

dr inż. **Jerzy GAŁAJ**¹
mgr inż. **Mateusz OLEKSY**²

Przyjęty/Accepted/Принята: 15.12.2012;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 18.11.2013;
Opublikowany/Published/Опубликована: 20.12.2013;

PRZEGLĄD HYBRYDOWYCH MODELI POŻARU

Review of Hybrid Fire Models

Обзор гибридных моделей пожара

Abstrakt

Cel: Celem niniejszego artykułu jest omówienie oraz ocena hybrydowych modeli pożaru, które zostały opracowane na świecie w ostatnich kilkudziesięciu latach.

Wprowadzenie: Modelowanie pożarów przy użyciu komputera miało swój początek w latach 80-tych. Od tej pory aż do dzisiaj powstało kilkaset różnych modeli, poczynając od najprostszych integralnych poprzez strefowe do najbardziej złożonych polowych wykorzystujących technikę CFD (Computational Fluid Dynamics). Ze względu na bardzo długi czas obliczeń, jaki jest wymagany w przypadku modeli polowych (przy prostszych obiektach jest to średnio kilkadziesiąt godzin dla jednego scenariusza, przy bardziej złożonych nawet kilkaset), w końcu lat 90-tych zaczęto opracowywać koncepcję modeli, których dokładność byłaby znacznie większa niż modeli strefowych, natomiast czas obliczeń byłby istotnie krótszy. Takim przykładem mogą być hybrydowe modele pożaru.

Metodologia: Artykuł zawiera podstawowe informacje na temat aktualnie dostępnych na świecie modeli hybrydowych. Omówiono w nim: model komórkowy Chowa wykorzystujący rozpowszechniony model strefowy CFAST, modele FASIT i FAS3D, które uwzględniają dodatkową warstwę mieszania, model wielowarstwowy Suzuki, w którym zastosowano podział pomieszczenia na n poziomych warstw o tej samej wysokości, model mieszany Hua wykorzystujący kombinację modeli strefowych i polowych. Biorąc pod uwagę ogólne wymagania, jakie powinny spełniać modele pożarów, w pracy zamieszczono ocenę poszczególnych modeli hybrydowych, a także próbę ich porównania ze sobą. Na końcu zamieszczono podsumowanie rozważań i kilka ogólnych wniosków z nich wynikających.

Wnioski: Na podstawie przeprowadzonej oceny można stwierdzić, że obecnie istniejące modele hybrydowe nie są w stanie w pełni zastąpić modeli polowych opartych na technice CFD. Aby było to możliwe, należy jeszcze włożyć wiele pracy w ich rozwój, a w szczególności uwzględnić m.in. następujące zagadnienia: zmianę parametrów pożaru w każdej komórce, uniwersalny model gaszenia przy pomocy tryskaczy, dysz mgłowych lub prądownic, wpływ pożaru na konstrukcję budynku, możliwość wpływania użytkownika na dokładność otrzymanych wyników, a tym samym czas obliczeń, określenie bieżącego zapotrzebowania na tlen i wpływu jego stężenia na proces spalania oraz zastosowanie odpowiedniego modelu turbulencji.

Słowa kluczowe: modelowanie pożaru, polowy model pożaru, strefowy model pożaru, hybrydowe modele pożaru, technika CFD;

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Abstract

Purpose: The main purpose of this article is to describe and evaluate of hybrid fire models which have been developed all over the world in the last several decades.

¹ Szkoła Główna Służby Pożarniczej; ul. Słowackiego 52/54 01-629 Warszawa; tel. 693 175 252; e-mail: galaj@sgsp.edu.pl; wkład merytoryczny: 80%/Department of Fire Safety Engineering The Main School of Fire Service; Warsaw, Poland; e-mail: galaj@sgsp.edu.pl; percentage contribution: 80%;

² Komenda Powiatowa PSP w Pruszkowie; ul. Staszica 4, 05-800 Pruszków; wkład merytoryczny: 20%/District Headquarters of the State Fire Service in Pruszków, Poland; percentage contribution: 20% / Пoвятовaя комендaтурa Государственной Пожарной службы городе Прoшкoв, Пoльшa; вклад в статью: 20%;

Introduction: Computer modeling of fires was introduced in the early eighties. Several hundred fire models have been created till now from the simplest integral to the most complex field one, using CFD (Computational Fluid Dynamics) technique. Field models require very long time for single simulation (the simpler objects need often about several dozen hours for simple scenario and even hundred hours for more complex scenarios). That was the main reason for appearance of a new idea in modeling of fires. Several hybrid models have been carried out in the end of nineties and in the beginning of this century. Its accuracy was comparable with field models, but time needed for single fire scenario was significantly shorter.

Methodology: This article contains basic information on hybrid models and includes their evaluation. One of the first models was a result of work made by Charters and McIntosh on Leeds University (England), which effected in FASIT program created for studying of fires in tunnels and FAS 3D being a three-dimensional version of the first one (fires in compartments). CFD modeling elements were used in this program and each gas layer was divided into the grid of control volumes. For the first time, the mixing zone was separated into upper and lower zone. Obtained model has both main features of the field and zone models, what enables to simulate the gas fire environment in compartments more precisely than with the typical zone model without the need of performing long and expensive calculations. In turn, Chow proposed a method of using the existing CFAST tool for larger compartments. He divided the analyzed volume into several smaller cells (he examined cases with 3, 9 and 15 cells), and then, for each one of them he used the same approach as for single compartment. In 2002, Suzuki et al. proposed a modified multilayer model. He divided single compartments into horizontal layers with equal heights and determined the same parameters for each one of them using the equations following from mass and energy conservation laws. Another approach to the hybrid model was proposed by Hua et al. They used a combination of field and zone models to simulate and analyze the fire smoke propagation in multi-storey building. It was assumed that in compartments with more complex fire dynamics, that is, i.e. with a fire source, the calculation mechanism would be consistent with the field model, while in compartments where the hot and cold zones are determined more clearly (i.e. corridors, compartments located farther from the fire source), the zone model should be used.

Conclusions: Article presents several characteristics which show time curves of under-ceiling layer thickness achieved for the proposed model and for the typical zone and field models. Last of the mentioned solutions seems to be very interesting, but even in compartments with simpler fire dynamics where the zone model was used, unpredictable processes can occur (i.e. unsteady flows, local whirls). They can result in considerable spatial differences of calculated parameters, such as: temperatures, pressures, gas concentrations, etc. Based on the evaluation and comparison of discussed hybrid models one can claim, that neither of them doesn't meet all requirements. There is still a lot of work that should be done on these models to improve them by consideration of the following aspects: changes of fire parameters in every cell, turbulence model, application of universal model of extinguishing systems including sprinklers, mist heads and nozzles, affecting of fire on building construction, possibility for user to influence on the calculation accuracy, determining of actual oxygen consumption and influence of different factors on combustion and pyrolysis process.

