

Poprawność wykonania symulacji komputerowych CFD rozprzestrzeniania się dymu

Dorota Brzezińska

W ostatnich latach, ze względu na coraz częstsze powstawanie obiektów budowlanych o nietypowych funkcjach i układach architektonicznych, w których nie ma możliwości bezpośredniego dostosowania się do wymagań obowiązujących przepisów techniczno-budowlanych (w związku z czym konieczne jest uzyskanie odstępstwa lub zgody na rozwiązanie zamienne bądź zastępcze), na szeroką skalę zaczęto wykorzystywać w zakresie bezpieczeństwa pożarowego symulacje komputerowe CFD (Computational Fluid Dynamics) rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu. CFD jest nowoczesną techniką, umożliwiającą rozwiązywanie skomplikowanych równań opisujących trójwymiarowy przepływ płynów z uwzględnieniem czasu.

Postęp techniki CFD w zakresie analiz rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu rozpoczął się na początku lat osiemdziesiątych. Pierwszymi ośrodkami naukowymi, które się tym zajmowały były The National Bureau of Standards (obecnie znane jako NIST) w USA oraz Building Research Establishment (BRE) w Wielkiej Brytanii. Opisu ruchu płynu w tych programach dokonano na podstawie rozwiązań układu równań cząstkowych Naviera-Stokesa (N-S), opartych na zasadach zachowania masy pędu i energii. Jednym z najważniejszych elementów składowych tych programów jest zawarty w nich model służący opisowi turbulencji przepływu płynu. Stosowane są przy tym dwa podstawowe modele:

- dwurównaniowy model (k-ε) oparty o koncepcję lepkości turbulentnej (RANS), wykorzystywany w programach takich, jak Jasmine, Smartfire, Sofie,
- model symulacji wielkich wirów (LES), dzielący wiry na duże – bezpośrednio obliczane za pomocą równań N-S oraz małe – modelowane na podstawie odpowiednich zależności, wykorzystywany w programie FDS.

Model LES umożliwia dokładniejszy opis zjawiska turbulencji, wymaga jednak większych mocy obliczeniowych komputerów niż model RANS, co powoduje, że we wczesnych latach rozwoju technik CFD był rzadko stosowany. Obecnie, w miarę rozwoju techniki komputerowej wykorzystuje się go coraz częściej i zapewne w najbliższych latach stanie się on modelem podstawowym.

Obecnie techniki komputerowe CFD umożliwiają precyzyjną ocenę warunków panujących w przypadku wystąpienia pożaru nawet w obiektach o bardzo skomplikowanej geometrii, z uwzględnieniem zastosowanych w nich systemów ochrony przeciwpożarowej. **Warunkiem wiarygodności otrzymanych rezultatów jest jednak pewność, że symulacje przeprowadzono w sposób prawidłowy.** Oceny prawidłowości wykonania symulacji komputerowych dokonuje się na podstawie analizy następujących kwestii :

- a) czy do przeprowadzonych symulacji wykorzystano właściwy program komputerowy,
- b) czy przyjęto odpowiednie założenia,
- c) czy prawidłowo odczytano i zinterpretowano otrzymane wyniki.

Programy komputerowe

Symulacje komputerowe rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu w obiektach budowlanych wykonywane są obecnie za pomocą dwóch rodzajów programów komputerowych. Do pierwszej grupy należą programy specjalnie stworzone do tego typu analiz, takie jak FDS (NIST), Jasmine (BRE), czy Smartfire (Uniwersytet Greenwich), które od wielu lat są weryfikowane i udoskonalane tak, aby coraz dokładniej opisywały zjawiska pożaru i rozprzestrzeniania się dymu. Do drugiej grupy należą programy utworzone z myślą o symulowaniu wielu zjawisk należących do szeroko pojętej dynamiki płynów, takie jak Fluent, Phoenix czy CFX, posiadające ogólnie znacznie większe możliwości od programów z grupy

pierwszej, ale jednocześnie znacznie mniej przystosowane do omawianych tu analiz, a przez to zwiększające prawdopodobieństwo popełnienia błędów przy ich wykonywaniu.

