

Leszek RUDNIAK¹, Grzegorz SZTARBAŁA², Grzegorz KRAJEWSKI²

e-mail: rudniak@ichip.pw.edu.pl

¹ Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa² Zakład Badań Ognioowych, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

Zastosowanie obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) do prognozowania rozprzestrzeniania dymu i transportu ciepła w obiektach budowlanych

Wstęp

Analiza złożonych zagadnień związanych z jakością powietrza w pomieszczeniu, komfortem ludzi, bezpieczeństwem pożarowym, aerodynamiką budynków użyteczności publicznej i przemysłowych jak i rozprzestrzenianiem zanieczyszczeń wymusza na projektantach i naukowcach zastosowanie metod numerycznych do rozwiązywania równań opisujących przepływ powietrza z jednoczesnym transportem ciepła i masy.

W obiektach budowlanych o złożonej geometrii jak np. chemiczne instalacje przemysłowe, tunele, centra handlowe i biurowe, podziemne stacje metra i garaże istnieją dogodne warunki do rozprzestrzeniania się dymu i trujących substancji będących produktami spalania. Ważnym zagadnieniem jest zatem przewidywanie pola temperatur oraz widoczności w tego typu obiektach. Możliwość uzyskania tych informacji jest istotnym elementem w opracowaniu odpowiednich scenariuszy związanych z ewakuacją ludzi przebywających w obiektach, w których analizowany jest przypadek pożaru.

Modelowanie rozprzestrzeniania dymu

Symulacja pożaru i rozprzestrzeniania dymu w obiektach budowlanych użyteczności publicznej i przemysłowych to zazwyczaj proces nieustalony ruchu powietrza i wymiany ciepła, gdzie ma miejsce proces spalania o złożonej kinetyce chemicznej oraz emisja substancji trujących i dymu.

Model matematyczny pożaru

Modelowanie pożaru z jednoczesną emisją dymu najczęściej sprowadza się do rozwiązania równań bilansu pędu, energii oraz masy. Obliczeniowa mechanika płynów (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) daje możliwość rozwiązania ww. równań bilansu poprzez zastosowanie odpowiednich metod numerycznych. Postać tych równań dla przepływu laminarnego jest następująca:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) &= S_m \\ \frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) &= \mu \nabla^2 \vec{V} - \nabla P + \rho \vec{g} \\ \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{V}(\rho T)] &= \nabla \cdot [\lambda \nabla T] + S_h \\ \frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{V}(\rho Y_i)] &= \nabla \cdot [D_i \nabla Y_i] + S_i \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie

 \vec{V} – wektor prędkości,

T – temperatura,

 Y_i – ułamek masowy, ρ – gęstość, μ – lepkość, λ – współczynnik przewodzenia ciepła, D_i – współczynnik dyfuzji, S_m, S_h, S_i – odpowiednio człony źródłowe.

Transport ciepła dla tego procesu opisywany jest wszystkimi mechanizmami, tj.: przewodzeniem, konwekcją naturalną i wymuszoną oraz promieniowaniem. Ruch powietrza odbywa się najczęściej w zakresie

przepływu turbulentnego. W tym przypadku stosuje się najczęściej modele dwuparametrowe (k - ϵ) lub też oparte na koncepcji dużych wirów LES.

Implementacja pełnej kinetyki procesu spalania wymagałaby użycia bardzo gęstej siatki oraz małych kroków czasowych w trakcie rozwiązywania, aby uwzględnić wszystkie mechanizmy transportu zachodzące w pobliżu strefy płomienia.

Prostszym i szybszym sposobem na uzyskanie rozwiązania jest modelowanie płomienia jako źródła ciepła uwalniającego do otoczenia strumień masy gazu, który zawiera produkty powstałe w wyniku spalania. Przykładowa krzywa opisująca moc pożaru spalane obiektu w zależności od czasu została przedstawiona na rys. 1. Zakłada się, że ilość wytwarzanego dymu podczas spalania jest proporcjonalna do mocy pożaru (strumienia cieplnego). Stała proporcjonalności jest określona poprzez wydajność spalania oraz rodzaj spalane paliwa. Szybkość spalania paliwa \dot{m} [kg/s] może być opisana następującą zależnością [1]:

$$\dot{m} = \frac{Q}{H\chi} \quad (2)$$

gdzie:

Q – moc pożaru [W]

H – ciepło spalania paliwa [J/kg]

