bardzo istotne jest poprawne zdefiniowanie współczynnika emisji dymu poprzez zmienną SOOT_YIELD polecenia REAC. Należy pamiętać, iż wartość domyślna tej zmiennej w programie FDS (0,01 kg/kg) jest nieadekwatna dla większości typowych problemów projektowych, ponieważ materiały występujące w budynkach mają współczynnik emisji dymu w zakresie od 0,03 do 0,17 kg/kg. Wartości te ulegają dalszemu zwiększeniu w przypadku pożarów niedowentylowanych.

Przy obliczeniach widzialności przez dym istotna jest także wartość zmiennej VISIBILITY_FACTOR. Wartość domyślna (tj. 3) tej zmiennej w programie FDS odpowiada obliczeniom widzialności obiektów odbijających światło i jest właściwa dla większości typowych przypadków (w sytuacji kiedy oblicza się widzialność obiektów emitujących światło wartość powyższej zmiennej powinna wynosić 8). Domyślnej wartości zmiennej VISIBILITY_FACTOR nie należy bez jednoznacznego zaznaczenia tego faktu w raporcie dotyczącym przeprowadzanej symulacji.

¹ Dla parkingów podano wartość całkowitą strumienia ciepła dla pożarów o stałej mocy

4. DEFINICJA GEOMETRII BUDYNKU

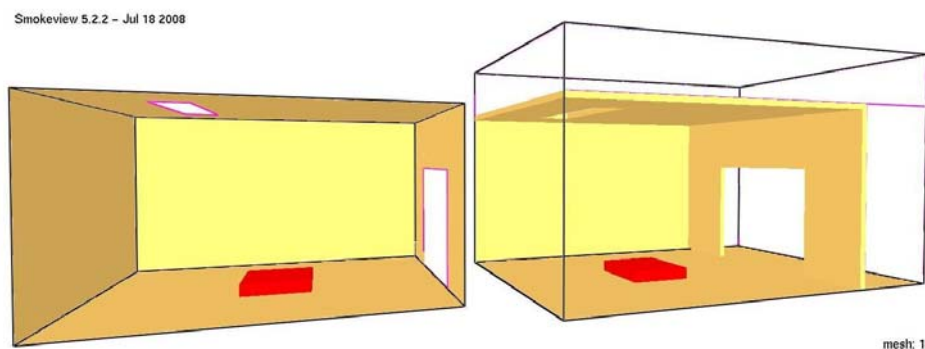
Przy odwzorowywaniu geometrii budynku należy wziąć pod uwagę wszystkie jego elementy, które mogą mieć wpływ na sposób rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w danym obiekcie. Ze względu na ograniczenie dostępnej mocy obliczeniowej i fakt, iż FDS wykonuje obliczenia w oparciu o siatkę strukturalną prostopadłościenną, konieczne jest zazwyczaj dokonanie pewnych uproszczeń w modelowanej geometrii.

Przed przystąpieniem do definicji geometrii należy założyć stopień dokładności odwzorowania geometrycznego danego budynku w modelu. W literaturze brak jest jednoznacznych zaleceń na ten temat. W oparciu o własne doświadczenia, autorzy sugerują dokładność odwzorowania $\pm 5\%$ dla elementów mających istotny wpływ na przepływ dymu i ciepła (np. otworów drzwiowych, kurtyn dymowych) i $\pm 10\%$ dla pozostałych elementów.

Należy pamiętać, iż ze względu na typ siatki stosowanej przez program FDS (tj. siatka strukturalna, prostopadłościenna), program ten odwzorowuje powierzchnie zakrzywione w sposób bardzo uproszczony, szczególnie w przypadku siatki obliczeniowej o niskiej rozdzielczości. Z tego też powodu FDS nie nadaje się do szczegółowej analizy przepływów w warstwie przyściennej dla powierzchni zakrzywionych.

5. MODELOWANIE WENTYLACJI GRAWITACYJNEJ

Kłapy dymowe a także otwory okienne i drzwiowe mogą być reprezentowane w modelu CFD jako powierzchnia typu OPEN (tj. warunek brzegowy stałego ciśnienia) lub jako rzeczywisty otwór w przegrodzie budowlanej (w takim przypadku granice domeny obliczeniowej muszą zostać przesunięte na zewnątrz budynku). Różnica pomiędzy tymi metodami przedstawiona jest na poniższym rysunku.



Rys. 3. Porównanie metod odwzorowania otworów wentylacyjnych

Pomimo iż metoda druga wymaga większej domeny obliczeniowej a co za tym idzie również dłuższego czasu symulacji, umożliwia ona lepsze odwzorowanie rzeczywistości a zatem należy uznać ją za metodę preferowaną.

