

mgr inż. Wojciech Węgrzyński¹⁾
mgr inż. Grzegorz Krajewski¹⁾
dr inż. Paweł Sulik^{1)*}

Narzędzia numeryczne w kreowaniu bezpieczeństwa pożarowego obiektów

Numerical tools in creating a fire safe buildings

DOI: 10.15199/33.2015.11.17

Streszczenie. W artykule przedstawiono metody numeryczne wykorzystywane w kreowaniu bezpieczeństwa pożarowego. Szczególną uwagę poświęcono analizom CFD oraz ewakuacji osób. Zaprezentowano możliwości zastosowania tych analiz także na przykładzie prac realizowanych w Zakładzie Badań Ogniwych Instytutu Techniki Budowlanej.

Słowa kluczowe: analizy numeryczne, inżynieria bezpieczeństwa pożarowego, projektowanie nakierowane na cel.

Abstract. The article presents numerical methods used in creating fire safety engineering. Special description has been focused on CFD methods and human evacuation analysis. Potential use of the methods was presented, with presentation of their use in practice by Fire Research Department of Building Research Institute.

Keywords: numerical analysis, fire safety engineering, performance-based design.

Zaprojektowanie obiektu, który zapewni użytkownikom akceptowalny poziom bezpieczeństwa w przypadku pożaru nie sprowadza się wyłącznie do wypełnienia wszystkich wymagań zawartych w przepisach techniczno-budowlanych [1] i przeciwpożarowych [2]. Niestety, stan prawny nie nadąża za rozwojem budownictwa i często stanowi ramy, w których trudno zmieścić odważne, i niekonwencjonalne nowoczesne obiekty budowlane. W takich przypadkach za bezpieczeństwo użytkowników obiektu odpowiadają projektanci, rzeczoznawcy oraz eksperci biorący udział w tworzeniu projektu. Obecnie w miarę szybko mogą oni uzyskać potwierdzenie, czy zaproponowane rozwiązania spełniają wymagania podstawowe zawarte w rozporządzeniu 305/2011 UE [3]. Dzięki narzędziom numerycznym, które pozwalają przenieść pożar w świat wirtualny, w krótkim czasie można określić, czy zastosowane zabezpieczenia są poprawne. Od ponad 15 lat Zakład Badań Ogniwych Instytutu Techniki Budowlanej bierze udział w tworzeniu podstaw naukowych i ram wykorzystania narzędzi numerycznych oraz ich praktycznej implementacji w projektach budowlanych realizowanych w Polsce i wielu innych krajach Europy.

Metody oceny bezpieczeństwa pożarowego

Każda, nawet najprostsza, analiza dotycząca z bezpieczeństwa pożarowego jest oceną ryzyka związanego z pożarem. Można je opisać jako iloczyn prawdopodobieństwa powstania pożaru oraz jego skutków. W każdej analizie prowadzący przyjmuje założenia, których celem jest odzwierciedlenie najbardziej niekorzystnego prawdopodobnego pożaru mogącego wystąpić w danej przestrzeni, a następnie określa potencjalne skutki takiego zdarzenia. Wskazuje to, jak dużą odpowiedzialność mają osoby prowadzące analizy.

Projektowanie, w którym wyznacznikiem poprawności rozwiązania jest spełnienie kryteriów oceny ryzyka, można na-

zwać **projektowaniem nakierowanym na cel** (ang. *performance-based engineering*). Metody wykorzystywane w takim podejściu dzieli się na:

- badania fizyczne w pełnej skali;
- badania fizyczne w ograniczonej skali;
- metody numeryczne.

Powiązania między przedstawionymi metodami badań były przedmiotem wielu badań naukowych w Instytucie Techniki Budowlanej, np. w ramach projektu POIG 5.5 *Zasady stosowania inżynierii bezpieczeństwa pożarowego do projektowania systemów wentylacji pożarowej tuneli drogowych* [4] (fotografia). Z uwagi na koszty prowadzenia badań w pełnej



Badania w skali modelowej nad rozwojem pożaru w tunelu [4]
Scale model research on the fire growth in tunnels [4]

skali oraz ograniczenia wynikające z wykorzystania skali modelowej, najpopularniejszymi metodami wspomagania procesu projektowego są komputerowe modele, spośród których należy wymienić:

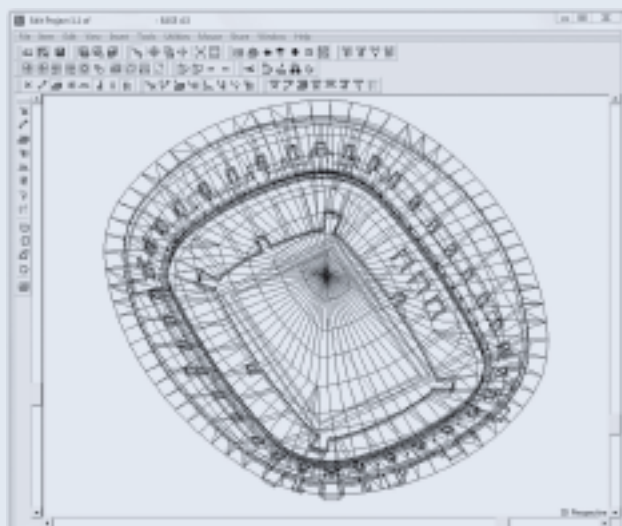
- metody FEM, FVM, wykorzystywane w analizach wpływu podwyższonej temperatury na konstrukcję obiektu;
- modele CFD – symulacje z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów, stosowane w ocenie rozprzestrzeniania się dymu i ciepła powstałego w pożarze;
- modele jedno- i dwustrefowe pozwalające przewidzieć przepływ dymu w obiekcie w przypadku prostego układu powiązanych ze sobą pomieszczeń;

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniwych

^{*)} Autor do korespondencji: e-mail: p.sulik@itb.pl

- modele ewakuacji osób pozwalające połączyć wyniki innych analiz z przebiegiem procesu ewakuacji w badanym obiekcie;

- matryce i inne modele szacowania ryzyka;
- modele oceny skutków uwolnienia substancji niebezpiecznych;
- modele oceny skutków wybuchu;
- modele akustyczne wykorzystywane w procesach optymalizacji działania Dźwiękowych Systemów Ostrzegawczych (rysunek 1).



Rys. 1. Model wykorzystany w numerycznej analizie rozkładu współczynnika zrozumiałości mowy [Opracowanie – Autorzy]
Fig. 1. Numerical model used in acoustic analysis of the STI parameter [Work – Authors]

Obliczeniowa mechanika płynów

Szczególne znaczenie w ocenie bezpieczeństwa pożarowego mają analizy numeryczne wykorzystujące metodę **obliczeniowej mechaniki płynów** (ang. *Computational Fluid Dynamics, CFD*). Kojarzone głównie z aerodynamiką pojazdów czy optymalizacją przepływu płynów, stanowią również znakomite narzędzie sprawdzające się w prognozowaniu rozprzestrzeniania się dymu i ciepła powstałych w pożarze. Przepływ dymu wymuszony jest oddziaływającymi siłami wyporu lub działaniem urządzeń wentylacji pożarowej. Każde z tych oddziaływań może być dokładnie odwzorowane w analizie numerycznej wykorzystującej metodę CFD. Dzięki temu otrzymane wyniki są wiarygodne, co wielokrotnie udało się potwierdzić w pracach nad walidacją wykorzystywanych przez nas modeli [5].

Analiza CFD polega na rozwiązaniu układu równań różniczkowych opisujących przepływ masy i energii w badanym układzie, podzielonym na skończoną liczbę niewielkich objętości, w dokładnie opisanych następujących po sobie krokach czasowych. Rozwiązanie równań stanowią wartości ciśnienia, temperatury, gęstości, prędkości przepływu i stężenia dymu itp., znane w przypadku każdej objętości w badanym układzie, w każdym momencie analizy [5 ÷ 7]. W celu rozwiązania układu równań opisujących analizowane zjawiska należy przeprowadzić za pomocą siatki numerycznej strukturalnej bądź niestrukturalnej dyskretyzację obszaru analizy (domeny) na skończoną liczbę objętości kontrolnych. W przypadku każdej obję-

tości kontrolnej rozwiązywany jest układ równań, opisujących analizowany problem. W zależności od przyjętej metody najpierw wyznaczane są wartości prędkości lub ciśnienia, a następnie na ich podstawie kolejno parametry przepływu – ciśnienie, prędkość, przepływ, temperatura itp. [6].

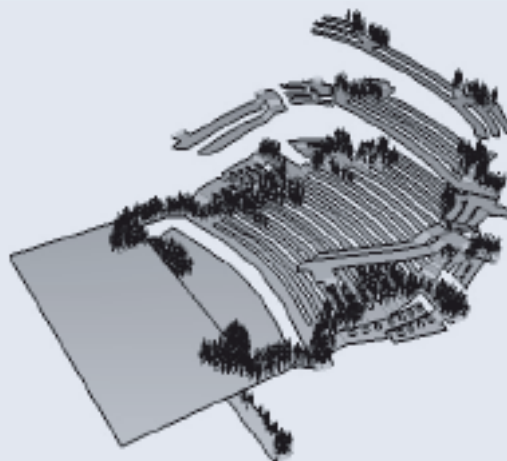
Ewakuacja osób

Bez zapewnienia możliwości ucieczki w razie pożaru, żadnego budynku nie można nazwać bezpiecznym. Środowisko pożaru zmienia się w sposób dynamiczny, nie sposób zatem ocenić zagrożenia, które pożar stwarza osobom ewakuującym się, bez znajomości przebiegu procesu ewakuacji obiektu. Kryterium to, powszechnie wykorzystywane w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, sformułowano w postaci zasady:

Wymagany Czas Bezpiecznej Ewakuacji >
> *Dostępny Czas Bezpiecznej Ewakuacji*

Dostępny czas bezpiecznej ewakuacji to przedział czasowy od powstania pożaru do osiągnięcia warunków krytycznych środowiska, uniemożliwiających ewakuację z budynku (np. nadmierne zadymienie czy temperatura na drogach ewakuacji, utrata nośności konstrukcji budynku). **Wymagany czas bezpiecznej ewakuacji** to przedział czasowy liczony od chwili powstania pożaru do osiągnięcia miejsca bezpiecznego przez ostatnią ewakuującą się osobę. Ewakuację uznaje się za możliwą, gdy dostępny czas bezpiecznej ewakuacji powiększony o margines bezpieczeństwa jest większy niż wymagany czas bezpiecznej ewakuacji [8].

Praktyczne wykorzystanie komputerowych modeli ewakuacji towarzyszy niemal wszystkim analizom związanym z oceną warunków środowiska w dużych obiektach budowlanych. Na podstawie przeprowadzonych analiz podejmuje się decyzje dotyczące optymalizacji dróg ewakuacji oraz lokalizacji znaków ewakuacyjnych. Wykorzystując zaawansowane modele, można odwzorować zachowanie ewakuujących się osób oraz dokonać oceny ich wpływu na proces ewakuacji (rysunek 2).

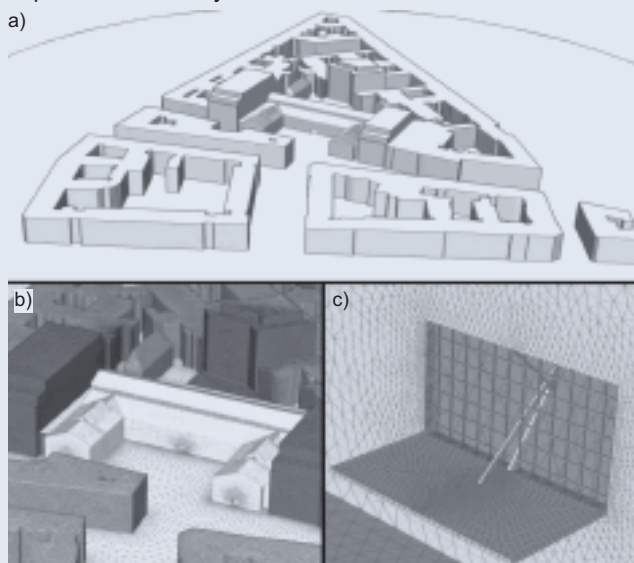


Rys. 2. Symulacja ewakuacji sali teatralnej wraz z przyszcieniem, widok w 30 sekundzie analizy [Opracowanie – Autorzy]
Fig. 2. Evacuation analysis of a theatre and the stage, view in 30 s of analysis [Work – Authors]

Analizy łączone

Obecnie wykorzystanie zaawansowanych narzędzi numerycznych w ocenie proponowanych rozwiązań jest nieodłącznym elementem wielu projektów. Pośród analiz prowa-

dzonych w Zakładzie Badań Ogniwych, znajdują się także takie, które zdecydowanie wykraczają poza zakres ich typowego wykorzystania. Zaliczają się do nich analizy łączone, np. jednoczesna ocena rozwoju pożaru, rozprzestrzeniania się ciepła (rysunek 3) oraz jego oddziaływania na skomplikowaną konstrukcję budynku czy ocena skuteczności działania grawitacyjnych systemów oddymiających w warunkach oddziaływania wiatru. Analizy te wymagają zaangażowania zespołu ekspertów z różnych dziedzin, a połączenie różnych metod numerycznych przysparza wielu trudności. W ramach jednego środowiska obliczeniowego mogą być prowadzone jednocześnie (analiza wpływu wiatru wraz z analizą rozprzysy dymu w środowisku ANSYS, [9]), natomiast w przypadku wykorzystania różnych narzędzi wymagają skomplikowanej procedury eksportu i importu wyników analizy. Problemy powstają także w trakcie analizy wyników wielopłaszczyznowych analiz – kryteria oceny są często trudne do określenia i wymagają indywidualnej oceny ryzyka w przypadku badanego obiektu. Z uwagi na stopień zaawansowania prac prowadzonych w Zakładzie Badań Ogniwych ITB, także w literaturze nie udaje się znaleźć rozwiązań wielu z wymienionych problemów. Z dumą możemy więc stwierdzić, że wiele z wykonanych przez nas opracowań na potrzeby projektów komercyjnych jest z sukcesem prezentowanych na konferencjach czy w czasopiśmie naukowych.