 χ – wydajność spalania

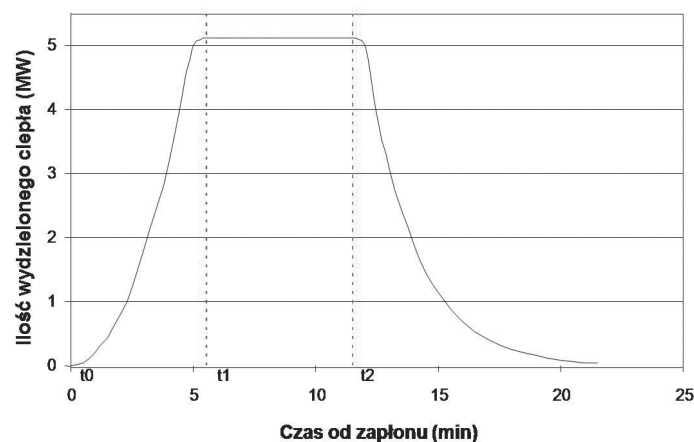
Zatem szybkość generacji dymu \dot{m}_s [kg/s] może być opisana równaniem:

$$\dot{m}_s = E\dot{m} \quad (3)$$

gdzie:

E – współczynnik konwersji dymu, stała empiryczna zależąca od rodzaju spalane paliwa.

Implementacja takiego modelu jest stosunkowo prosta. Polega ona na modyfikacji odpowiednich członów źródłowych w równaniach bilansu energii i masy (1).



Rys. 1. Ilość ciepła wydzielana podczas pożaru

Do rozwiązywania na drodze numerycznej równań bilansu pędu, energii i masy (1) wykorzystano program FLUENT firmy ANSYS Inc [2], w którym zaimplementowana została metoda objętości skończonej. Człony źródłowe opisujące wydzielanie się ciepła i dymu mogą być

uwzględnione w odpowiednich równaniach bilansu energii i masy dzięki użyciu opcji *User Defined Functions*.

Bardzo ważnym zagadnieniem jest określenie widoczności M [m] w obiektach, w których wskutek pożaru dym rozprzestrzenia się jako produkt procesu spalania. Parametr ten może być wyznaczony z następującego równania [2]:

$$M = \frac{K}{\alpha_m m_p} \quad (4)$$

gdzie:

K – stała,

α_m – współczynnik ekstynkcji,

m_p – stężenie dymu [kg/m^3].

Wzór (4) określający wpływ stężenia dymu na widoczność jest zależnością przybliżoną.

Bardziej precyzyjne określenie widoczności jest możliwe dzięki zastosowaniu tzw. techniki *ray tracing*. Metoda ta polega na śledzeniu natężenia promieniowania świetlnego, które może być emitowane z dowolnego punktu w obszarze, w którym poszukiwane jest rozwiązanie. Promieniowanie to przechodząc przez poszczególne komórki w dyskretyzowanej geometrii jest absorbowane z intensywnością zależną od lokalnych wartości stężenia dymu. Pełny opis tej metody można znaleźć w pracy [3].

Praktyczne przykłady zastosowania metody CFD do modelowania pożaru

W Zakładzie Badań Ogniwych Instytutu Techniki Budowlanej od wielu lat prowadzone są prace związane z zastosowaniem metody CFD jako narzędzia do analizy rozprzestrzeniania się dymu, ciepła oraz toksycznych produktów spalania w obiektach budowlanych.

W ramach tych prac analizowane były różne systemy wentylacji dla zamkniętych i częściowo otwartych garaży, hal magazynowych, przestrzeni atrialnych jak i tuneli podziemnych wraz ze stacjami.

Podstawowymi kryteriami oceny skuteczności funkcjonowania wentylacji pożarowej są przewidywany zasięg widzialności oraz temperatura gazów w strefie przebywania ludzi i na drogach ewakuacyjnych.

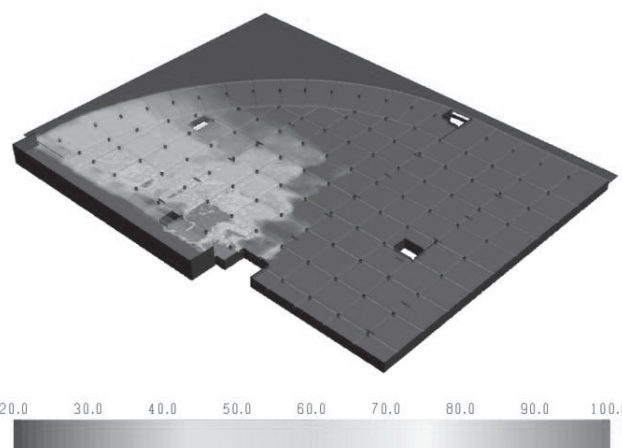
Odpowiedni zakres widzialności umożliwia ludziom w pierwszych minutach od wybuchu pożaru zlokalizowanie wyjść ewakuacyjnych, a straży pożarnej szybkie określenie lokalizacji pożaru i podjęcie akcji gaśniczej.