Podstawą do podjęcia decyzji o wyborze programu komputerowego do przeprowadzenia danej analizy jest informacja na temat jego **walidacji** (w tym przypadku - potwierdzenia trafności zastosowanych równań jako modelu matematycznego rozwoju rozpatrywanego rodzaju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu [6]) w konkretnym obiekcie. Ocena modelu jest decydująca przy określaniu jego dopuszczalnych zastosowań i ograniczeń. Informacje na temat walidacji poszczególnych programów są dostarczane przez ich twórców w oparciu o porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych przy pomocy danego modelu komputerowego z wynikami pomiarów badań w skali rzeczywistej. Te różnice wyników, których nie da się wyjaśnić błędami obliczeniowymi modelu lub niedokładnością pomiarów, muszą być przypisane błędom w założeniach lub uproszczeniom modelu fizycznego.

Ze względu na olbrzymie koszty przeprowadzania badań pożarów obiektów budowlanych w skali rzeczywistej, wystarczającą ilość danych, umożliwiających prawidłową walidację swoich programów są w stanie zgromadzić jedynie największe ośrodki specjalizujące się w tej dziedzinie. Obecnie, dzięki dużym dotacjom ze strony rządu USA, największe środki finansowe na potrzeby badawcze w tej dziedzinie posiada NIST (FDS), a w dalszej kolejności BRE (Jasmin, Sofie) i Uniwersytet Greenwich (Smartfire) oraz inne mniejsze ośrodki. Ich programy należy zatem obecnie uznać za najlepiej zweryfikowane pod względem poprawności symulowania zjawiska rozwoju pożaru i rozprzestrzeniania się dymu.

Istotnym elementem wykonywania symulacji komputerowych CDF jest także ich **weryfikacja**, polegająca na sprawdzeniu poprawności rozwiązania zastosowanych w programie równań. W tym zakresie szczególnie istotnym czynnikiem jest ilość czynnych użytkowników danego oprogramowania, którzy przeprowadzając różnego typu analizy, weryfikują prawidłowość ich działania i przekazują producentom uwagi o wszelkich nieprawidłowościach. Obecnie zdecydowaną największą ilość użytkowników posiada program FDS (kilka tysięcy), a w dalszej kolejności – Smartfire i Jasmine (każdy po kilkuset) [1, 5].

Zgodnie z normami NFPA 92B [8] oraz NFPA 5000 [2] do przeprowadzenia symulacji komputerowych związanych z warunkami panującymi w obiekcie w czasie pożaru oraz z pracą systemów wentylacji pożarowej, niezbędne jest przyjęcie **prawidłowych założeń** w czterech podstawowych zakresach:

- 1) scenariusze pożarowe, najbardziej niekorzystne, w zależności od celu analiz, pod względem:
 - możliwości ewakuacji ludzi z budynku,
 - bezpieczeństwa ekip ratowniczych,
 - bezpieczeństwa konstrukcji,
 - ochrony mienia;
- 2) źródło pożaru i materiały palne:
 - wielkość projektowa mocy pożaru oraz jej zmienność w czasie,
 - lokalizacja źródła pożaru,
 - ilość ciepła oddawanego na drodze promieniowania,
 - ilość powstającego dymu (emisja sadzy),
 - powierzchnia pożaru;
- 3) model obiektu :
 - istotne elementy architektoniczne (ściany, stropy, słupy, podciągi),
 - rozmiary i lokalizacja wszelkich otworów zewnętrznych obiektu,
 - nieszczelności w strukturze budynku,
 - właściwości termofizyczne przegród budowlanych,

- lokalizacja, parametry (lokalizacja, wydajność, powierzchnia otworów napływu i wyciągu powietrza) i czas działania instalacji wentylacyjnej oddymiającej,
- temperatura początkowa ;

4) warunki zewnętrzne :

- wysokość ponad powierzchnią terenu,
- ciśnienie atmosferyczne,
- temperatura zewnętrzna,
- kierunek i prędkość wiatru,
- wilgotność względna powietrza.

Ponadto, bardzo istotną rolę odgrywają:

- a) prawidłowe określenie domeny obliczeniowej, która powinna być trójwymiarowa i posiadać granice przeprowadzone tak, aby bezpośrednio nie powodować zmian w warunkach rozprzestrzeniania się dymu,
- b) siatka obliczeniowa, która powinna mieć odpowiednią gęstość, zwłaszcza w pobliżu miejsc szczególnie istotnych z punktu widzenia rozprzestrzeniania się dymu, takich, jak źródło pożaru czy wentylatory.

