

bryg. dr hab. inż. Adam Krasuski
st. kpt. mgr inż. Andrzej Krauze
Szkoła Główna Służby Pożarniczej

DOI: 10.5604/01.3001.0014.3020

Symulacje komputerowe z wykorzystaniem zaawansowanych modeli numerycznych pirolizy i gaszenia wodą

Abstrakt

W niniejszym artykule zaprezentowano możliwości opracowanych modeli rozwoju pożaru i działania tryskaczy, które są dostępne w programie Fire Dynamics Simulator. Przedstawiono teoretyczny przykład analizy komputerowej z wykorzystaniem eksperymentalnych modeli pirolizy i gaszenia wodą. Jednym z najbardziej istotnych czynników mających wpływ na wyniki analizy komputerowej bezpieczeństwa budynku ma uzyskana w modelu szybkość uwalniania ciepła (z ang. *Heat Release Rate*, HRR). W oprogramowaniu komputerowym może być ona definiowana na wiele sposobów. Można skorzystać z podstawowej metody, czyli wprowadzić określoną wartość HRR, niezależną od warunków symulacji. Bardziej zaawansowany sposób to wyliczanie HRR z modelu poprzez symulowanie procesów pirolizy. Wybór metody modelowania HRR definiuje również możliwości w zakresie modelowania efektów gaszenia wodą. Modelowanie tłumienia ognia przez wodę musi uwzględniać opis trzech zjawisk: transport kropelek wody w powietrzu, przepływ wody wzdłuż stałej powierzchni oraz przewidywanie zmniejszenia się szybkości spalania. Podstawowy sposób to modyfikacja szybkości uwalniania ciepła lub założenie ograniczonej powierzchni pożaru. Bardziej zaawansowane metody pozwalają na modelowanie fazy gaszenia przez program, w zależności od ilości wody, która dociera do strefy spalania.

Słowa kluczowe: modelowanie pirolizy, modelowanie gaszenia, rozwój pożaru, symulacje CFD, Fire Dynamics Simulator

Przyjęty: 24.07.2019; Zrecenzowany: 13.12.2020; Zatwierdzony: 12.06.2020

Computer Simulations Using Complex Numerical Pyrolysis and Suppression Models

Abstract

This article describes possibilities offered by the existing fire spread and fire suppression models available in the Fire Dynamics Simulator. A theoretical example was provided of a computer analysis using experimental models of pyrolysis and sprinkler models. One of the most important factors that affect results of building safety computer analysis is the heat release rate (HRR) obtained in the model. It may be defined in many ways in computer programmes. Use may be made of the basic method, i.e. a defined value of HRR may be entered, independently of simulation conditions. A more advanced method comprises calculation of HRR from the model by simulating pyrolysis processes. Selection of a method for modelling HRR also defines possibilities related to modelling effects of water suppression. Modelling fire suppression by water must take into account three most important elements: moving of water droplets through the air, transporting the water along the solid surface, and predicting the decreasing of the burning rate. The basic method is to modify HRR curve. More advanced methods allow the user to model decay phase depending on amount of water which reaches fire area.

Keywords: pyrolysis modelling, modelling fire suppression, flame spread, CFD simulation, FDS

Received: 24.07.2019; Reviewed: 13.12.2019; Accepted: 12.06.2020

Комп'ютерне моделювання з використанням передових чисельних моделей піролізу та гасіння водою

Анотація

У цій статті представлені можливості розробки моделей розвитку пожежі та роботи спринклерних систем, які доступні у програмі Fire Dynamics Simulator. Наведено теоретичний приклад комп'ютерного аналізу з використанням експериментальних моделей піролізу та гасіння водою. Одним з найважливіших факторів, що впливає на результати комп'ютерного аналізу безпеки будівлі, є отриманий у моделі рівень викиду тепла (*Heat Release Rate*, HRR). Його можна визначати багатьма способами в комп'ютерному опрограмуванні. Можна використати основний метод, тобто ввести конкретне значення HRR, незалежно від умов моделювання. Більш досконалим методом є обчислення

HRR шляхом моделювання процесів піролізу. Вибір методу моделювання HRR також визначає можливості моделювання ефектів гасіння водою. При моделюванні гасіння вогню водою необхідно врахувати опис трьох явищ: транспортування крапель води у повітрі, приплив води вздовж твердої поверхні та прогнозування зниження рівня горіння. Основний метод – це зміни рівня виділення тепла або встановлення обмеженої поверхні пожежі. Більш досконалі методи дозволяють моделювати фазу гасіння за допомогою програми залежно від кількості води, яка доходить до зони горіння.

Ключові слова: моделювання піролізу, моделювання гасіння, розвиток пожежі, моделювання CFD, Fire Dynamics Simulator

Прийнятий: 24.07.2019; Рецензованої: 13.12.2020; Затверджений: 12.06.2020

1. Wprowadzenie

Komputerowe modele pożaru są dzisiaj powszechnie stosowane przy wspomaganii projektowania zabezpieczeń przeciwpożarowych. Większość analiz z użyciem symulacji komputerowych opiera się o założenie tzw. projektowego pożaru (z ang. *design fire*). W takim założeniu szybkość uwalniania ciepła, czyli krzywa HRR jest określana jako składnik danych wejściowych do symulacji. W bardzo wielu przypadkach inżynierowie bezpieczeństwa pożarowego muszą ocenić skuteczność działania instalacji tryskaczowej. Zazwyczaj stosuje się modele zakładające jedynie zmianę tempa uwalniania ciepła z pożaru poprzez przyjęcie ograniczonej powierzchni pożaru. Jednakże program FDS [1] daje możliwość zastosowania uproszczonego modelu gaszenia wodą, który został opracowany na podstawie badań przeprowadzonych przez H.Z. Yu, J.L. Lee oraz H.C. Kunga [2]. Zmniejszenie mocy pożaru na skutek oddziaływania wody przedstawione jest wzorem nr 1:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 e^{-k(t-t_0)} \quad (1)$$

gdzie:

\dot{Q} – moc pożaru w czasie t [kW]

t_0 – czas aktywacji tryskacza (początek gaszenia) [s]

\dot{Q}_0 – moc pożaru w momencie aktywacji tryskacza (początek gaszenia) [kW]

k – stała gaszenia [s].

Stałą „k” można wyznaczyć na podstawie badań przeprowadzonych przez D. Madrzykowski oraz R.L. Vettoriego [3], a także danych opracowanych przez Evansa [4]. Obliczoną wartość wprowadza się do programu FDS jako stałą „a”, policzoną zgodnie ze wzorem nr 2:

$$k(t) = a m_w(t) \quad (2)$$

gdzie: m_w – masa wody na jednostkę powierzchni [kg/m²]

Jednakże w powyższej metodzie również przyjmuje się model pożaru oparty na tzw. „koncepcji palnika gazowego” [1].