Keywords: fire modeling, field fire model, zone fire model, hybrid fire model, CFD technique;

Type of article: original scientific article

Аннотация

Цель: Целью этой статьи является рассмотрение, а также оценка гибридных моделей пожара, которые были разработаны в мире за последние десятки лет.

Введение: Моделирование пожаров при использовании компьютера началось с восьмидесятых годов. С этого времени по настоящее время были разработаны несколько сот моделей, начиная с самых простых интегральных по зональные до самых сложных полевых, использующих методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics). Учитывая очень долгое время, которое требуется на расчёты при полевых моделях (при более простых объектах это в среднем несколько десятков часов для одного сценария, при более сложных - даже несколько сот), в конце 90-ых годов учёные начали разрабатывать концепцию моделей, подробность которых была бы значительно больше чем зональных моделей, а время подсчитывания было бы значительно короче. Примером таких моделей могут быть гибридные модели пожара.

Методология: Статья включает основную информацию на тему актуально доступных на свете гибридных моделей. В статье обсуждено:

клеточную модель Chowa, использующую распространённую зональную модель CFAST, модели FASIT и FAS3D, которые включают дополнительный слой смешивания, многослойную модель Suzuki, в которой применено раздел помещения на n горизонтальных слоев одинаковой, смешанную модель Hua, использующую комбинацию зональных и полевых моделей. Принимая в учёт общие требования, какие должны исполнять модели пожаров, в работе помещена оценка каждого из гибридных моделей, а также попытку их сличений. В конце статьи помещено резюме размышлений и несколько общих выводов.

Выводы: На основе проведенной оценки можно констатировать, что настоящие гибридные модели не в состоянии в полне заменить полевые модели, основанные на технике CFD. Чтобы это было возможно надо ещё внести много работы в их развитие, а в частности учесть, среди других, следующие вопросы: изменение параметров пожара в каждой клетке, универсальную модель тушения при помощи спринклеров, туманных сопел, сводов, влияние

пожара на конструкцию здания, возможность влияния потребителя на точность полученных результатов и время расчёта, определение текущего востребования на кислород и влияние его концентрации на процесс горения, а также применение соответствующей модели турбулентности.

Ключевые слова: моделирование пожара, полевая модель пожара, гибридные модели пожара, техника CFD;

Вид статьи: оригинальная научная статья

1. Wstęp

Jedną z najczęściej stosowanych od kilkadziesiąt lat metod badania złożonych układów fizycznych jest modelowanie cyfrowe. Wynika to m.in. z faktu jego uniwersalności, stosunkowo niedużych kosztów oraz powszechnej dostępności sprzętu komputerowego o coraz to większych możliwościach obliczeniowych. Nakłady poniesione na badania własności dowolnego obiektu dynamicznego przy pomocy metod modelowania cyfrowego są niewspółmiernie mniejsze w porównaniu z badaniami prowadzonymi na obiekcie rzeczywistym. Szybki rozwój mikrokomputerów klasy PC w latach osiemdziesiątych przyczynił się do rozpowszechnienia tego typu modelowania i umożliwił badanie coraz to bardziej złożonych procesów fizycznych. Ponadto umożliwiają one znacznie prostszą i szybszą zmianę parametrów badanego obiektu. Jednym z bardziej skomplikowanych zagadnień, które począwszy od lat osiemdziesiątych XX wieku starano się rozwiązać przy pomocy modelowania cyfrowego, było zjawisko pożaru. Rozwój pożaru nawet w najprostszych przypadkach pożarów wewnętrznych jest procesem bardzo złożonym, głównie ze względu na wielorakość różnych czynników, które mają wpływ na jego przebieg. W ciągu ostatnich kilkadziesiąt lat opracowano ponad 170 udokumentowanych modeli pożarów, z których praktycznie wykorzystywanych jest obecnie około 70. Można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje modeli: najprostszy integralny, w którym zakłada się stałość parametrów w całej rozpatrywanej przestrzeni, pośredni strefowy – zakłada się w nim stałość parametrów w każdej ze stref, na które dzieli się przestrzeń w każdym pomieszczeniu z pożarem (np. strefa górna podsufitowa, strefa dolna zimna, strefa płomienia) oraz najbardziej złożony model polowy, w którym można uzyskać z pewnym przybliżeniem przestrzenny rozkład podstawowych parametrów pożaru. Pierwszy z wymienionych modeli może być użyteczny tylko w takich przypadkach, w których gazy pożarowe wypełniają całkowicie całe pomieszczenie. Drugi z modeli, ze względu na wystarczający dokładny opis stanu pożaru w fazie rozwoju pożaru oraz dla pomieszczeń o dobrej wentylacji, znalazł szerokie zastosowanie zarówno w przypadku badania pożarów w pojedynczych pomieszczeniach [6, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 43], jak i w budynkach jedno- lub wielokondygnacyjnych o wielu pomieszczeniach [4, 5, 8, 10, 11, 23, 24, 25, 26, 27, 31, 35, 41, 44, 47]. Trzeci model pozwala na najbardziej dokładne określenie stanu pożaru, w porównaniu z poprzednimi modelami, co się jednak wiąże z wysokimi kosztami obliczeń. Z jednej strony badania są bardzo czasochłonne, z drugiej zaś wymagają wysokiej klasy komputerów o dużej mocy obliczeniowej. Przez ostatnie 20 lat w sposób znaczący wzrosło użycie polowych symulatorów pożaru opartych na oblicze-

niowej dynamice płynów [20, 21, 22, 37, 44, 45]. Używano ich do analizy scenariuszy pożarów. Jednak jedną z ich głównych wad jest zbyt długi czas obliczeń przekraczający w wielu przypadkach 100 godzin. Istnieje wiele różnych sposobów skrócenia tego czasu. Jedne z prób oparto na wprowadzeniu równoległego procesu obliczeniowego opartego na technologii klastrowej. Pomimo obiecujących wyników nie rozwiązały one jednak do końca problemu, gdyż wielu naukowców i innych użytkowników programów symulacyjnych ma dostęp tylko do jednego komputera lub co najwyżej do kilku komputerów połączonych w sieć. Jeszcze inną metodą jest stworzenie takiego modelu hybrydowego, który łączyłby w sobie cechy modeli polowych i strefowych.