Wszystkie z wymienionych powyżej założeń powinny zostać uwzględnione w raporcie z przeprowadzonej symulacji CFD poprzez opisanie wartości poszczególnych elementów wraz z uzasadnieniem ich przyjęcia i podaniem źródeł literaturowych, z których je zaczerpnięto [2, 3, 5].

Wyniki symulacji

Kolejnym elementem wykonanych symulacji jest odczyt i prawidłowa interpretacja otrzymanych wyników. Wymagania w zakresie analizowanych parametrów pożaru uzależnione są od rodzaju przeprowadzanej symulacji, typu obiektu czy przyjętego celu analizy. W Polsce wykorzystanie technik CFD w ochronie przeciwpożarowej polega najczęściej na ocenie warunków panujących w czasie pożaru w obiektach użyteczności publicznej (rzadziej przemysłowych), w aspekcie możliwości przeprowadzenia bezpiecznej ewakuacji ich użytkowników. Po określeniu czasu potrzebnego do ewakuacji ludzi, konieczne jest stwierdzenie, czy w tym czasie, na chronionych przejściach i drogach ewakuacyjnych, nie wystąpi zadymienie lub temperatura, uniemożliwiające bezpieczną ewakuację.

Pod pojęciem zadymienia uniemożliwiającego bezpieczną ewakuację rozumie się występowanie w obszarze poruszania się ludzi (do wysokości minimum 1.8 m od posadzki) widzialności o co najmniej dopuszczalnym zasięgu, a także dopuszczalnych wartości stężenia tlenu i tlenku węgla. Zakłada się również, że we wspomnianym obszarze nie nastąpi przekroczenie dopuszczalnej wartości temperatury, a w szczególnych przypadkach dopuszczalnej wartości promieniowania cieplnego. Najczęściej przyjmuje się następujące wartości graniczne poszczególnych parametrów [7]:

- temperatura – 60°C,
- zasięg widzialności – 10 m dla krawędzi elementów budowlanych i fluorescencyjnych znaków ewakuacyjnych, co odpowiada zasięgowi widzialności 15 m dla znaków podświetlanych,
- stężenie CO – 800 ppm dla czasu ekspozycji 15 min,
- stężenie O₂ – 10% dla czasu ekspozycji 15 min.

Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że w typowych obiektach użyteczności publicznej parametrem obniżającym się najszybciej i w pierwszej kolejności powodującym utrudnienia w ewakuacji, jest spadek zasięgu widzialności. W drugiej kolejności występuje przekroczenie dopuszczalnej temperatury, a dopiero znacznie później – wzrost stężenia CO i

spadek stężenia O_2 . W związku z tym, w praktyce inżynierskiej, analizie poddawane są najczęściej: poziom zasięgu widzialności oraz temperatura.

Dostępne obecnie techniki symulacji komputerowych CFD umożliwiają dokonywanie pełnej analizy warunków panujących w obiekcie w kolejnych minutach od momentu powstania pożaru, z uwzględnieniem działania systemów sygnalizacji pożaru i wentylacji pożarowej oraz instalacji tryskaczowej. Pozwala to określić zarówno wymaganą intensywność usuwania dymu oraz właściwe rozmieszczenie otworów nawiewnych i wyciągowych, zapewniające utrzymanie odpowiednich warunków na drogach ewakuacyjnych w przewidywanym czasie ewakuacji, jak i możliwość zastosowania wentylatorów wyciągowych odpornych na działanie gazów pożarowych o temperaturze mniejszej niż $400^{\circ}C$ przez 120 minut, tak aby zachowane zostało bezpieczeństwo konstrukcji i ekip ratowniczych. Jednak należy mieć na uwadze, iż przy przeprowadzaniu symulacji komputerowych CFD konieczne jest uwzględnienie czynników, opisanych powyżej. Niewłaściwe wykonanie symulacji może bowiem doprowadzić do uzyskania wyników zupełnie nieodpowiadających warunkom rzeczywistym. Jak wykazały ubiegłoroczne badania w skali rzeczywistej dokładności wyników uzyskiwanych w programie FDS, wartości przyrostów temperatury w warstwie dymu mogą różnić się od rzeczywistych o nie więcej niż 15%, z wyjątkiem warstwy podsufitowej (rozmieszczane są w niej wentylatory strumieniowe), dla której różnice mogą wynosić nie więcej niż 20%. Rzeczywiste spadki widzialności są z kolei zawsze mniejsze od określonych za pomocą programu FDS, nawet do 30%. Tak więc przy ocenie warunków bezpieczeństwa pożarowego w obiekcie, aby zapewnić odpowiedni margines bezpieczeństwa, uzyskane za pomocą symulacji komputerowych z użyciem programu FDS **wartości przyrostów temperatur należy zwiększać o 15%, przy czym w warstwie podsufitowej o 20%, natomiast uzyskane wartości spadku widzialności można wykorzystywać bez zmian** [5].