Natomiast jednym z podstawowych zjawisk zachodzących podczas rozwoju pożaru jest reakcja rozkładu termicznego. W bardziej zaawansowanym modelu wprowadza się dane dla reakcji pirolizy, czyli rozkładu materiału pod wpływem temperatury w warunkach beztlenowych [1]. Zjawisko rozkładu termicznego jest związane z utratą masy, co wiąże się ze wzrostem oddawanego ciepła. Całkowita moc uwalniana z reakcji pirolizy zależy od ciepła reakcji materiału i ciepła spalania. Zjawisko rozkładu odbywa się po osiągnięciu pewnej wartości temperatury, która jest określana jako temperatura odniesienia. Istotnym parametrem jest również zasięg/zakres temperatury, w której odbywa się rozkład masy. Przebieg pirolizy jest odmienny dla każdego rodzaju materiału. Z uwagi na powyższe, w niniejszej publikacji rozważano tylko spalanie pianki poliuretanowej, która bardzo często jest składnikiem przedmiotów i elementów wyposażenia pomieszczeń.

Obecnie najbardziej znaczącym opracowaniem, które podsumowuje dotychczasowy stan badań oraz przedstawia nowe sposoby modelowania numerycznego spalania pianki poliuretanowej, jest praca Denissa Pau: *Comparative Study on Combustion Behaviours of Polyurethane Foams with Numerical Simulations using Pyrolysis Models* [5]. Celem publikacji [5] było poprawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego rozkładu termicznego oraz spalania danego typu pianki poliuretanowej. Modelowanie jej spalania jest skomplikowane, ponieważ pianka w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury ulega rozkładowi nie tylko na gazowe formy diizocyanionotoluenu (zwanymi wspólnie TDI), ale również ciekły polioliol. Proces rozkładu termicznego pianki przebiega dwuetapowo:

- pierwsza reakcja: pianka poliuretanowa → frakcja stopiona (polioliol) + gaz (izocyanian),
- druga reakcja: frakcja stopiona (polioliol) → frakcja zwęglona + gaz (polioliol, H₂CO, H₂O i CH₄).

W ramach realizacji pracy doktorskiej [5] przeprowadzono badania laboratoryjne, które miały na celu precyzyjne określenie parametrów fizycznych wybranych typów pianki poliuretanowej. Badane właściwości to: gęstość, ciepło właściwe, przewodność, ciepło spalania, ciepło reakcji, temperatura odniesienia, szybkość reakcji oraz energii aktywacji. Energia aktywacji, czynnik przedwykładniczy, a także rząd reakcji dla pierwszej i drugiej reakcji określono przy wykorzystaniu termicznej analizy grawimetrycznej (z ang. TGA). Parametry wyznaczone poprzez aparaturę pomiarową służyły do opisanego kinetyki reakcji rozkładu termicznego zgodnie z równaniem:

$$\frac{d(m/m_0)}{dt} = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) (m/m_0) \quad (3)$$

gdzie:

m – chwilowa masa próbki

m_0 – masa początkowa próbki

A – czynnik przedwykładniczy

E – energia aktywacji

R – stała gazowa

T – temperatura reakcji

Ciepło reakcji (Δh_r) wyznaczono z analizy zmian ciepła i masy próbki, którą zbadano metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (z ang. DSC). Właściwości fizyczne i termiczne pianki poliuretanowej, jak współczynnik przewodzenia ciepła, określono metodą niestacjonarną (gorącego dysku). Spalanie próbki pianki poliuretanowej wykonano w kalorymetrze stożkowym. Przebadano procesy spalania oraz rozkładu termicznego określonych typów pianki poliuretanowej. W wyniku przeprowadzonych badań opisano procesy fizyczne i chemiczne zachodzące podczas pirolizy. Ponadto opracowano zbiór danych opisujących właściwości palne wybranych typów pianki poliuretanowej. Dokładne scharakteryzowanie właściwości fizycznych materiału palnego, takich jak gęstość, przewodność cieplna, ciepło właściwe, ciepło reakcji czy też temperatura, w której szybkość ubytku masy jest największa (tzw. temperatura referencyjna/odniesienia), ma kluczowe znaczenie przy modelowaniu komputerowym rozprzestrzeniania się płomieni. Wprowadzenie powyższych danych jest konieczne, aby w pełni wykorzystać zaawansowane modele pirolizy i spalania, zaimplementowane w programie Fire Dynamics Simulator [1].

Rezultatem rozprawy [5] jest schemat wprowadzania danych wejściowych do modelu pirolizy. Schemat uwzględnia dwuetapowy przebieg reakcji rozkładu pianki

poliuretanowej. Autor publikacji porównał dwie metody wyznaczania parametrów reakcji do modelu: zaawansowanej metody z wykorzystaniem algorytmów genetycznych oraz bezpośrednio określanie parametrów materiału z przeprowadzonych badań. Przy wprowadzeniu skorygowanych współczynników stwierdzono zwiększenie dokładności modelu dla symulacji spalania w kalorymetrze stożkowym. Jednakże ostatecznym celem rozprawy było porównanie modelu z badaniem w większej skali. Zmniejszenie wartości energii aktywacji E oraz/lub zwiększenie wartości czynnika przedwykładniczego A skutkuje redukcją intensywności rozkładu termicznego materiału. Autor pracy wykazał, że niezbędne jest zredukowanie w modelu wartości energii aktywacji, tak aby uzyskać wyniki porównywalne z badaniem w kalorymetrze meblowym. Ostatecznie wykonano pomyślną walidację modelu, w zakresie otrzymanych krzywych HRR, podczas eksperymentu spalania płyty z pianki poliuretanowej [5, 6].

2. Metody i narzędzia

Do przeprowadzenia szczegółowej analizy oraz otrzymania wyników zawartych w niniejszym artykule użyto programu Fire Dynamics Simulator w wersji 5.5.3 [7] oraz 6.7.0 [1]. Program został opracowany przez instytut naukowo-badawczy NIST (National Institute of Standards and Technology), który znajduje się w Stanach Zjednoczonych. FDS jest narzędziem komputerowym przeznaczonym do modelowania pożaru. Program pozwala analizować transport ciepła i produktów spalania powstałych w wyniku pożaru, a także wymiany ciepła, konwekcję i promieniowanie. Ponadto możliwe jest modelowanie aktywacji detektorów dymu i ciepła, działanie instalacji tryskaczowych, w tym oddziaływanie kropli wody na płomień [1].

Aplikacja wykorzystuje metody numerycznej mechaniki płynów (ang. CFD – *Computational Fluid Dynamics*). Program rozwiązuje numerycznie postać równań Naviera-Stokesa. Modelowanie obejmuje przepływy o relatywnie niskich prędkościach (tj. mniejszych od prędkości dźwięku < 300 m/s) oraz płyny nieściśliwe, tj. gazy, dla których można pominąć zmiany gęstości przy małych prędkościach przepływu. W programie FDS możliwe jest modelowanie turbulencji zarówno przy użyciu metody DNS (ang. *Direct Numerical Simulation*), jak również techniki LES (ang. *Large Eddy Simulation*). Metoda DNS nie jest wykorzystywana do zastosowań inżynierskich z uwagi na konieczność użycia dużych mocy obliczeniowych. Najczęściej stosowana metoda LES zakłada, że największe skale przepływu (wiry), są wyliczane bezpośrednio z równań transportu. Niewielkie ruchy wirowe są modelowane z dużym przybliżeniem lub pomijane [8].