Rys. 3. Model otoczenia budynku, wewnątrz którego jednocześnie analizowane jest rozprzestrzenianie się dymu i ciepła (a); widok siatki w otoczeniu budynku (b) oraz widok modelu okna oddymiającego (c)

[Opracowanie – Autorzy]
Fig. 3. Numerical model of a building in which CFD analysis is carried (a), view of the numerical mesh (b) and view of the smoke exhaust point (c)
[Work – Authors]

Podsumowanie

Dzięki rozwojowi metod numerycznych oraz rosnącej, łatwo dostępnej, mocy obliczeniowej komputerów, obserwujemy ciągły wzrost wykorzystania metod numerycznych w projektowaniu rozwiązań związanych z bezpieczeństwem pożarowym. Podejście to pozwala na projektowanie instalacji lepiej dopasowanych do chronionych obiektów, skuteczniejszych oraz w wielu przypadkach tańszych. Niestety,

wykorzystanie zaawansowanego modelowania, bardzo wrażliwego na dane wejściowe, stanowi rosnący problem natury merytorycznej – brak wiarygodnych i uniwersalnych danych wejściowych, oraz etycznej – możliwość nadużycia i wpływu na wynik analizy. Wciąż brakuje regulacji prawnych dotyczących analiz numerycznych w budownictwie oraz wymagań stawianych osobom odpowiedzialnym za prowadzenie analiz numerycznych (ich wiedza w zakresie bezpieczeństwa pożarowego czy metod numerycznych w żaden sposób nie jest weryfikowana). Trudno jest także porównywać symulacje pochodzące z różnych ośrodków, często bowiem różnice w przyjętych założeniach, kształcie modelu czy wybranym sposobie rozwiązania są bardzo duże. Można oczekiwać dalszego wzrostu zainteresowania i wykorzystania analiz numerycznych w kreowaniu bezpieczeństwa pożarowego. Rozwój oprogramowania i sprzętu w ciągu najbliższej dekady powinien pozwolić na realistyczne odwzorowanie rozwoju pożaru w obiekcie na podstawie modeli pirolizy i spalania, w oderwaniu od przyjętego i powszechnie wykorzystywanego uproszczonego opisu matematycznego tego zjawiska. Dalszy wzrost mocy obliczeniowej pozwoli badać więcej scenariuszy rozwoju pożaru w krótszym czasie, a analiza wyników obliczeń być może przybierze formę analizy statystycznej danych pochodzących z kilkudziesięciu wariantów rozwoju pożaru w obiekcie.

W artykule zostały wykorzystane badania naukowe wykonane w ramach realizacji projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. nr 75, poz. 690), z późniejszymi zmianami.
- [2] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (Dz.U. nr 109, poz. 719), z późniejszymi zmianami.
- [3] Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 z 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG.
- [4] Węgrzyński W., Krajewski G., Sztarbała G., Kamień Milowy 3 – Opracowanie wytycznych i procedur projektowania systemów wentylacji pożarowej podziemnych obiektów komunikacyjnych oraz środków ewakuacji, POIG. 01.01.02-10-106/09-04, Warszawa 2012.
- [5] Węgrzyński W., G. Krajewski, Wykorzystanie badań w skali modelowej do weryfikacji obliczeń CFD wentylacji pożarowej w tunelach komunikacyjnych, Konferencja BiBT 2014, Kraków 2014.
- [6] Sztarbała, G. An estimation of conditions inside construction works during a fire with the use of Computational Fluid Dynamics, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 61, nr 1, 2013.
- [7] Węgrzyński W., Krajewski G., Dobór modeli oraz warunków brzegowych a wynik analizy numerycznej, Materiały Budowlane (12) 2014.
- [8] Sulik P., Sędlak B., Turkowski P., Węgrzyński W., Bezpieczeństwo pożarowe budynków wysokich i wysokościowych, [W:] A. Halicka, Budownictwo na obszarach zurbanizowanych, Nauka, praktyka, perspektywy, Politechnika Lubelska 2014, pp. 105 – 120.
- [9] Węgrzyński W., Ocena wpływu wiatru na skuteczność działania grawitacyjnej wentylacji oddymiającej, Materiały Budowlane (11) 2014.

Przyjęto do druku: 08.09.2015 r.