

Grzegorz Sztarbała*

PROGNOZOWANIE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DYMU W BUDYMKACH PRZY WYKORZYSTANIU METOD NUMERYCZNEJ MECHANIKI PŁYNÓW (CFD)

W artykule zaprezentowano korzyści wynikające ze stosowania metod CFD do prognozowania rozprzestrzeniania się dymu w obiektach budowlanych. Podano krótką charakterystykę numerycznej mechaniki płynów, jak również zalety symulacji komputerowych jako narzędzia pozwalającego zastąpić testy dymowe przeprowadzane w warunkach rzeczywistych. Wyniki uzyskane na drodze symulacji obejmują następujące informacje: dane o prędkości i gęstości dymu/powietrza, koncentracji gazów CO, CO₂, HCN i in. oraz zakres widzialności, co daje możliwość weryfikacji skuteczności przyjętego rozwiązania projektowego. Przedstawiono także wyniki symulacji wykonanej dla budynku wysokiego z atrium. Załączone rysunki ilustrują rozkład temperatury i widzialność w 5 minucie oraz w 15 minucie od wybuchu pożaru.

1. Wprowadzenie

Prognozowanie rozprzestrzeniania się dymu w budynkach spotyka się ostatnio z bardzo dużym zainteresowaniem projektantów, wykonawców, rzeczoznawców oraz inwestorów. Dotyczy to zarówno obiektów nowo powstających, jak też już istniejących. Istotną rolę pośród zabezpieczeń przeciwpożarowych pełnią systemy wentylacji pożarowej. Odpowiednio zaprojektowany system wentylacji pożarowej jest w stanie przeciwdziałać rozprzestrzenianiu się dymu i toksycznych produktów spalania, umożliwiać ewakuację ludzi ze strefy objętej pożarem oraz zmniejszać starty materialne spowodowane działaniem dymu i wysokiej temperatury gazów pożarowych.

Numeryczna mechanika płynów (CFD) znajduje szerokie zastosowanie jako narzędzie do prognozowania przepływów dymu, powietrza i ciepła w budynkach. Nowe systemy wentylacji oddymiającej, takie jak wentylacja strumieniowa, bazują na tej metodzie i bez jej wykorzystania poprawne zaprojektowanie takiego systemu jest niemożliwe. Wykorzystując CFD, możemy oceniać skuteczność funkcjonowania projektowanego systemu wentylacji przy różnych scenariuszach rozwoju pożaru.

2. Rozwój pożaru

Wiarygodny scenariusz pożarowy jest kluczowym parametrem mającym wpływ na skuteczność funkcjonowania systemów wentylacji oddymiającej. Podstawowy element

* mgr inż. – asystent w Zakładzie Badań Ogniwych ITB

każdego scenariusza stanowi zależność ilości wydzielanego ciepła Q w jednostce czasu, tzw. *heat release rate*.

Na potrzeby pożarów projektowych, zgodnie z NFPA 204 *Standard for Smoke and Heat Venting*, została wprowadzona do powszechnego stosowania klasyfikacja szybkości rozwoju pożaru na podstawie współczynnika wzrostu pożaru α . Ilość wyzwalanego ciepła w danej chwili czasowej jest iloczynem współczynnika wzrostu pożaru i czasu w kwadracie. W dokumencie NFPA 204 podano cztery charakterystyczne wartości współczynnika α :

- $\alpha = 0,002931 \text{ kW/s}^2$ – przy wolnym rozwoju pożaru,
- $\alpha = 0,011271 \text{ kW/s}^2$ – przy średnim rozwoju pożaru,
- $\alpha = 0,04689 \text{ kW/s}^2$ – przy szybkim rozwoju pożaru,
- $\alpha = 0,1878 \text{ kW/s}^2$ – przy bardzo szybkim rozwoju pożaru.

Prowadzone prace badawcze wykazały, że na potrzeby symulacji komputerowych należy stosować krzywe będące odwzorowaniem rzeczywistych szybkości wyzwalanego ciepła. Nowoczesne stanowiska badawcze, do jakich można zaliczyć między innymi Cone Calorimeter czy Room Corner, pozwalają na odwzorowanie takich charakterystyk.