W analizie użyto siatki regularnej sześcienniej o boku 10×5 cm. Rozmiar siatki dobrano na podstawie dysertacji [5] oraz wytycznych NUREG publikowanych również w instrukcji użytkownika FDS6 User's Guide [1]. Obliczenie kroku czasowego w programie FDS jest dokonywane z zachowaniem kryterium CFL (wzór nr 4).

$$CFL = \delta t \frac{\|\mathbf{u}\|}{\delta x} < 1 \quad (4)$$

Krok czasowy obliczany jest automatycznie zgodnie z jednym z trzech schematów odnoszących się do sposobu normalizacji wektora prędkości. Domyślnym schematem dla użytej wersji 6.7.0 jest schemat L_{∞} :

$$\frac{\|\mathbf{u}\|}{\delta x} = \max\left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z}\right) + |\nabla \cdot \mathbf{u}| \quad (5)$$

Równanie transportu promieniowania dla gazu szarego jest rozwiązywane metodą objętości skończonych (FVM – *Finite Volume Method*). Metoda ta dzieli całe widmo promieniowania na kilka przedziałów częstości (typowo 6) i korzysta w nich z całkowitej postaci równań transportu promieniowania. Przedziały te dobrane są tak, aby pokrywały się z pasmami widma substancji występujących w układzie. Część strumienia mocy pożaru emitowana w postaci promieniowania jest stała i jest jednym z parametrów symulacji. Przyjęto domyślną wartość ułamka promieniowania 35%, co odpowiada spalaniu większości tworzyw sztucznych [1].

Użyto modelu spalania *mixing-controlled* (spalanie zachodzi w fazie gazowej). Model ten przyjmuje, że skład stechiometryczny mieszaniny palnej jest definiowany przez ułamek masowy gazów palnych i produktów spalania oraz powietrza. Zakłada się również, że spalanie następuje natychmiast po zmieszaniu oraz jest jednoetapowe i całkowite. Ponadto procent powstającego tlenku węgla jest stały i wynika z początkowych założeń symulacji, a nie z aktualnych warunków spalania. Założenia te dają prawidłowe wyniki w przypadku pożarów kontrolowanych przez paliwo, jak ma to miejsce w założonych symulacjach [1]. Jako materiał palny przyjęto piankę poliuretanową. Właściwości palne zebrano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry reakcji spalania w fazie gazowej użyte w symulacji

ciepło spalania [kJ/kg]	26200
ułamek masowy dymu	0,13

cd. Tabeli 1.

ułamek masowy tlenku węgla	0,01
stosunek atomów węgla : wodoru : tlenu (scenariusz nr 1)	1 : 1,75 : 0,25
stosunek atomów węgla : wodoru : tlenu : azotu (scenariusz nr 2)	1 : 1,77 : 0,31 : 0,06
masowy współczynnik ekstynkcji K_m [m ² /kg]	8700

Źródło: [9]

W tabeli nr 2 zebrano wartości przyjęte do modelowania reakcji rozkładu termicznego pianki poliuretanowej.

Tabela 2. Wartości poszczególnych parametrów materiału, przyjętych do symulacji pirolizy pianki poliuretanowej

właściwość materiału	przyjęte wartości		
λ [W/mK]	T ≤ 222°C 0.049	222°C ≤ T ≤ 310°C 0.049–0.186	T ≥ 310°C 0.186
C_p [J/kgK]	T ≤ 222°C 2996	222°C ≤ T ≤ 310°C 2996–2053	T ≥ 310°C 2053
ρ [kg/m ³]	297		
d [mm]	10,40 mm		
E_1 [kJ/mol]	58,2		
A_1 [s ⁻¹]	$6,82 \times 10^4$		
n_1	0,00		
Δh_1 [J/g]	1357		
E_2 [kJ/mol]	159,9		
A_2 [s ⁻¹]	$1,25 \times 10^7$		

cd. Tabeli 2.

n_1	0,00
Δh_{r_2} [J/g]	218
$\Delta h_{c,eff}$ [MJ/kg]	25

Źródło: [5]

Pianka poliuretanowa została wprowadzona do FDS poprzez funkcję OBST jako element prostopadłościenny składający się z dwóch warstw: pianki o zdefiniowanych właściwościach (górną warstwę o grubości jednej komórki obliczeniowej) i materiału domyślnego INERT (dolną warstwę, pozostała część wrysowanego bloku). Przyjęta rozdzielczość siatki obliczeniowej to 5 cm. Źródło zapłonu, czyli liniowy palnik został zdefiniowany jako pionowy płaski element przystawiony do brzegu bloku pianki. Element ma właściwości INERT. Do zdefiniowanej płaszczyzny przypisano warunek brzegowy określający szybkość uwalniania ciepła. Przyjęto stałą moc pożaru HRRPUA = 500 kW/m², co dla powierzchni palnika 0,050 m² daje łączną moc 25 kW. Wymiary palnika wynoszą 5 cm × 10 cm i pokrywają się z wymiarami brzegu bloku pianki. Poprzez funkcję STRETCH_FACTOR=1 zapewniono równomierną rozdzielczość siatki obliczeniowej dla modelu transferu ciepła w elemencie. Program FDS domyślnie wylicza rozdzielczość siatki w elementach stałych ze wzoru $\sqrt{\lambda/\rho C_p}$. Poprzez funkcję CELL_SIZE_FACTOR=0.43 skorygowano domyślną wartość tak, aby rozdzielczość wynosiła 0,1 mm. Przyjęto również domyślny parametr dla funkcji BACKING=VOID, przyjmując że odwrotna strona materiału przylega do pustki powietrznej o temperaturze otoczenia. W funkcji REAC, która określa parametry dla reakcji spalania w fazie gazowej, przyjęto FORMULA=C_{1,00}H_{1,77}O_{0,31}N_{0,06} (typ pianki: NFR-SB-31) [5].

W programie FDS [1] krzywą gaszenia zgodną z równaniem (1) można uzyskać poprzez wprowadzenie do pliku wejściowego parametru E_COEFFICIENT w funkcji &SURF (powierzchni pożaru). Wtedy program będzie obliczał przebieg krzywej wygasania w zależności od masy wody, która dociera do założonej powierzchni pożaru. Obliczenie fazy wygasania jest wykonywane przy użyciu funkcji eksponentyjnej, przy założeniu, że gęstość mocy pożaru [kW/m²] maleje zgodnie z zależnością nr 6:

$$q(t) = q_0(t) e^{-\int k(t)dt} \quad (6)$$

gdzie:

$q(t)$ – szybkość uwalniania ciepła na jednostkę powierzchni, bez wpływu wody [kW/m²]

$k(t)$ – funkcja odwzorowująca masę wody, która pada na jednostkę powierzchni [kg/m²]

Parametr $k(t)$ można wyrazić wzorem nr 7:

$$k(t) = am_w(t) \quad (7)$$

gdzie:

a – stała wyznaczona doświadczalnie, zależna od rodzaju materiału, składowania i intensywności zraszania [s⁻¹]

Stałą „ a ” wprowadzono do pliku wejściowego poprzez funkcję E_COEFFICIENT [1]. Obliczeń dokonano dla intensywności zraszania 0,041 mm/s [4].