Obecnie brak jest jednoznacznej definicji modelowania hybrydowego pożarów. Według autora, na podstawie aktualnie istniejących modeli rozwoju pożaru można zaliczyć do nich te, które są dokładniejsze od modeli strefowych, a jednocześnie znacznie prostsze, a więc mniej czasochłonne i kosztowne niż modele polowe. Biorąc pod uwagę dostępną literaturę, można stwierdzić, że pierwsze próby modelowania hybrydowego zostały podjęte kilkanaście lat temu. Od tego czasu powstało kilka modeli hybrydowych pożaru, których charakterystyka zostanie podana w kolejnych rozdziałach.

Jeden z pierwszych modeli był owocem prac prowadzonych przez Chartersa i McIntosha w Uniwersytecie w Leeds (Anglia), których efektem był program FASIT przeznaczony do opisu pożarów w tunelach oraz FAS 3D, będący trójwymiarową wersją tego pierwszego (pożary w pomieszczeniach) [39,42]. Wykorzystano w nim elementy modelowania CFD, dzieląc każdą z warstw gazowych na siatkę objętości kontrolnych. Po raz pierwszy zastosowano w nim strefę mieszania oddzielającą strefę górną od strefy dolnej. Otrzymany model posiada jednocześnie główne cechy modelu polowego i strefowego, co pozwala na dokładniejszą symulację gazowego środowiska pożaru w pomieszczeniach w porównaniu z modelem czysto strefowym, bez potrzeby długich i kosztownych obliczeń. Mankamentem tego modelu jest, pomimo wprowadzenia objętości kontrolnych w ramach poszczególnych stref, przyjęcie do obliczeń jednakowych parametrów dla tych stref. Ponadto pozwala on tylko na wyznaczenie rozkładu temperatur, wysokości warstw i przepływających mas, natomiast nie uwzględnia modelu wentylacji i gaszenia. Istotną wadą jest również brak możliwości wyliczenia stężeń tlenu oraz gazów pożarowych takich jak tlenek lub dwutlenek węgla.

Sposób zastosowania gotowego narzędzia typu CFAST do pomieszczeń o większych kubaturach zaproponował Chow, który podzielił analizowaną objętość na kilka mniejszych komórek (rozpatrzył przypadek 3, 9 i 15 komórek), a następnie zastosował do każdej z nich

ten sam mechanizm, co dla pojedynczego pomieszczenia [7,9]. Otrzymane wyniki wskazują, że różnice względne pomiędzy przepływami w modelu z jedną i z piętnastoma komórkami są znaczne i w niektórych przypadkach osiągnęły nawet 30%. Pomimo większej dokładności tego modelu objętości kontrolne wciąż są jeszcze zbyt duże, aby można było w miarę precyzyjnie określić parametry pożaru w dowolnym punkcie pomieszczenia.

W roku 2002 Suzuki i inni [50] zaproponowali zmodyfikowany model wielowarstwowy. Podzielili oni pojedyncze pomieszczenia na poziome warstwy o jednakowej wysokości, a następnie dla każdej z nich wyznaczyli te same parametry gazu, korzystając z równań wynikających z zasady zachowania masy i energii. W modelu zostały zastosowane dodatkowe moduły uwzględniające proces spalania, wymianę ciepła oraz przepływy ściennne i podsufitowe. W pracy stwierdzono, że uzyskane wyniki teoretyczne były w dużej mierze zgodne z wynikami eksperymentów prowadzonych przez Stecklera [49] i na Uniwersytecie w Canterbury [14]. Wspomniany model jest jednak wciąż w wielu przypadkach zbyt mało dokładny ze względu na to, że nie uwzględnia zróżnicowania wartości parametrów w płaszczyźnie poziomej. Wykazano podczas przeprowadzonych eksperymentów, że w przypadku temperatury różnice te mogą dochodzić nawet do 30%.

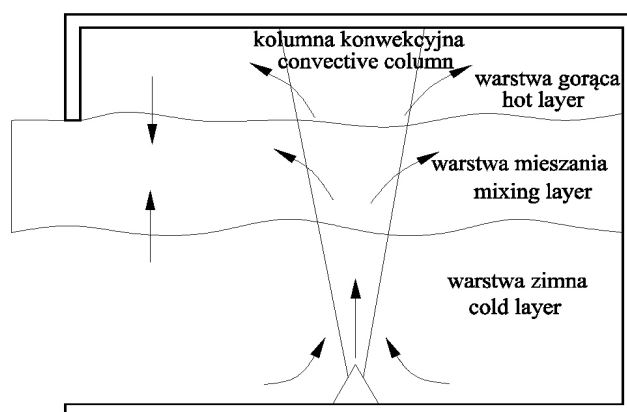
Z kolei jeszcze inne podejście do modelu hybrydowego zaproponowali Hua i inni w pracy [36], gdzie zastosowano kombinację modeli polowych i strefowych do badania rozwoju pożaru w budynku wielokondygnacyjnym. Przyjęto, że w pomieszczeniach o bardziej złożonej dynamice pożaru, czyli np. ze źródłem ognia, mechanizm obliczeń będzie zgodny z modelem polowym, natomiast w pomieszczeniach, gdzie są lepiej wyodrębnione strefy gorąca i chłodna (np. korytarze, pomieszczenia położone dalej od źródła ognia), znajdzie zastosowanie model strefowy. Dużo uwagi poświęcono w pracy procedurze przejścia pomiędzy pomieszczeniami, w których zastosowano dwa różne modele – polowy i strefowy. W celach porównawczych w artykule zamieszczono szereg charakterystyk przedstawiających przebiegi czasowe grubości warstwy podsufitowej uzyskane dla proponowanego modelu oraz dla typowych modeli strefowych i polowych. Ostatnie z wymienionych rozwiązań wydaje się być bardzo interesujące, jednak nawet w pomieszczeniach o mniejszej dynamice pożaru, gdzie zastosowano prostszy model strefowy mogą mieć miejsce trudne do przewidzenia procesy (np. przepływy nieustalone, lokalne zawirowania), które powodują znaczne zróżnicowanie przestrzenne obliczanych parametrów, czyli temperatur, ciśnień, stężeń gazów itp.

W kolejnych rozdziałach zostaną szerzej omówione wspomniane wyżej modele hybrydowe, a następnie zostanie przeprowadzona ich ocena zakończona podsumowaniem.