Należy również pamiętać o zachowaniu odpowiedniej odległości pomiędzy pożarem a warunkiem brzegowym typu OPEN. W przeciwnym razie rozprzestrzenianie się dymu w modelowanym obiekcie może być prognozowane nieprawidłowo [5].

6. MODELOWANIE WENTYLACJI MECHANICZNEJ

Modelowanie wentylacji mechanicznej jest zagadnieniem bardzo złożonym i wymaga zachowania szczególnej ostrożności w doborze rozdzielczości siatki obliczeniowej a także parametrów opisujących poszczególne elementy systemu takie jak np. wentylatory strumieniowe.

Najprostszym sposobem reprezentacji tradycyjnej wentylacji mechanicznej jest zdefiniowanie kratki wywiewnej (lub nawiewnej) jako warunku brzegowego o stałej prędkości przepływu. Alternatywnie zastosować można warunek brzegowy o stałej wartości objętościowego strumienia powietrza. W programie FDS, kierunek przepływu „do” lub „z” domeny obliczeniowej determinowany jest przez znak zmiennej VEL lub VOLUME_FLUX (w zależności od przyjętej metody).

W warunkach rzeczywistych, przepływ przez wentylator zależy od różnicy ciśnień, któremu jest on poddany. Jeżeli znana jest charakterystyka przepływu danego wentylatora, to należy ją uwzględnić w symulacji CFD (w wersji 5 programu FDS rozszerzono możliwości definiowania charakterystyki wentylatora).

W przypadku symulacji dotyczących systemów różnicy ciśnień jednym z kluczowych problemów jest właściwe odwzorowanie nieszczelności w budynku. W wersji 5 programu FDS wprowadzono bardziej zaawansowane metody uwzględniania nieszczelności pomiędzy poszczególnymi pomieszczeniami w budynku.

7. WERYFIKACJA WYNIKÓW SYMULACJI

Konieczność krytycznej oceny otrzymanych rezultatów dotyczy zarówno uproszczonych obliczeń jak i zaawansowanych symulacji z użyciem metody CFD.

Za względu na złożoność symulacji pożarowych wykonanych przy użyciu metody CFD, istnieje zwiększone ryzyko popełnienia błędu podczas definiowania modelu obliczeniowego. Fakt ten podkreślany jest w wielu wytycznych dotyczących metodologii symulacji CFD [13-16].

W przypadku programu FDS ryzyko to jest szczególnie duże dla skomplikowanych obiektów, gdy plik wsadowy tworzony jest „ręcznie”. Pomyłka dotyczyć może definicji geometrii, wartości mocy pożaru (np. na skutek pomyłki w jednostkach) lub też kierunku przepływu powietrza przez wentylację mechaniczną.

W celu wyeliminowania potencjalnych błędów w symulacji CFD należy przeanalizować otrzymane wyniki i porównać je z wynikami uproszczonych obliczeń kontrolnych wykonanych przy użyciu prostych wzorów empirycznych. Należy również monitorować wartości podstawowych parametrów fizycznych takich jak temperatura, prędkość przepływu i ciśnienie w kluczowych lokalizacjach.

Przykładem najprostszej weryfikacji poprawności przeprowadzanej symulacji jest monitorowanie wartości temperatury bezpośrednio w pomieszczeniu objętym pożarem. Zbyt niska temperatura bezpośrednio nad strefą płomienia może być oznaką niedostatecznej rozdzielczości siatki obliczeniowej lub błędnie zdefiniowanego pożaru projektowego.

8. PREZENTACJA ZAŁOŻEŃ I WYNIKÓW SYMULACJI

Wyniki symulacji pożarowej wykonanej metodą CFD powinny być udokumentowane w formie raportu. Raport taki powinien zawierać szczegółowe informacje nt. założeń przyjętych w symulacji, a także prezentować uzyskane wyniki w formie czytelnych wykresów i wizualizacji.

Potrzeba rzetelnej dyskusji założeń projektowych i - co jest zazwyczaj nieuniknione - przyjętych uproszczeń, oraz prawidłowej prezentacji uzyskanych wyników podkreślana jest w wielu publikacjach dotyczących symulacji pożarowych metodą CFD [5,13].

Hume i Eddy [17] sugerują, iż raport opisujący symulację CFD powinien zawierać informacje na temat:

- nazwy i numeru wersji programu CFD użytego do symulacji,
- modelu turbulencji (np. RANS lub LES), modelu promieniowania ciepłego oraz modelu spalania użytych do symulacji,
- założeń przyjętych przy doborze wartości projektowych,
- geometrii budynku, właściwości fizyko-chemicznych materiałów, charakterystycznych parametrów pożaru projektowego itd.,
- rozmiaru i rozdzielczości siatki obliczeniowej,
- analizy wpływu przyjętej rozdzielczości siatki na wyniki symulacji,
- analizy wrażliwości (ang. *sensitivity analysis*) otrzymanych wyników na zmianę wartości przyjętych parametrów symulacji (np. takich jak szybkość rozwoju pożaru lub warunki wentylacji).