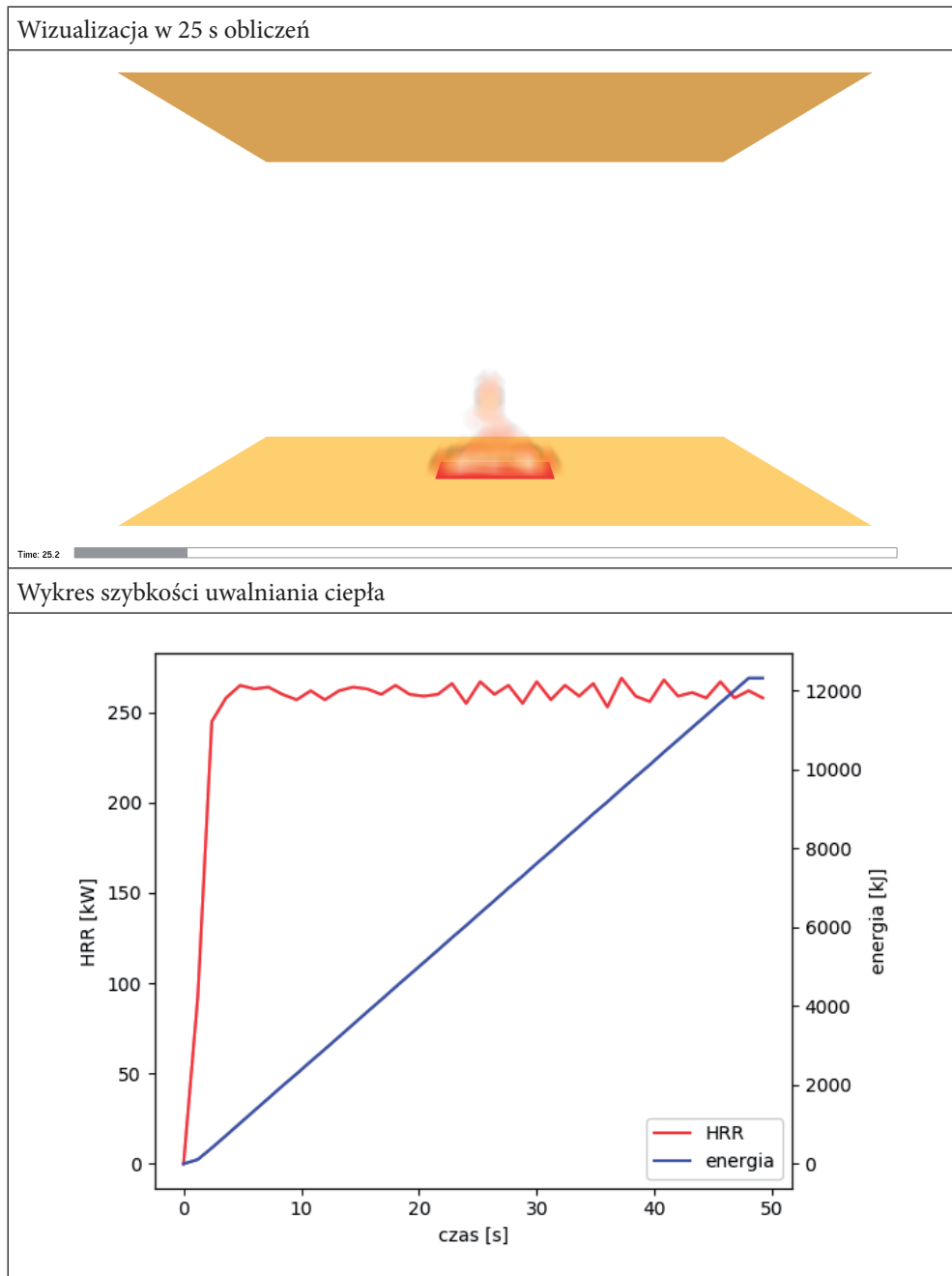
W celu sprawdzenia działania modelu pirolizy i gaszenia wykonano cztery symulacje w programie Fire Dynamics Simulator:

- symulacja nr 1: modelowanie pożaru z wykorzystaniem uproszczonego modelu pirolizy,
- symulacja nr 2: modelowanie gaszenia w wykorzystaniem parametru E_COEFFICIENT,
- symulacja nr 3: modelowanie pożaru przy użyciu zaawansowanego modelu pirolizy,
- symulacja nr 4: modelowanie interakcji zaawansowanego modelu pirolizy i gaszenia.

3. Wyniki symulacji

W tabelach 3, 4, 5 oraz 6 zestawiono wyniki z przeprowadzonych symulacji. Grafiki zamieszczone w tabelach przedstawiają wizualizację obliczeń oraz wykresy uwalniania energii z modelowanego pożaru. Widok z symulacji został wykonany w programie Smokeview, który służy do graficznej interpretacji wyników uzyskanych w programie FDS [1]. Wykresy zostały wygenerowane przy wykorzystaniu skryptu napisanego w języku programowania Python. Skrypt wyplotował wyniki z plików .csv utworzonych przez program FDS.

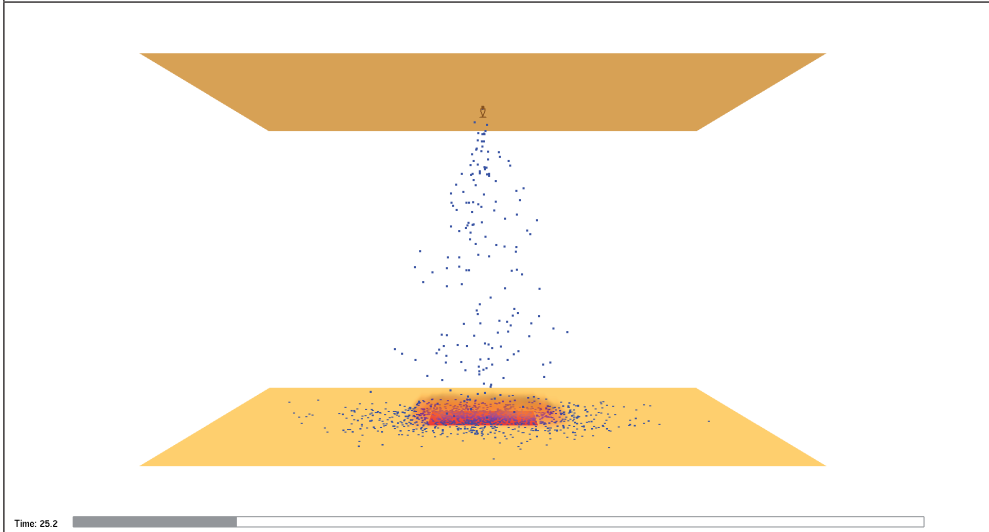
Tabela 3. Wyniki uzyskane w symulacji nr 1