3. Model strefowo-przestrzenny FAS3D

Model strefowo-przestrzenny FAS3D powstał w latach 90-tych na Uniwersytecie w Leeds jako wersja trójwymiarowa wielostrefowego modelu FASIT przeznaczono-

go do opisu pożarów w tunelach. Model zakłada podział pomieszczenia na kilka odrębnych stref: kolumnę konwekcyjną ognia obejmującą również strefę spalania, górną gorącą warstwę produktów rozkładu termicznego i spalania, dolną chłodną warstwę powietrza oraz dodatkową nieuwzględnianą do tej pory warstwę mieszaną rozdzielającą warstwę gorącą i chłodną. Schematyczny podział pomieszczenia na strefy pokazano na ryc. 1. Dodatkowo każdą z wymienionych stref podzielono na siatkę małych komórek tzw. objętości kontrolnych, dla których zastosowano elementy modelowania CFD. Założono, że przebieg szybkości wydzielania się ciepła \dot{q}_f w strefie spalania, która jest źródłem energii i masy, można podzielić na trzy odrębne fazy: fazę wzrostu, fazę stacjonarną oraz fazę spadku. Dwa przykładowe przypadki przebiegów czasowych funkcji $\dot{q}_f(t)$ pokazano na ryc. 2a i 2b.



Ryc. 1. Schematyczny podział pomieszczenia na strefy w modelu FAS3D [42]

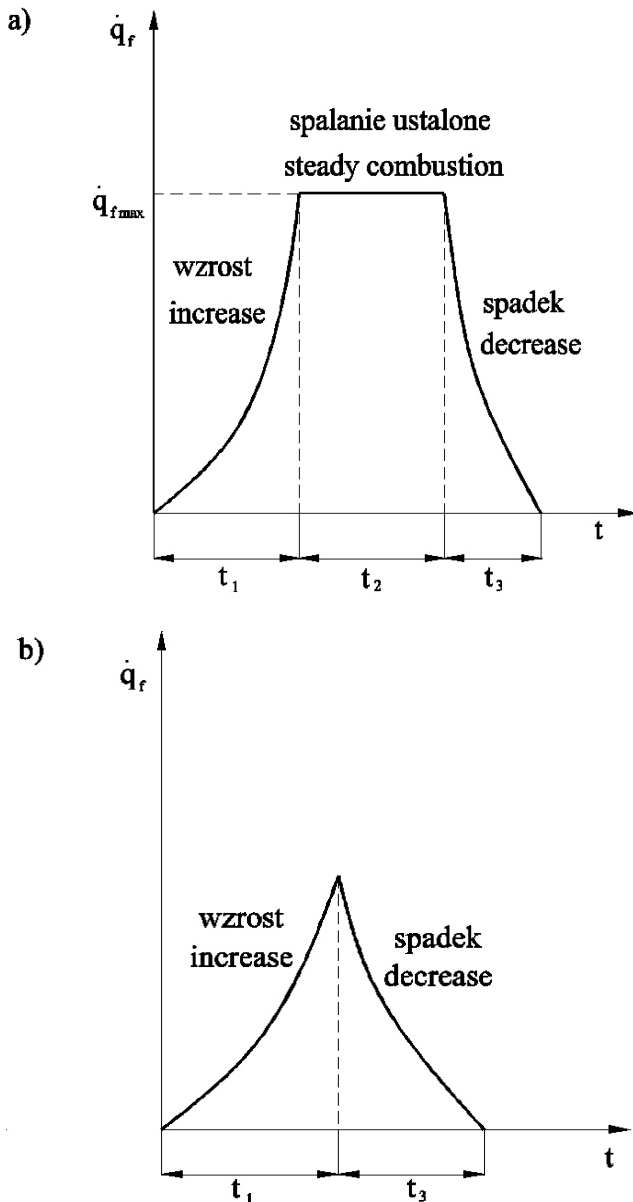
Fig. 1. Schematic division of compartment into zones in model FAS3D [42]

Dla fazy wzrostu przyjęto następującą postać funkcji:

$$\dot{q}_f = \alpha \cdot (t - t_0)^2 \text{ [kW]} \quad (1)$$

gdzie: α – współczynnik wzrostu pożaru przyjmujący wartości od 10^{-3} do 1, kW/s²
 t – czas trwania pożaru liczony od zapłonu, s
 t_0 – czas inkubacji pożaru, s.

W rozpatrywanym przypadku założono, że $t_0 = 0$. Oznacza to, że spalanie płomieniowe pojawia się w momencie zapłonu. Faza wzrostu kończy się osiągnięciem po czasie t_1 wartości $\dot{q}_f = \dot{q}_{f \max}$. Można go wyznaczyć z równania (1), podstawiając w miejsce \dot{q}_f wartość maksymalnego strumienia ciepła, jaki może zostać wydzielony z materiału palnego $\dot{q}_{f \max}$. Czas trwania fazy stacjonarnej t_2 , w której szybkość wydzielania się ciepła jest stała, zależy od masy materiału ulegającego spalaniu. Faza spadku rozpoczyna się w momencie, gdy ilość spalanego materiału nie wystarcza do utrzymania maksymalnej wartości wydzielanego ciepła.



Ryc. 2. Przebiegi funkcji szybkości wydzielania ciepła dla dwóch przypadków:

a) z fazą stacjonarną, b) bez fazy stacjonarnej [42]

Fig. 2. Functions of heat release ratio for two cases: a) with steady phase, b) without steady phase [42]

Wówczas następuje jego spadek, który może być opisany funkcją paraboliczną o tej samej postaci, co w przypadku fazy wzrostu.

$$\dot{q}_f = \dot{q}_{f_{\max}} - \alpha \cdot (t - t_0)^2 \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

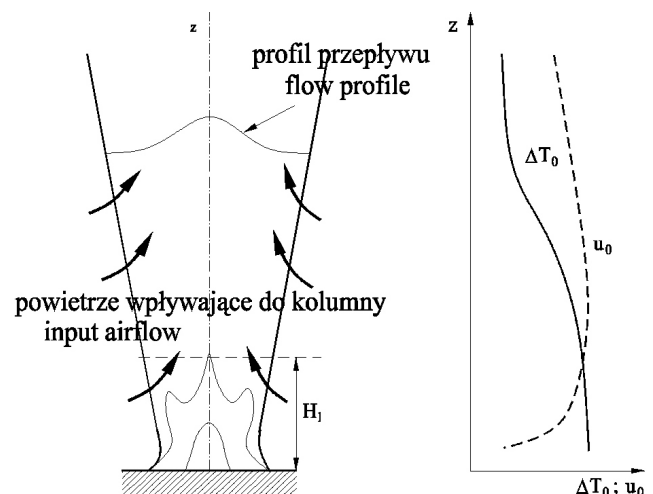
Podana wyżej funkcja szybkości wydzielania ciepła (2) opisuje spalanie kontrolowane wyłącznie przez materiał palny. Może zaistnieć taka sytuacja, że zanim pożar osiągnie fazę stacjonarną, górna warstwa będzie już na tyle duża, że dopływ powietrza do strefy spalania zostanie ograniczony. W takim przypadku faza spadku zacznie się wcześniej, co może skutkować brakiem fazy stacjonarnej (przypadek pokazany na ryc. 2b). W opracowaniu [42] zostały podane wzory, na podstawie których można