3. Metoda CFD

Podstawę metody CFD stanowią równania różniczkowe będące matematycznym zapisem praw zachowania masy, pędu i energii. Niezależnie od rodzaju ruchu płynu rozwiązywane jest równanie ciągłości przepływu (1), równanie pędu (2) oraz równanie bilansu energii (4)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

gdzie ρ – gęstość płynu;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{T}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

gdzie: p – ciśnienie hydrostatyczne,

$\bar{\bar{T}}$ – tensor naprężeń (opisany poniżej),

$\rho \vec{g}$ – siły masowe,

\vec{F} – siły powierzchniowe.

Tensor naprężeń zdefiniowany jest zależnością:

$$\bar{\bar{T}} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

gdzie: μ – współczynnik lepkości dynamicznej,

\mathbf{I} – macierz jednostkowa.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla (\rho h \vec{v}) = \nabla \left[(k + k_t) \nabla T \right] + S_h \quad (4)$$

gdzie: h – entalpia,
 k – przewodność cieplna,
 k_t – przewodność cieplna dla przepływu turbulentnego,
 T – temperatura,
 S_h – źródła/upusty mocy cieplnej.

W mechanice płynów wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje przepływu: laminarny (uwarstwiony) i turbulentny (burzliwy). Ruch laminarny w omawianym zakresie występuje bardzo rzadko i nie poświęca mu się szczególnej uwagi. Za powszechnie występujący uznaje się przepływ burzliwy.

Cechą charakterystyczną ruchu turbulentnego jest brak wewnętrznej stabilności przepływu. Występują przypadkowe nieregularne zaburzenia – pulsacje (fluktuacje), które powodują, że ruch wewnątrz obszaru jest zmienny w czasie. Wielkością charakterystyczną jest liczba Reynoldsa (Re), określana za pomocą zależności (5)

$$Re = \frac{v_{sr} D \rho}{\mu} \quad (5)$$

gdzie: v_{sr} – średnia prędkość w obszarze,
 D – wymiar charakterystyczny,
 ρ – gęstość płynu,
 μ – współczynnik lepkości dynamicznej.

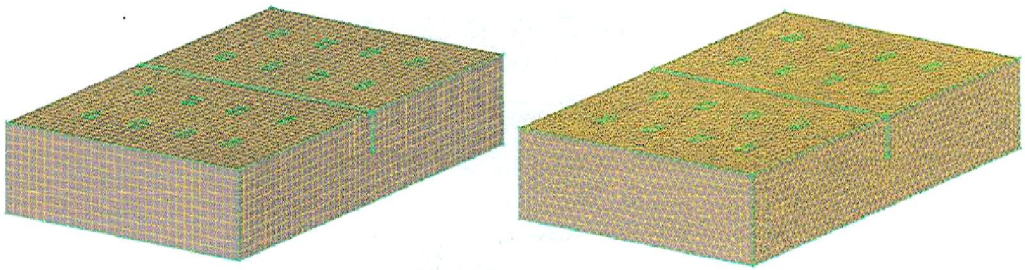
Modelowanie turbulencji polega na uzupełnianiu układu równań Reynoldsa i ciągłości przepływu dodatkowymi równaniami. Wymaga to przyjęcia hipotez pozwalających wyznaczyć naprężenia turbulentne, które w istotny sposób wpływają na kształt pola prędkości. Zespół równań i hipotez umożliwiających otrzymanie rozwiązania równań Reynoldsa jest określany mianem modeli turbulencji.

Programy CFD dysponują różnymi modelami turbulencji. Podstawowymi modelami są: modele κ - ϵ (Standard κ - ϵ model, Renormalization-group (RNG) κ - ϵ model, Realizable κ - ϵ model), Reynolds Stress Model (RSM), Large Eddy Simulation (LES).

Opisany powyżej układ równań (1)–(4) w sensie matematycznym jest układem silnie nieliniowym i nie można go rozwiązać w sposób analityczny. Rozwiązuje się go za pomocą metody iteracyjnej. Najczęściej są stosowane trzy metody:

- metoda różnic kończonych (MRS),
- metoda elementów skończonych (MES),
- metoda objętości skończonej (MOS).