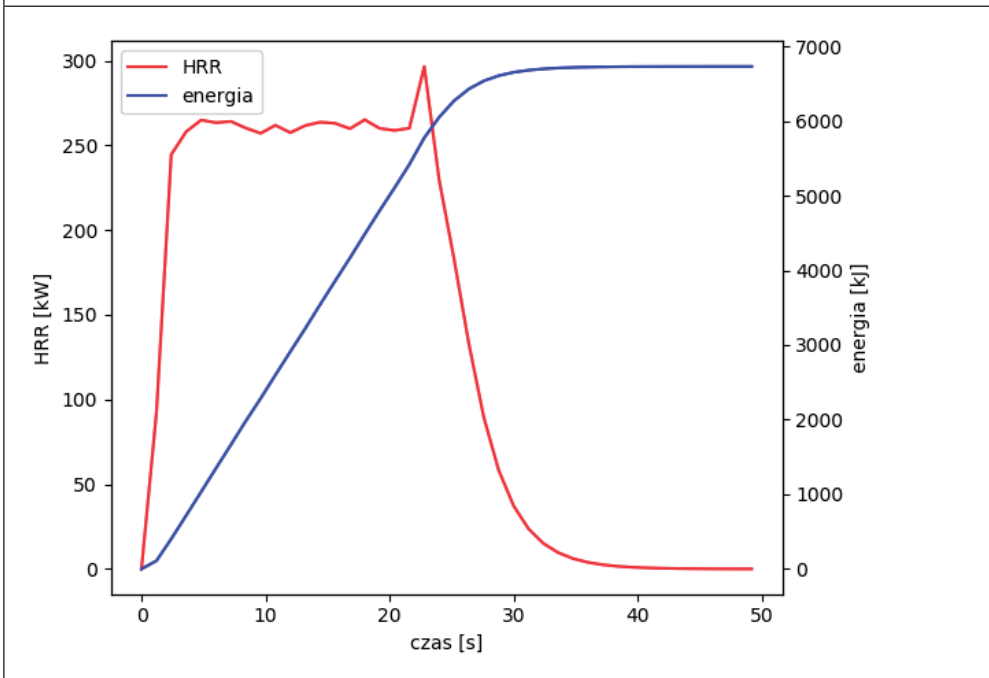
Źródło: [5]

Tabela 4. Wyniki uzyskane w symulacji nr 2

Wizualizacja w 25 s obliczeń

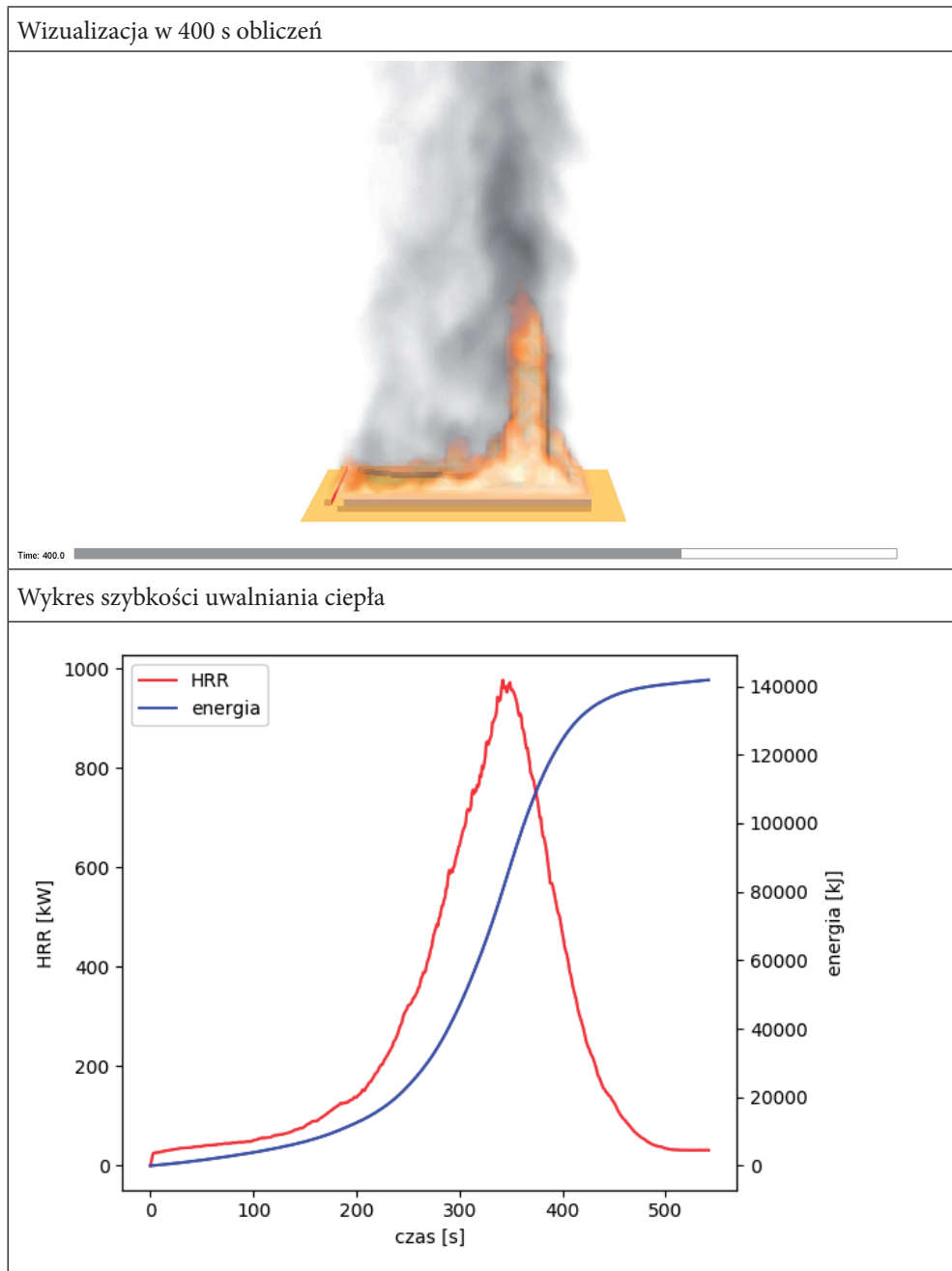


Wykres szybkości uwalniania ciepła



Źródło: [5]