wyznaczyć masę paliwa M_f , która uległa reakcji spalania w fazie wzrostu, czas trwania fazy stacjonarnej t_2 . Rzeczywista powierzchnia spalania A_f może być wyznaczona przy pomocy założonej funkcji $\dot{q}_f(t)$ w postaci:

$$A_f = A_{f_{\max}} \frac{\dot{q}_f(t)}{\dot{q}_{f_{\max}}} \quad [\text{m}^2] \quad (3)$$

gdzie: $A_{f_{\max}}$ – założona powierzchnia maksymalna, m^2

W modelu założono, że kolumna konwekcyjna stanowiąca strumień gorących produktów rozkładu termicznego i spalania oraz powietrza unoszonych siłą wyporu, jest osiowo symetryczna, a przepływ w niej jest turbulentny. Jej właściwości mogą być opisane przy pomocy dwóch funkcji $\Delta T_0 = f(z)$ i $u_0 = f(z)$. Pierwsza z nich jest różnicą wartości temperatury w osi kolumny i otoczenia, natomiast druga maksymalną prędkością przepływających gazów. Spadek wartości temperatury wraz ze wzrostem wysokości spowodowany jest strukturą odwróconego stożka, przez co strumień gazów jest chłodzony zimnym powietrzem otaczającym kolumnę. Wartość prędkości przemieszczania się gazów w kolumnie konwekcyjnej u_0 początkowo bardzo szybko rośnie, a następnie po osiągnięciu maksymalnej wartości stopniowo maleje. Kolumnę konwekcyjną oraz orientacyjny przebieg ww. funkcji pokazano schematycznie na ryc. 3.



Ryc. 3. Schemat kolumny konwekcyjnej oraz orientacyjny

przebieg funkcji $\Delta T_0 = f(z)$ i $u_0 = f(z)$ wzdłuż kolumny [42]
Fig. 3. Scheme of fire plume and graphs of functions $\Delta T_0 = f(z)$ i $u_0 = f(z)$ along convective column [42]

Model zakłada, że część energii cieplnej jest przekazywana przez kolumnę konwekcyjną, a pozostała jest wypromieniowywana do otoczenia. Przepływ gazów w kolumnie konwekcyjnej jest opisywany przy pomocy równań ciągłości, zachowania pędu i wyporu.

Strumienie masy \dot{m}_x w warstwach gorącej, mieszanej lub zimnej kolumny konwekcyjnej są określone następującym ogólnym równaniem:

$$\dot{m}_x = A_x \cdot \rho_\infty \cdot u_x \cdot \frac{T_\infty}{T_x} \quad (4)$$

gdzie:

A_x – pole przekroju w każdej z warstw (mieszania, zimnej i gorącej), m^2

u_x – prędkość w każdej z warstw, m/s

T_x – wartość temperatury w każdej z warstw, K

ρ_∞ – gęstość powietrza zimnego otaczającego kolumnę konwekcyjną, kg/m^3

T_∞ – wartość temperatury powietrza zimnego otaczającego kolumnę konwekcyjną, K .

Strumień energii cieplnej \dot{q}_x w każdej strefie kolumny konwekcyjnej jest określony przy pomocy następującego równania ogólnego:

$$\dot{q}_x = \dot{m}_x c_p (T_x - T_\infty) \quad (5)$$

gdzie: c_p – izobaryczne ciepło właściwe, J/kgK .

Pozostałe zależności opisujące szczegółowo parametry kolumny konwekcyjnej zostały podane w [42]. Modele FASIT i FAS3D są modelami uwzględniającymi istotny wpływ kolumny konwekcyjnej na podstawowe wartości parametrów środowiska pożaru. Wprowadzona dodatkowo warstwa mieszania pozwala na otrzymanie dokładniejszych wyników, a także wzięcie pod uwagę przesuwania się warstwy gorącej w dół wskutek przyrostu masy produktów spalania. Prezentowany model posiada również cechy modelu połowego, ponieważ każda z warstw jest podzielona na komórki. Ilość masy wewnątrz każdej komórki jest obliczana na podstawie zachowania strumieni mas wpływających i wypływających z komórki.

Całkowita masa zawarta wewnątrz komórki w danej chwili t , jest związana z masą w chwili $t-\Delta t$, gdzie Δt jest krokiem czasowym, następującą zależnością:

$$m(t) = m(t-\Delta t) + \Delta t(\dot{m}_{in\ x} + \dot{m}_{in\ y} - \dot{m}_{out\ x} - \dot{m}_{out\ y} + \dot{m}_{in\ hot} + \dot{m}_{in\ cool}) \quad (6)$$

gdzie:

$\dot{m}_{in\ x}, \dot{m}_{in\ y}, \dot{m}_{out\ x}, \dot{m}_{out\ y}$ – strumienie masy transportowane konwekcyjnie, kg/s

$\dot{m}_{in\ hot}, \dot{m}_{in\ cool}$ – strumienie masy transportowane w wyniku mieszania, kg/s .

Strumienie masy w płaszczyźnie poziomej są obliczane z równania ciągłości (6), natomiast przepływy z warstwy gorącej i zimnej do warstwy mieszanej wyznaczane są z następujących zależności:

$$\dot{m}_{in\ cool} = \frac{0,003\rho_\infty T_\infty u_h A_z}{T_h - T_c} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{in\ hot} = \dot{m}_{in\ cool} T_c / T_h \quad (8)$$

gdzie:

0,003 – współczynnik empiryczny wejścia strumienia masy dla poziomych przepływów spowodowanych siłą wyporu,

u_h – prędkość powietrza w warstwie gorącej, m/s

A_z – pole powierzchni przekroju boku komórki prostopadłego do osi Oz , m^2

T_c – średnia wartość temperatury w warstwie zimnej, K

T_h – średnia wartość temperatury w warstwie gorącej, K

Podobnie energia cieplna zawarta wewnątrz komórki w danej chwili t , jest związana z energią w chwili $t-\Delta t$, gdzie Δt jest krokiem czasowym, następującą zależnością:

$$Q(t) = Q(t-\Delta t) + \Delta t(\dot{q}_{in\ x} + \dot{q}_{in\ y} - \dot{q}_{out\ x} - \dot{q}_{out\ y} + \dot{q}_{in\ hot} + \dot{q}_{in\ cool} - \dot{q}_{rad\ out\ cool} + \dot{q}_{rad\ fire}) \quad (9)$$

gdzie: $\dot{q}_{in\ x}, \dot{q}_{in\ y}, \dot{q}_{out\ x}, \dot{q}_{out\ y}$ – strumienie energii przekazywane konwekcyjnie, W

$\dot{q}_{in\ hot}, \dot{q}_{in\ cool}$ – strumienie energii przekazywane w wyniku mieszania, W

\dot{q}_{rad} – strumienie energii przekazywane na drodze promieniowania, zarówno z komórki warstwy gorącej jak i chłodnej, a także ze źródła pożaru, W .