Procedury odbiorowe

W ramach procedury związanej z przekazaniem instalacji wentylacji pożarowej w użytkowanie należy przewidywać pomiary natężenia przepływu powietrza dopływającego i odprowadzanego przez instalację, a także pomiary w zakresie rozkładu prędkości powietrza wentylacyjnego w miejscach charakterystycznych. Wymagane jest także przeprowadzenie badań z użyciem zimnego dymu, ale wyłącznie w celu zobrazowania tras, po których przemieszcza się powietrze wentylacyjne w pomieszczeniu, a nie w celu całościowej oceny efektywności działania instalacji oddymiającej, co niekiedy próbuje się robić w naszym kraju. Jak dotąd jedynie w Australii funkcjonuje norma [9], w oparciu o którą dokonywane są tam badania z użyciem gorącego dymu, mające wykazać, że wszystkie elementy systemu oddymiania są sprawne, automatyczne włączanie tego systemu następuje zgodnie z przyjętym dla danego obiektu algorytmem sterowań podczas pożaru, a wydajność systemu nie została obniżona wskutek błędów wykonawczych.

Należy jednak podkreślić, że powyższe badania nie mogą być traktowane jako sprawdzenie wyników wykonanych symulacji komputerowych. Próby sprawdzenia tych wyników w warunkach bardzo uproszczonych doświadczeń zupełnie mijają się z celem, bo programy symulacji komputerowych są opracowywane na podstawie nieporównanie bardziej dokładnych pomiarów parametrów pożarów zainicjowanych wielokrotnie w obiektach w skali rzeczywistej i stanowią ich odzwierciedlenie. Wysoką wiarygodność mogłyby zapewnić jedynie badania w rozpatrywanym obiekcie w pełnej skali, z pożarem o rzeczywistej mocy. Ich wykonanie wiąże się jednak zawsze z dużymi trudnościami w postaci konieczności

przeprowadzenia poważnych prac remontowych i ze znacznymi dodatkowymi kosztami, co najczęściej nie jest akceptowane [4, 10].

Źródła literaturowe

1. M. K. Volley et al. „Verification and validation – how determine the accuracy of fire models”, Fire Protection Engineering, Spring 2007;
2. NFPA 5000: Building Construction and Safety Code, 2006 Edition;
3. C. Wade et al. “Developing Fire Performance Criteria for New Zealand’s performance based building code”, Fire Safety International Seminar I Paris, April 2007;
4. H.P.Morgan, J.C.De Smedt. Hot smoke tests: testing the design performance of Smoke and Heat Ventilation Systems and of Impulse Systems, Fire Asia 2003 “A safe city in motion”, Hong Kong, 26-28 February 2003. Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7: Fire Dynamics Simulator. US Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research (RES), May 2007.
5. Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7: Fire Dynamics Simulator. US Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research (RES), May 2007.
6. ASTM E 1355 “Standard Guide for Evaluating Predictive Capability of Deterministic Fire Models” American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 2005.
7. PD 7974 -6: 2004 The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human Factors: Life safety strategies –Occupant evacuation, behaviour and condition (SUB-system 6).
8. NFPA 92B “Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces” 2005 Edition.
9. AS 4391 – 1999. Australian Standard “Smoke management systems – Hot smoke test”.
10. CFD Modelling for Car Park Ventilation Systems – a guide for designers and regulators, Smoke Control Association, February 2007