Niezależnie od przyjętej metody numerycznej, w celu rozwiązania układu równań opisujących analizowane zjawisko należy dokonać dyskretyzacji przestrzeni objętej analizą za pomocą siatki. Dostępne na rynku programy CFD dysponują dwoma typami siatek: siatką strukturalną (kartezjańską) lub niestructuralną. Wśród siatek niestructuralnych najczęściej są stosowane siatki heksahedralne, tetrahedralne lub mieszane. Na rysunku 1 został pokazany przykład odwzorowania przestrzeni trójwymiarowej za pomocą siatki strukturalnej i niestructuralnej tetrahedralnej.



Rys. 1. Przykład odwzorowania analizowanej przestrzeni za pomocą siatki strukturalnej i niestrukturalnej tetrahedralnej

Fig. 1. Example of mapping of analyzed space using structural and tetrahedral non-structural mesh

Po przygotowaniu siatki dyskretyzacji i wyborze modelu turbulencji należy przystąpić do definicji warunków brzegowych i początkowych.

Kolejnym etapem jest przeprowadzenie obliczeń. Czynność ta jest wykonywana „mechanicznie”, ale może mieć bardzo duży wpływ na jakość otrzymanego wyniku. Dotyczy to przede wszystkim podjęcia decyzji, kiedy otrzymane rozwiązanie można przyjąć za zbieżne.

Ostatnim etapem analizy CFD jest analiza wyników symulacji. Dostępne narzędzia umożliwiają prezentację wyników obliczeń w bardzo różnorodnych postaciach – począwszy od analitycznej, a skończywszy na animacjach. Taki sposób pozwala bardzo przejrzysto zobrazować zachodzące zjawiska.

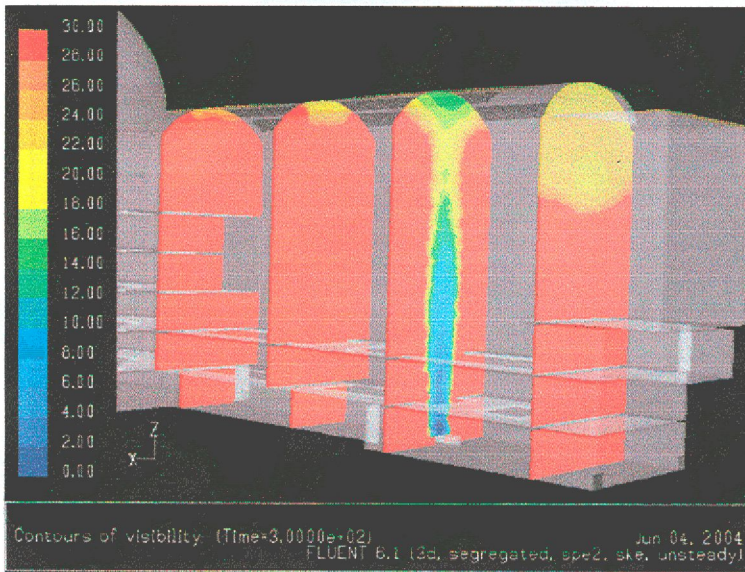
4. Zastosowanie metody CFD

W Zakładzie Badań Ogniwych Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie od ponad trzech lat są prowadzone prace związane z zastosowaniem metody CFD jako narzędzia do analizy rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w takich obiektach, jak garaże podziemne, atria, duże przestrzenie handlowe, tunele drogowe, kolejowe czy metro. Na rysunkach 2–5 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji komputerowych skuteczności funkcjonowania systemu wentylacji pożarowej dla wielokondygnacyjnego atrium.