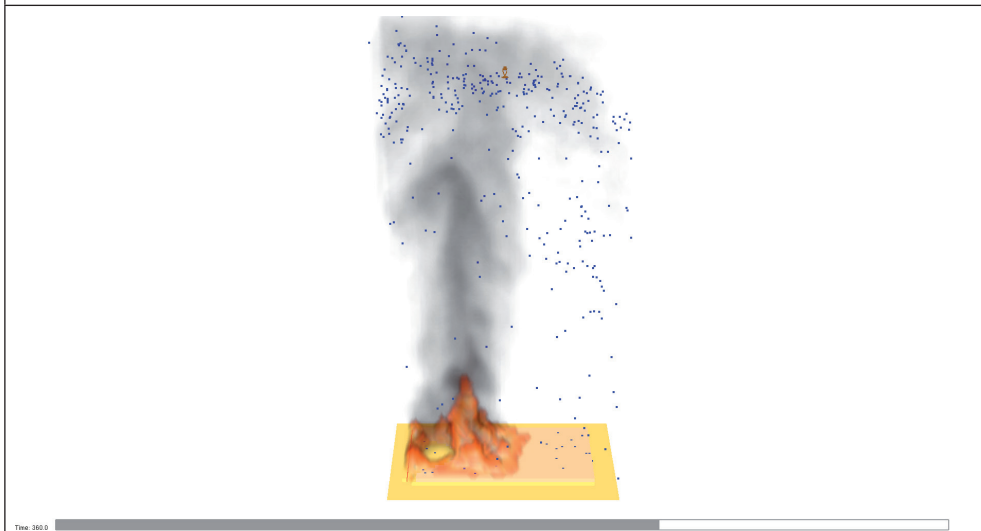
Tabela 5. Wyniki uzyskane w symulacji nr 3



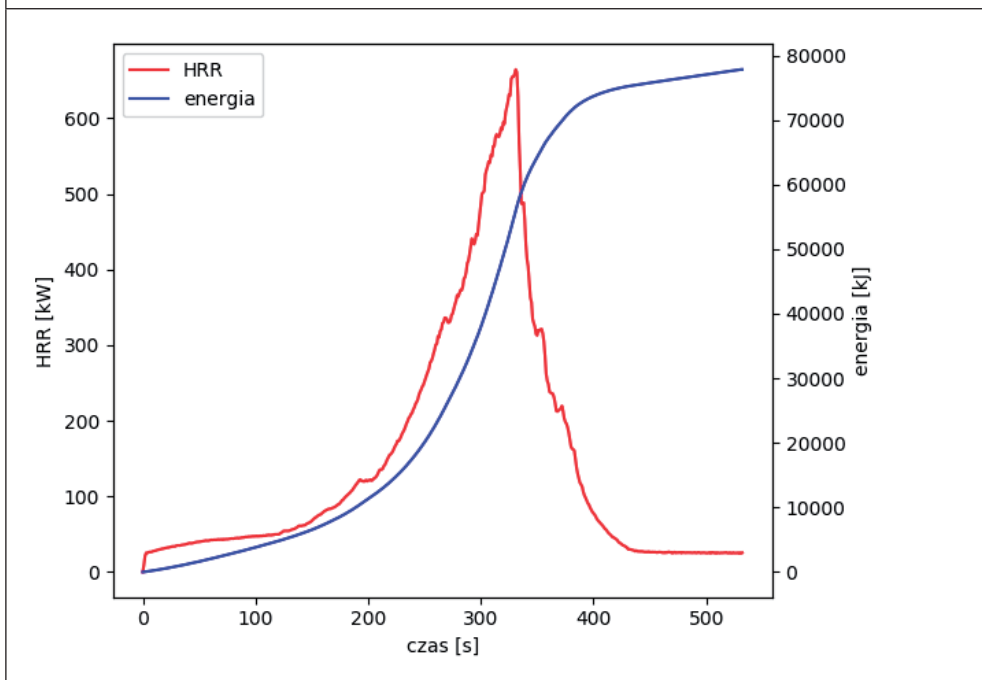
Źródło: [5]

Tabela 6. Wyniki uzyskane w symulacji nr 4

Wizualizacja w 50 s obliczeń



Wykres szybkości uwalniania ciepła



Źródło: [5]

4. Dyskusja wyników

W tabeli nr 3 zaprezentowano wyniki symulacji nr 1, w której przeprowadzono modelowanie pożaru z wykorzystaniem uproszczonego modelu pirolizy. Przedstawiona metoda jest wykorzystywana przez inżynierów bezpieczeństwa pożarowego do modelowania pożarów projektowych (z ang. *design fires*). W pliku wejściowym została określona maksymalna stała moc pożaru, a paliwo było uwalniane z powierzchni 1 m^2 . Zatem w symulacji nr 1 zaprojektowano taki palnik gazowy, z którego wydobywa się założona ilość paliwa. Następnie paliwo w momencie zmieszania z tlenem ulegało natychmiastowemu spalaniu.

W tabeli nr 4 pokazano wyniki symulacji nr 2, w której modelowano zadziaływanie tryskacza. Założenia dla pożaru były takie same, jak w symulacji nr 1. Natomiast program dodatkowo obliczał przebieg krzywej wygasania w zależności od masy wody, która docierała do założonej powierzchni pożaru. Obliczenie fazy wygasania było zgodne z równaniem nr 6. Na wykresie w tabeli nr 2 można zauważyć, że w 22 s następuje wzrost mocy pożaru. Jest to moment interakcji kropeł wody z paliwem. Paliwo zostaje mocniej rozproszone, a więc dochodzi do szybszego mieszania z tlenem. Skok mocy pożaru jest tylko chwilowy i w 24 s widać już spadek mocy pożaru, zgodnie z założonym modelem wygasania. Moc pożaru w 35 s symulacji wynosi około 5 kW, a w 50 s obliczeń osiąga wartość 0 kW.

W tabeli nr 5 zaprezentowano wyniki symulacji nr 3, gdzie modelowano pożar przy użyciu zaawansowanego modelu pirolizy. Symulację wykonano w celu odtworzenia wyników uzyskanych w pracy [5]. Maksymalna moc pożaru zostaje osiągnięta w 350 s symulacji i wynosi około 970 kW. Po tym czasie następuje spadek mocy pożaru związany z wypalaniem się materiału (pianka poliuretanowa).

W tabeli nr 6 przedstawiono wyniki symulacji nr 4, w której przeprowadzono próbę modelowania interakcji zaawansowanego modelu pirolizy z modelem gaszenia wodą uwalnianą z działającego tryskacza. Założenia dla spalania pianki poliuretanowej były takie same, jak w symulacji nr 3. W tym przypadku maksymalna moc została osiągnięta po 330 s i wynosiła około 665 kW. Po tym czasie nastąpiła redukcja mocy pożaru w wyniku docierania wody do modelowanej strefy spalania. Oddziaływanie kropeł wody skutkowało zmniejszeniem intensywności reakcji pirolizy, a tym samym zmniejszenia ilości spalanego paliwa w fazie gazowej. Należy zauważyć, że moc pożaru nie została zredukowana do 0 kW. Wynika to z faktu, że palnik gazowy o mocy 25 kW został za-modelowany z użyciem uproszczonego modelu pirolizy. Dodatkowo do powierzchni palnika nie wpisano parametru `E_COEFFICIENT`.