Strumienie energii przekazywane konwekcyjnie są wyznaczane ze wzoru (9), natomiast udział promieniowania w przepływie ciepła określany jest za pomocą równania Stefana-Boltzmann'a o ogólnej postaci:

$$\dot{q}_{rad} = \phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{emit}^4 - T_{rec}^4) \quad (10)$$

gdzie:

σ – stała Stefana-Boltzmann'a równa $5,67 \cdot 10^{-8}$, $W/(m^2K^4)$

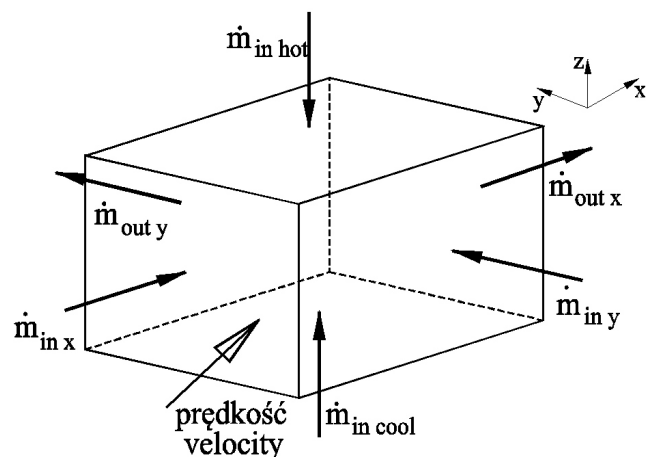
ε – stopień czarności (współczynnik emisyjności)

ϕ – współczynnik konfiguracji

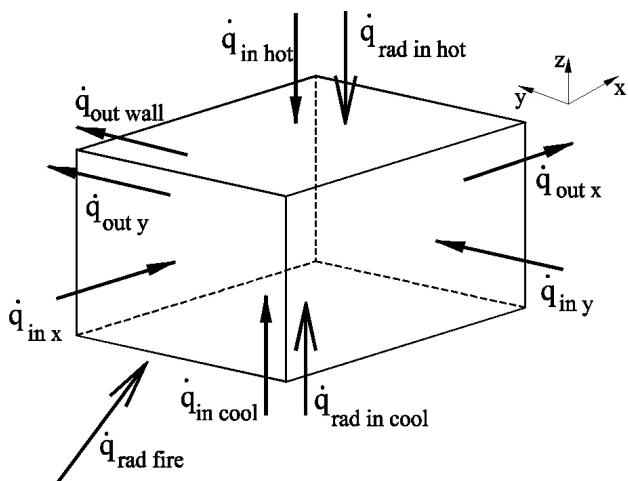
T_{emit} – wartość temperatury obiektu emitującego promieniowanie, K

T_{rec} – wartość temperatury obiektu pochłaniającego promieniowanie, K .

Schematy przepływów masy i energii w pojedynczej komórce warstwy mieszanej pokazano na ryc. 4 i 5.



Ryc. 4. Przepływy mas w komórce warstwy mieszanej [42]
Fig. 4. Mass flows in a cell of mixing layer [42]

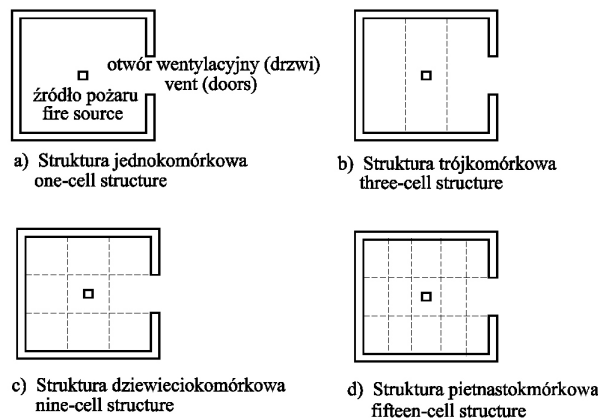


Ryc. 5. Przepływy energii w komórce warstwy mieszanej [42]
 Fig. 5. Energy flows in a cell of mixing layer [42]

Pozostałe bardziej szczegółowe informacje na temat tego modelu można znaleźć w opracowaniu [42].

3. Model komórkowy Chowa

W modelu Chowa po raz pierwszy wykorzystano model strefowy CFAST do obliczeń parametrów pożaru w pomieszczeniach o dużych kubaturach [7,9]. Dotychczas standardowe obliczenia prowadzone przy zastosowaniu modelu CFAST nie pozwalały na skuteczną analizę pożarów w dużych wielokubaturowych obiektach. Opierając się na wcześniejszych koncepcjach zaproponowanych przez Rockett et al. [48], Chow podzielił duże pomieszczenie o wymiarach 60 m x 60 m x 3 m na komórki o jednakowej objętości, przy czym w celach porównawczych zastosował on struktury o różnej liczbie komórek w celu ich porównania (jedno-, trój-, dziewięcio- i piętnastokomórkowa). Zgodnie z przyjętym założeniem każda z komórek styka się z sąsiednią wzdłuż całej swojej szerokości i długości. W celu zapewnienia wentylacji założono otwarty otwór drzwiowy o szerokości równej jednej trzeciej szerokości budynku (20 m) i wysokości 3 m. Idea zaproponowana przez Chowa polegała na zastosowaniu programu CFAST do wyznaczania parametrów pożaru dla każdej z komórek, tak jakby była ona oddzielnym pomieszczeniem. Dla celów symulacyjnych przyjęto źródło pożaru o mocy 5 MW i wymiarach 3 m x 3 m usytuowane na środku pomieszczenia. Ogólny schemat pomieszczenia z podziałem na komórki, źródłem pożaru i otworem drzwiowym pokazano na ryc. 6. Model umożliwia wyznaczenie wartości strumieni powietrza przepływających między poszczególnymi komórkami podczas rozwoju pożaru. Przykładowe wartości średnie dla założonego środowiska pożaru oraz struktur jedno- i trójkomórkowych przedstawiono na ryc. 7. Badania symulacyjne wykazały, że otrzymane wartości temperatur i wysokości warstwy dymu oraz przepływających strumieni różnią się dla każdej z komórek.