Zalecane jest również dołączenie do raportu wydruków pliku wsadowego i plików z wynikami. W przypadku kiedy są to pliki o dużych rozmiarach można dołączyć je w formie elektronicznej, np. na płycie CD.

Wyniki w zakresie temperatury, widzialności, stężenia tlenku węgla i innych parametrów istotnych dla danego problemu projektowego powinny być podawane na podstawie wartości odczytanych z „wirtualnych punktów pomiarowych”, które należy zdefiniować w pliku wsadowym przed rozpoczęciem symulacji. Odczytywanie wyników tylko na podstawie graficznych wizualizacji wykonanych w programie Smokeview może prowadzić do znacznych niedokładności.

9. PODSUMOWANIE

Symulacje pożarów przy użyciu metody CFD są przydatnym narzędziem coraz powszechniej stosowanym przy opracowywaniu strategii bezpieczeństwa pożarowego budynków, przy projektowaniu systemów oddymiania a także w analizie kryminalistycznej zaistniałych pożarów. Ze względu na złożoność metody CFD, istotne jest aby symulacje takie wykonywane były przez osoby o odpowiednim doświadczeniu, przy zachowaniu zasad „dobrej praktyki”. W przypadku programu FDS, ze względu na specyfikę zastosowanego w nim modelu turbulencji, niektóre z zaleceń szczegółowych różnią się od zasad podawanych w literaturze dla modeli RANS. Dotyczy to w szczególności definiowania siatki obliczeniowej.

LITERATURA

- [1] McGrattan K.B., Klein B., Hostikka S., Floyd J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide*, NIST Special Publication 1019-5, NIST, July 2008.
- [2] McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R., Mell W., McDermot R., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*, NIST Special Publication 1018-5, NIST, July 2008.
- [3] McDermot R., McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 2: Verification*, NIST Special Publication 1018-5, NIST, July 2008.
- [4] McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J., Klein B., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 3: Validation*, NIST Special Publication 1018-5, NIST, July 2008.
- [5] Gobeau N., Ledin H.S., Lea C.J., *Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics*, HSL, 2002
- [6] *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant applications, Volume 6 Fire Dynamics Simulator*, NUREG 1824, United States Nuclear Regulatory Commission, 2007.
- [7] Schulz J., *Case Study: Parameters influencing the flame and plume temperatures in FDS*, Conference Proceedings, Fire Computer Modelling Advanced Research Workshop, Universidad de Cantabria, 2007
- [8] Toris D., Rogsch Ch., Seyfried A., *Usefulness of finer grid to increase the approximation quality of LES-based CFD calculations related to buoyancy driven flows*. Conference Proceedings, InterFlam 2007
- [9] Cox G., Kumar S., *Modeling Enclosure Fires Using CFD*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, 2002
- [10] Morgan H.P., Ghosh G.K., Garrad G., Pamlitschka R., J-C De Smedt J-C, Schoonbaert L.R. *Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation*, BRE Report 368, 1999.
- [11] *BS 7346 Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires — Code of practice*, British Standards Institution, 2003.
- [12] *BS 7346 Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks*, British Standards Institution, 2006.
- [13] Praca zbiorowa, *CFD Modelling for Car Park Ventilation Systems –a guide for designers and regulators*, Smoke Control Association, 2007
- [14] Nielsen P.V., Allard F., Awbi H.B., Davidson L., Schaelin A., *Computational Fluid Dynamics in ventilation design*, REHVA, 2007
- [15] *PD 7974 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings Part 0: Guide to design framework and fire safety engineering procedure, Annex A Assessment and verification of FSE models*, British Standards Institution, 2002.
- [16] *PD 7974 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings Part 2: Spread of smoke and toxic gases within and beyond the enclosure of origin, Annex A Computer modelling*, British Standards Institution, 2002.
- [17] Hume B., Eady M., *The use of CFD computer models for fire safety design in buildings, Large warehouse case study*, ODPM, 2002.

GOOD PRACTICE RULES FOR CFD FIRE MODELLING USING FIRE DYNAMICS SIMULATOR

Computer simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD) are an efficient design tool used in fire safety engineering. The article discusses good practice rules for a LES model called Fire Dynamics Simulator (FDS). The recommendations for computational grid, boundary conditions, modelling of natural and forced ventilation as well as proper description of the adopted design fire are discussed. The article also briefly discusses the issue of verification of simulation results.