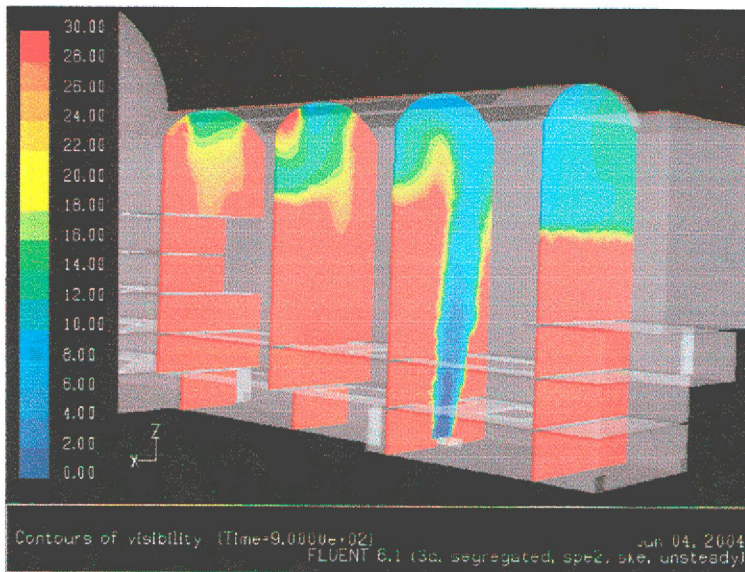
Dym i gorące gazy pożarowe usuwane były z przestrzeni atrium poprzez klapy dymowe zlokalizowane w świetliku. Powietrze kompensacyjne dostarczano do przestrzeni atrium w sposób mechaniczny poprzez 6 otworów zlokalizowanych na najniższej kondygnacji.

Do analizy zostały przyjęte następujące założenia:

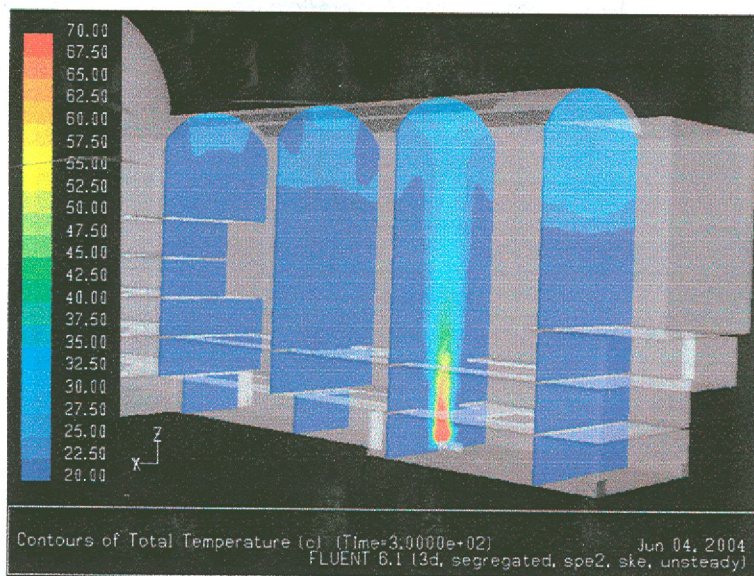
- pożar wybuchu w skrzydle atrium na najniższej kondygnacji,
- moc pożaru i produkcja dymu jest zmienna w czasie,
- pali się stoisko z odzieżą,
- obiekt nie ma instalacji tryskaczowej,
- przyjęto model przestrzeni atrium dyskretyzowany za pomocą siatki tetrahedralnej,
- przyjęto numeryczny model Realizable κ - ϵ ,
- pominięto zjawisko promieniowania.



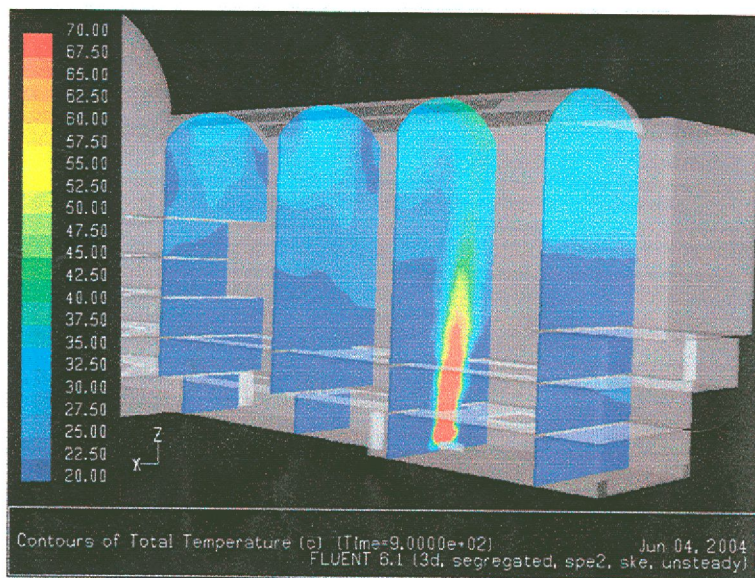
Rys. 2. Zakres widzialności w przekroju przez atrium po upływie 5 min od wybuchu pożaru
 Fig. 2. The range of visibility in the section of atrium 5 min after the fire start