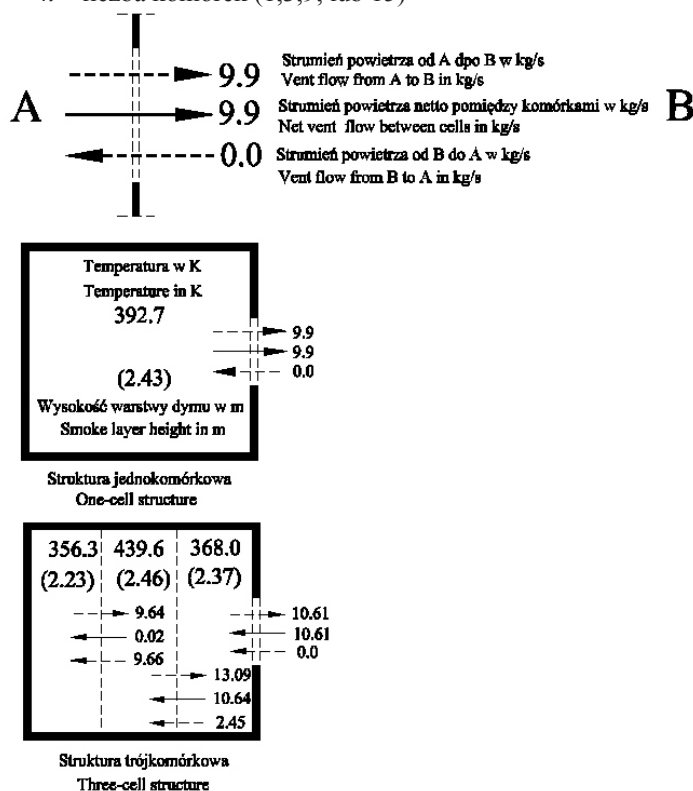
Ryc. 6. Podział pomieszczenia na komórki w strukturach jedno-, trój-, dziewięcio- i piętnastokomórkowych [9]
 Fig. 6. Division of compartment into cells in the structures: a) one-cell, b) three-cell, c) nine-cell, d) fifteen-cell

Średnie wartości temperatury dymu i wysokości zadymienia dla całego pomieszczenia można wyznaczyć z następujących zależności:

$$T_{sr} = \frac{\sum_i^n T_{sr\ i}}{n} \tag{11}$$

$$h_{sr} = \frac{\sum_i^n h_{sr\ i}}{n} \tag{12}$$

gdzie: $T_{sr\ i}$ – średnia wartość temperatury w i-tej komórce
 $h_{sr\ i}$ – średnia wysokość strefy zadymienia w i-tej komórce
 n – liczba komórek (1,3,9, lub 15)

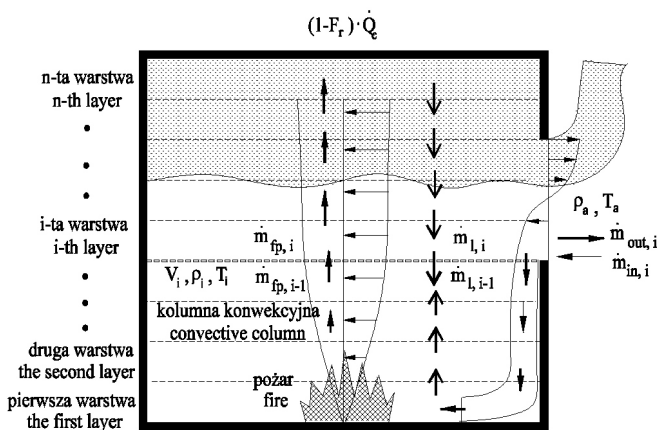


Ryc. 7. Wartości temperatury i wysokości dymu oraz przepływających strumieni uzyskane dla struktur jedno- i trój-komórkowych [9]
 Fig. 7. Values of temperature and height of smoke layer together with flowing jets obtained for the structures one and three-cell

Chow wykazał, że dzięki metodzie dzielenia objętości na mniejsze elementy, można uzyskać znacznie dokładniejsze wyniki, niż w przypadku zastosowania modelu strefowego, przy nieznacznie dłuższym czasie wykonywania obliczeń przez komputer. Autor podkreśla w pracy wpływ podziału na dokładność obliczeń. Różnice pomiędzy wynikami programu CFAST uzyskanymi dla struktury jedno- i piętnastokomórkowej dochodziły prawie do 30%.

4. Model wielowarstwowy Suzuki

Model wielowarstwowy Keichi, Suzuki i innych został zaprezentowany po raz pierwszy w 2002 r [50]. Jego głównym celem było dokładniejsze niż w modelu strefowym wyznaczenie rozkładu wartości temperatur i innych parametrów pożaru w płaszczyźnie pionowej pomieszczenia. Idea modelu polega na podziale pomieszczenia z pożarem na n warstw poziomych o tej samej wysokości, a następnie obliczeniu wartości strumieni masy i ciepła wymienianych między tymi warstwami. Schemat pomieszczenia zawierający podział na warstwy, kolumnę konwekcyjną, profil strumienia i niezbędne oznaczenia został pokazany na ryc. 8.



Ryc. 8. Przekrój pomieszczenia z podziałem na n warstw poziomych [50]

Fig. 8. Vertical section of compartment with n horizontal layers [50]

W modelu założono takie same parametry w ramach każdej z warstw, natomiast dopuszcza się różnice pomiędzy dwiema różnymi warstwami. Ponadto założono, że kolumna konwekcyjna nie miesza się z górną warstwą i dostarcza do ostatniej najwyższej warstwy 70% całego wydzielonego podczas spalania ciepła. Pozostałe 30% jest wypromieniowywane do każdej z warstw.

Z zasady zachowania masy można wywnioskować, że gęstość i objętość i-tej warstwy jest wynikiem sumowania wszystkich strumieni, które przepływają między tą warstwą a sąsiednimi warstwami i otworami pomieszczenia oraz strumienia pochłoniętego przez kolumnę konwekcyjną.