Jako przykład zastosowania metody CFD do analizy rozprzestrzeniania się dymu podczas pożaru wybrany został przypadek pożaru w parkingu podziemnym.

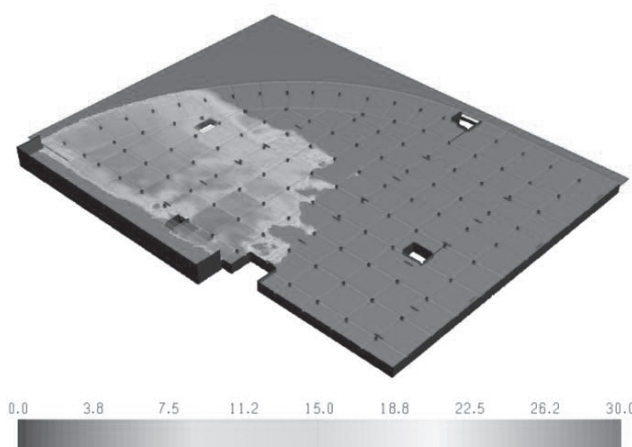
Przyjęto, że w obszarze pożaru przepływ gorącej mieszaniny gazowej spełniającej prawo gazu doskonałego zachodzi w zakresie burzliwym, który może być opisany modelem dwuparametrowym k - ϵ . Siatka zawierała ok. 2 miliony elementów prostopadłościennych. Do modelowania promieniowania zastosowano model P-1 [2]. Podczas całkowania równań (1) użyto krok czasowy 0,5–1,0 [s].

Na rys. 2 i 3 przedstawiono wyniki symulacji dla przykładowego parkingu podziemnego. Rys. 2 przedstawia pole temperatury na poziomie 2 m po 15 minutach od rozpoczęcia pożaru. W analizie przyjęto, że spalaniu ulega pojazd samochodowy. Dla tego przypadku skorzystano z dostępnych danych doświadczalnych pozwalających modelować spalanie pojazdu z wykorzystaniem koncepcji źródła ciepła. Uzyskane z numerycznej symulacji dane w postaci pola prędkości, temperatury oraz stężenia dymu posłużyły do wyznaczenia widoczności w parkingu podziemnym. Na rys. 3 przedstawiono widoczność wyznaczoną z równania (4).

Z załączonych rysunków wynika, że obszary, w którym występuje wysoka temperatura (oraz duże stężenia dymu) jest niska widoczność. Tego rodzaju dane są niezmiernie ważne przy opracowywaniu ewentualnych scenariuszy pożarów, ewakuacji ludzi oraz planowaniu dróg ewakuacyjnych.



Rys. 2. Przewidywany rozkład temperatury w garażu na poziomie 2,0 m nad posadzką w 15 minut od wybuchu pożaru



Rys. 3. Przewidywany zasięg widzialności w garażu na poziomie 2,0 m nad posadzką w 15 minut od wybuchu pożaru

Wnioski

Modelowanie pożarów wraz z rozprzestrzenianiem się dymu jest zagadnieniem skomplikowanym, uwzględniającym jednoczesny transport pędu, energii i masy w warunkach nieustalonych. Równania różniczkowe cząstkowe (1) opisujące ten transport wymagały modyfikacji poprzez dodanie odpowiednich członów źródłowych pozwalających na uwzględnienie wydzielania się ciepła podczas spalania oraz emisji dymu będącego produktem spalania. Rozwiązanie tych równań wymagało zastosowania zaawansowanych metod numerycznych zaimplementowanych w kodzie FLUENT firmy ANSYS.

Wyniki w postaci pola prędkości, temperatury i stężenia dymu uzyskane z symulacji numerycznej są bardzo pomocne w ocenie skuteczności działania urządzeń zastosowanych do wentylacji pożarowej. Ponadto możliwość wyznaczenia chwilowych wartości widoczności pozwala na zaprojektowanie optymalnego rozmieszczenia dróg ewakuacyjnych.

Można zatem stwierdzić, że obliczeniowa mechanika płynów jest narzędziem pomocnym w analizie oceny skutków wybuchu pożaru w różnego rodzaju obiektach użyteczności publicznej i obiektach przemysłowych.

LITERATURA

- [1] J. Klote, S. J. Mike: Principles of Smoke Management, ASHREA 2003.
- [2] Dokumentacja programu FLUENT, ANSYS Inc.
- [3] J. Tibbats, S. McCormick, A. Karanjkar: Fire Modelling Using CFD: Smoke Management and the Improved Prediction of Visibility, Materiały firmy ANSYS Inc.