Rys. 3. Zakres widzialności w przekroju przez atrium po upływie 15 min od wybuchu pożaru
 Fig. 3. The range of visibility in the section of atrium 15 min after the fire start



Rys. 4. Rozkład temperatury w przekroju przez atrium po upływie 5 min od wybuchu pożaru
 Fig. 4. The distribution of temperature in the section of atrium 5 min after the fire start



Rys. 5. Rozkład temperatury w przekroju przez atrium po upływie 15 min od wybuchu pożaru
 Fig. 5. The distribution of temperature in the section of atrium 15 minutes after the fire start

Kryterium, które pozwala na ocenę skuteczności systemu wentylacji pożarowej, jest zakres widzialności, temperatura oraz koncentracja toksycznych produktów spalania, takich jak CO, CO₂, HCN, określona dla poziomu od 1,8 m do 2,0 m nad podłogą. Widzialność jest powiązana w sposób ścisły z ilością generowanego dymu, jak i intensywnością usuwania zanieczyszczonego (zadymionego) powietrza. Zakres widzialności należy określać osobno w przypadku obiektów emitujących światło oraz w przypadku obiektów odbijających światło. Przyjmuje się, że powinien on wynosić nie mniej niż 20 m.

5. Podsumowanie

Prowadzone w Zakładzie Badań Ogniwych prace przy zastosowaniu metody CFD w wentylacji oddymiającej wykazały, że w przypadku tego typu analiz należy zwrócić szczególną uwagę na odwzorowanie geometrii analizowanej przestrzeni oraz przyjęcie wiarygodnego scenariusza pożarowego i wiarygodnych warunków brzegowych oraz początkowych.

Częstym błędem – nie tylko w analizach CFD – jest nieuwzględnienie w warunkach brzegowych wpływu wiatru. W przypadku analizy systemów wentylacji oddymiającej, a w szczególności systemów grawitacyjnych, otrzymane wyniki z uwzględnieniem i bez działania wiatru znacznie się od siebie różniły. W wielu przypadkach wpływ wiatru był tak duży, że przyjęte rozwiązania projektowe były nie do zaakceptowania.

Dzięki wykorzystaniu metod CFD jest możliwy wybór odpowiedniego systemu wentylacji pożarowej oraz określenie jego wymaganej wydajności.

Ze względu na szybki rozwój technik komputerowych analizy projektowanych systemów wentylacji pożarowej powinny stać się powszechnie stosowanym narzędziem wspomagającym projektantów.

Bibliografia

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. nr 75/2002
- [2] Klote J. H., Milke J. A.: Principles of smoke management. ASHRAE, 2003
- [3] Sztarbała G., Głąbski P.: Wykorzystanie metod CFD do projektowania wentylacji pożarowej garaży podziemnych. Materiały konferencyjne, Krynica 2003
- [4] Głąbski P.: Kontrola dymu w budynkach z atriami. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 4 (120), 2001
- [5] Kosiorek M., Głąbski P.: Projektowanie instalacji wentylacji pożarowej dróg ewakuacyjnych w budynkach wysokich i wysokościowych. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2002
- [6] Mizieliński B.: Systemy oddymiania budynków. WNT, Warszawa 1999
- [7] AIRPAK 2.1 Product Documentation, User's Guide. FLUENT Inc., 2002
- [8] Fluent 6.0 Product Documentation, User's Guide. FLUENT Inc., 2002

PREDICTING OF SMOKE PROPAGATION IN BUILDINGS USING THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC METHODS

Summary

The paper presents the advantages of using CFD calculations for predicting smoke propagation in buildings, especially with atrium. It shows, how useful CFD programs are, particularly when real smoke and fire test can be replaced by computer simulation. The results of simulation give information about velocity and density of smoke/air, concentration of CO, CO₂, HCN and range of visibility. It is useful for designers, giving them the possibility to verify the effectiveness of suggested fire ventilation systems. The results of simulations carried out for a high building with atrium are also described. The temperature and visibility 5 and 15 minutes after the fire start are presented on figures.

Praca wpłynęła do Redakcji 14 III 2005