5. Wnioski

Modelując pożar w FDS, należy rozróżnić modelowanie spalania w fazie gazowej od modelowania pirolizy czy też rozkładu termicznego materiału. Piroliza to rozkład lub przekształcenie związku, które prowadzi do powstania gazów pirolitycznych pod wpływem ciepła. Piroliza jest pierwszym etapem reakcji chemicznej, która występuje w procesie spalania wielu paliw stałych, takich jak drewno, tkaniny, papier oraz tworzywa sztuczne. Spalanie w fazie gazowej odnosi się do egzotermicznej reakcji chemicznej zachodzącej pomiędzy gazowym paliwem a tlenem, któremu towarzyszy wydzielanie ciepła i światła w postaci płomienia. Oznacza to, że piroliza paliwa w fazie stałej skutkuje wytworzeniem palnych gazów pirolitycznych. Widoczny płomień nie powstaje w wyniku spalania stałego paliwa, ale jako skutek reakcji wydzielających się z tego materiału palnych gazów pirolitycznych z tlenem. W programie FDS pożar jest szczególnym warunkiem brzegowym, który jest nakładany na określoną powierzchnię. Program umożliwia zdefiniowanie pożaru na dwa sposoby. Pierwszym jest określenie szybkości uwalniania ciepła z powierzchni, czyli HRR. Drugą metodą jest dokładne określenie właściwości palnych materiałów i modelowanie ich spalania. W tym przypadku szybkość spalania zależy od ciepła, które oddziałuje na powierzchnię materiału, powodując wydzielanie palnych gazów pirolitycznych. Zarówno definiowanie pożaru projektowego o dokładnie określonych parametrach, jak i modelowanie pirolizy materiału stałego polega na obliczaniu w programie uwalniania odpowiedniej ilości określonego (jednego rodzaju) paliwa w stanie gazowym, które ulega spalaniu w zdefiniowanym obszarze pożaru. Natomiast w rzeczywistym pożarze występuje znaczna ilość gazów palnych pochodzących z różnych materiałów. Palne gazy, wydobywające się z zdefiniowanej w programie powierzchni pożaru, mieszają się z paliwem i ulegają spalaniu. Nie ma potrzeby określania źródła zapłonu, ponieważ model spalania zakłada, że paliwo ulega spalaniu w momencie wymieszania z tlenem. Dlatego można sobie wyobrazić, że każda komórka siatki obliczeniowej zawiera wirtualną świecę zapłonową, która inicjuje spalanie, gdy zostanie osiągnięta wystarczająca temperatura oraz odpowiedni stosunek stężeń paliwa i tlenu. Podczas procesu spalania wydzielają się ciepło oraz dym. W symulacji można zdefiniować wiele rodzajów materiałów palnych, natomiast modelowane może być spalanie tylko jednego typu paliwa w stanie gazowym. W związku z powyższym należy określić właściwości chemiczne paliwa, które ma dominujący udział w reakcji spalania. Model został uproszczony, ponieważ rozwiązywanie równań transportu dla wielu rodzajów paliw w stanie gazowym jest procesem który wymaga dużej mocy obliczeniowej. FDS automatycznie oblicza

szybkość spalania materiałów stałych i cieczy, uwzględniając ciepło spalania danego materiału. Jeżeli spalany materiał ma inne ciepło spalania (określone w linii MATL) niż ciepło spalania globalnej reakcji spalania (określonej w linii REAC), wtedy FDS koryguje ilość uwalnianego paliwa z danego materiału. FDS umożliwia opisanie reakcji spalania w fazie gazowej na dwa sposoby. Domyślnie program wykorzystuje tzw. model mieszaniny frakcji, który opisuje reakcję od momentu wypływu paliwa w stanie gazowym z określonej w programie powierzchni pożaru do etapu, w którym ulega ono spalaniu. Model ten zakłada, że reakcja pomiędzy tlenem i paliwem przebiega nieskończenie szybko. Innym sposobem modelowania jest zastosowanie modelu określonej szybkości reakcji, w którym definiuje się wszystkie poszczególne gazy biorące udział w reakcji spalania. Ta metoda jest bardziej skomplikowana i wymaga wykorzystania większej mocy obliczeniowych komputera niż model mieszaniny frakcji. Domyślnie FDS wykorzystuje prosty model mieszaniny frakcji i zakłada obecność trzech parametrów reakcji: paliwa, tlenu oraz produktów spalania. Model ten jest właściwy do przewidywania procesów spalania w warunkach dostatecznej wentylacji. W celu pełnego wykorzystania modelu definiujemy wzór chemiczny materiału spalanego oraz ułamki masowe sadzy, CO czy też wodoru. Parametr RADIATIVE_FRACTION definiuje ułamek energii emitowanej z pożaru poprzez promieniowanie. Wartość promieniowania jest funkcją temperatury płomienia oraz składu chemicznego paliwa. Dokładne wyliczenie wartości promieniowania wymaga dużej mocy obliczeniowej. Z uwagi na powyższe „ułamek promieniowania” nie jest wyliczany, tylko wartość jest określana przez użytkownika lub wynosi 35% dla wartości ustawionej domyślnie w FDS. Funkcja MATL może być użyta do określenia parametrów związanych z pirolizą materiałów stałych. W programie FDS zaimplementowano stosunkowo uproszczony model opisujący przebieg reakcji wieloetapowych, powiązanych z spalaniem materiałów złożonych z kilku składników. Okazuje się, że podczas spalania każdy materiał może przechodzić kilka reakcji, które mogą wystąpić w różnych temperaturach i zużywać różne ilości ciepła. Każda z reakcji może prowadzić do powstania odrębnych produktów w fazie stałej, paliwa w lotnym stanie skupienia czy też pary wodnej. Ciepło spalania, czyli HEAT_OF_COMBUSTION jest to energia uwalniana podczas spalania danej masy mieszaniny paliwa z powietrzem. Czyli ten parametr dotyczy energii uwalnianej w trakcie spalania gazowego paliwa i nie jest związany z procesem pirolizy. Pomimo tego, że w FDS możliwe jest zdefiniowanie różnych materiałów palnych w symulacji, to program ten może modelować spalanie tylko jednego paliwa w fazie gazowej. Jak wspomniano wcześniej, stechiometria dominującej reakcji jest zdefiniowana przez parametry funkcji REAC, czyli ciepło spalania zdefiniowane jako parametr funkcji

REAC odnosi się do spalania paliwa w fazie gazowej. Natomiast ciepło spalania zdefiniowane w funkcji MATL odnosi się do spalania gazów pirolitycznych. Jeżeli ciepło spalania jest parametrem funkcji MATL, to program FDS automatycznie koryguje szybkość ubytku masy związanej z powstawaniem gazów pirolitycznych. Wtedy poprawiona szybkość ubytku masy, pomnożona przez globalne ciepło spalania określone w linii REAC, daje określoną szybkość uwalniania ciepła z pożaru. Czyli, jeżeli np. ciepło spalania, zdefiniowane jako parametr funkcji REAC, jest dwa razy większe niż określone w funkcji MATL, wtedy masa materiału ulegającego pirolizie zawarta w danej komórce obejmującej materiał zostanie zmniejszona według obliczeń modelu pirolizy, natomiast masa paliwa w stanie lotnym dodana do fazy gazowej ulegnie zmniejszeniu o 50%. Niestety nie ma ustalonej metodyki wprowadzania zbadanych właściwości materiałów palnych do pliku wejściowego FDS. Ponadto brakuje danych doświadczalnych i walidacji w zakresie przewidywania rozprzestrzeniania się płomienia. Z uwagi na powyższe, zaleca się stosowanie uproszczonej metody modelowania przebiegu spalania poprzez bezpośrednie wprowadzenie do symulacji tzw. pożaru projektowego. Jak wspomniano wcześniej, w tym sposobie dokładnie określamy krzywą rozwoju pożaru poprzez zdefiniowanie szybkości uwalniania ciepła HRR. Wartość HRR wprowadzamy na podstawie danych literaturowych oraz eksperymentalnych.

Przy opracowywaniu analiz komputerowych dotyczących bezpieczeństwa pożarowego często trzeba uwzględnić wpływ tryskaczy na przebieg pożaru. Woda zmniejsza szybkość pirolizy poprzez chłodzenie powierzchni materiału, a także zmianę reakcji chemicznych związanych z uwalnianiem gazów pirolitycznych. W założeniach inżynierskich modelowanie efektu gaśniczego tryskaczy ogranicza się najczęściej do modyfikacji szybkości uwalniania ciepła z pożaru oraz założenia określonej powierzchni pożaru. Natomiast program FDS pozwala również modelować interakcję modelu rozwoju pożaru z modelem gaszenia wodą. Jednak trzeba podkreślić, że modele tryskaczy zaimplementowane w aktualnej wersji FDS pozostają w fazie eksperymentalnej. Obecnie nie jest możliwe uwzględnienie np. formowania filmu wodnego, powstawania zwartych strumieni, lokalnego odparowania czy też absorpcji wody w porowatych materiałach itp. [11, 12]. Jednocześnie według opracowania [2] tryskacze powodują w zdecydowanej większości przypadków zmniejszenie mocy pożaru, to jednak często nie są w stanie całkowicie ugasić pożaru. Model również pod tym względem nie był walidowany. Ponadto istnieją trudności w opisie realnej liczby kropeł w modelu Lagrange'a [15, 16]. Wobec powyższego rezultaty wzajemnego oddziaływania modelu pirolizy i gaszenia trzeba interpretować bardzo ostrożnie. Obecnie są to modele, które nie zostały udokumentowane odpowiednią liczbą badań w pełnej skali.

Bibliografia

- [1] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Vanella M., NIST Special Publication 1019 Sixth Edition. Fire Dynamics Simulator User's Guide, June 2018.
- [2] Yu H.Z., Lee J.L., Kung H.C., *Suppression of Rack-Storage Fires by Water*. In *Fire Safety Science – Proceedings of the Fourth International Symposium*, p. 901–912. International Association for Fire Safety Science, 1994. 89.
- [3] Madrzykowski D., Vettori R.L., *A sprinkler fire suppression algorithm for the GSA engineering fire assessment system*, Md.: National Institute of Standards and Technology, NISTIR 4833, Gaithersburg 1992.
- [4] Evans D.D., *Sprinkler fire suppression algorithm for HAZARD*, Md.: National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5254, Gaithersburg 1993.
- [5] Pau D., *A Comparative Study on Combustion Behaviours of Polyurethane Foams with Numerical Simulations Using Pyrolysis Models*, *Fire Engineering Research Thesis*, Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury 2013.
- [6] Krauze A., *Komputerowe modele rozprzestrzeniania się płomieni i gaszenia wodą w ocenie skutków rozwoju pożaru oraz skuteczności działania instalacji tryskaczowych*, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2019, nr 72(4).
- [7] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K., NIST Special Publication 1019. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide, 2010.
- [8] McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Floyd J., Vanella M., Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication, 2018.
- [9] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition. 2016.
- [10] <https://github.com/firemodels/fds/wiki/FDS-Road-Map>.
- [11] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K., NIST Special Publication 1018-3 Sixth Edition. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 3: Validation, January 2017.
- [12] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Vanella M., Weinschenk C., Overholt K., Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide Volume 3: Validation. NIST special publication, 1019:20, 2013.
- [13] Krauze A., *Możliwości praktycznego stosowania programów komputerowych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, na wybranych przykładach projektowych*, Praca magisterska, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2011.

- [14] Kim M.E., Dembsey N., Engineering Guide for Estimating Material Pyrolysis Properties for Fire Modeling, WPI Project Final Report 28 September 2012.
- [15] Beji T., Ebrahimzadeh S., Maragkos G., Merci B., *Numerical Modelling of the Interaction Between Water Sprays and Hot Air Jets – Part II: Two-Phase Flow Simulations*, “Fire Safety Journal” 2018, Vol. 96.
- [16] Sikanen T., Vaari J., Hostikka S., *Large scale simulation of high pressure water mist systems*, “WIT Transactions on Engineering Sciences” 2013, Vol 79.

Andrzej Krauze – magister pożarnictwa, funkcjonariusz Państwowej Straży Pożarnej w stopniu starszego kapitana, wykładowca w Zakładzie Informatyki i Matematyki w Katedrze Nauk Ścisłych. Odznaczony Złotą Odznaką Honorową Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa. Praca naukowa związana z wykorzystaniem symulacji komputerowych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego.

ORCID: 0000-0002-9324-4535

Adam Krasuski – polski inżynier informatyk, doktor habilitowany nauk inżynieryjno-technicznych, funkcjonariusz Państwowej Straży Pożarnej w stopniu brygadiera. Specjalizuje się w zastosowaniach narzędzi informatycznych w ochronie przeciwpożarowej (m.in. systemy wspomagania decyzji, analiza ryzyka, eksploracja danych). Wykładowca Szkoły Głównej Służby Pożarniczej.

ORCID: 0000-0001-9546-2336

Andrzej Krauze – firefighting engineer, officer of the State Fire Service at the rank of senior captain, lecturer at Institute of IT and Mathematics in the Chair of Sciences. Distinguished with the Gold Honorary Badge of the Association of Fire Safety Engineers and Technicians. The research work is related to the application of computer situations in fire safety engineering.

Adam Krasuski – Polish IT engineer, associate professor of engineering and technical sciences, brigadier of the State Fire Service. Specialised in applications of IT tools in fire protection (among others decision assisting systems, risk analysis, data exploration). Lecturer at the Main School of Fire Service.