Równanie zachowania masy dla i-tej warstwy, gdzie $i=1,..,n-1$, można zapisać w następującej postaci:

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i) = -(\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}) + \dot{m}_{i+1,i} - \dot{m}_{i,i-1} - \dot{m}_{out,i} + \dot{m}_{in,i} \quad (13)$$

natomiast to samo równanie dla n-tej warstwy można zapisać w następującej postaci:

$$\frac{d}{dt}(\rho_n V_n) = \sum_{i=1}^{n-1} (\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}) - \dot{m}_{n,n-1} - \dot{m}_{out,n} + \dot{m}_{in,n} \quad (14)$$

gdzie:

ρ_i – średnia gęstość i-tej warstwy, kg/m^3

V_i – objętość i-tej warstwy, m^3

$\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}$ – strumień masy wpływający z i-tej warstwy do kolumny konwekcyjnej, kg/s

$\dot{m}_{i+1,i}$ – strumień masy wpływający z i+1-warstwy do i-tej warstwy, kg/s

$\dot{m}_{i,i-1}$ – strumień masy wypływający z i-tej do i-1-warstwy, kg/s

$\dot{m}_{out,i}$ – strumień masy wypływający z i-tej warstwy przez otwór wentylacyjny, kg/s

$\dot{m}_{in,i}$ – strumień masy wpływający do i-tej warstwy przez otwór wentylacyjny, kg/s

ρ_n – średnia gęstość n-tej warstwy, kg/m^3

V_n – objętość n-tej warstwy, m^3

$\dot{m}_{n,n-1}$ – strumień masy wypływający z n-tej do n-1-warstwy, kg/s

$\dot{m}_{out,n}$ – strumień masy wypływający z n-tej warstwy przez otwór wentylacyjny, kg/s

$\dot{m}_{in,n}$ – strumień masy wpływający do n-tej warstwy przez otwór wentylacyjny, kg/s

Równanie zachowania energii w każdej z warstw przyjmie postać:

a) dla i-tej warstwy, gdzie $i = 1, \dots, n-1$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(C_p \rho_i V_i T_i) = & -C_p (\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}) T_i + \\ & + C_p \left\{ \max(\dot{m}_{i+1,i} T_{i+1}, 0) + \min(\dot{m}_{i+1,i} T_i, 0) \right\} + \\ & - C_p \left\{ \max(\dot{m}_{i,i-1} T_i, 0) + \min(\dot{m}_{i,i-1} T_{i-1}, 0) \right\} + \\ & - C_p \dot{m}_{out,i} T_i + C_p \dot{m}_{in,i} T_{air} + \\ & - \dot{Q}_{w,i} + \dot{Q}_{r,i} + \varphi_i F_r \dot{Q}_c \end{aligned} \quad (15)$$

b) dla n-tej warstwy

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(C_p \rho_n V_n T_n) = & C_p \sum_{i=1}^{n-1} (\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}) T_i - C_p \dot{m}_{n,n-1} T_n - C_p \dot{m}_{out,n} T_n + \\ & + C_p \dot{m}_{in,n} T_{air} - \dot{Q}_{w,n} + \dot{Q}_{r,n} + (1 - F_r) \dot{Q}_c \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie:

C_p – izobaryczne ciepło właściwe, $J/(kg K)$

T_i – wartość temperatury i-tej warstwy, K

T_{air} – wartość temperatury powietrza otaczającego kolumnę konwekcyjną, K

$\dot{Q}_{w,i}$ – strumień energii pochłoniętej przez ścianę na wysokości i-tej warstwy, W

\dot{Q}_{wi} – wartość energii netto uzyskana przez i-tą warstwę na drodze promieniowania, W

\dot{Q}_c – strumień ciepła wydzielony w wyniku spalania, W

F_r – część ciepła wypromieniowanego (w tym przypadku wynosi 0,3),

φ_i – część ciepła wypromieniowanego do każdej warstwy (równa $4/3n$, gdy $i \leq n/2$ i $2/3n$, gdy $i > n/2$).

T_n – wartość temperatury n-tej warstwy, K

$\dot{Q}_{w,n}^*$ – strumień energii pochłoniętej przez ścianę na wysokości n-tej warstwy, W

$\dot{Q}_{r,n}$ – wartość energii netto uzyskana przez n-tą warstwę na drodze promieniowania, W.

Równanie wynikające z zasady zachowania k-tego produktu spalania można zapisać w ogólnej postaci:

a) dla i-tej warstwy, gdzie $i = 1, \dots, n-1$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_i V_i Y_{k,i}) = & -(\dot{m}_{fp,i} Y_{k,i} - \dot{m}_{fp,i-1} Y_{k,i-1}) + \\ & + \left\{ \max(\dot{m}_{i+1,i} Y_{k,i+1}, 0) + \min(\dot{m}_{i+1,i} Y_{k,i}, 0) \right\} + \\ & - \left\{ \max(\dot{m}_{i,i-1} Y_{k,i}, 0) + \min(\dot{m}_{i,i-1} Y_{k,i-1}, 0) \right\} + \\ & - \dot{m}_{out,i} Y_{k,i} + \dot{m}_{in,i} Y_{k,air} \end{aligned} \quad (17)$$

b) dla n-tej warstwy

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_n V_n Y_{k,n}) = & -(\dot{m}_{fp,n} Y_{k,n} - \dot{m}_{fp,n-1} Y_{k,n-1}) + \\ & - \left\{ \max(\dot{m}_{1,n} Y_{k,n}, 0) + \min(\dot{m}_{1,n} Y_{k,n-1}, 0) \right\} + \\ & - \dot{m}_{out,n} Y_{k,n} + \dot{m}_{in,n} Y_{k,air} + \Gamma_k \end{aligned} \quad (18)$$

gdzie:

$Y_{k,i}$ – stężenie k-tego produktu w i-tej warstwie, kg/kg

$Y_{k,air}$ – stężenie k-tego produktu w powietrzu otaczającym kolumnę konwekcyjną, kg/kg

Γ_k – szybkość wydzielania k-tego produktu w wyniku spalania, kg/s

$Y_{k,n}$ – stężenie k-tego produktu w n-tej warstwie, kg/kg.

Ze względu na niewielkie zmiany ciśnienia przyjęto, że w modelu można zastosować równanie gazu doskonałego w postaci:

$$\rho_i T_i = const. \quad (19)$$

Po uwzględnieniu następującej zależności:

$$\frac{d}{dt}(c_p \rho_i V_i T_i) = c_p \rho_i V_i \frac{dT_i}{dt} + c_p T_i \frac{d}{dt}(\rho_i V_i) \quad (20)$$

oraz wstawieniu do niej prawych stron równań (13) i (15), dokonując odpowiednich przekształceń, można otrzymać następującą zależność na temperaturę w i-tej warstwie, która odpowiada modelowi strefowemu:

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{dt} = & \frac{1}{\rho_i V_i} \left\{ \dot{m}_{i,i-1} T_i - \dot{m}_{i+1,i} T_i + \left[\max(\dot{m}_{i+1,i} T_{i+1}, 0) + \min(\dot{m}_{i+1,i} T_i, 0) \right] \right\} + \\ & - \left\{ \max(\dot{m}_{i,i-1} T_i, 0) + \min(\dot{m}_{i,i-1} T_{i-1}, 0) \right\} + \dot{m}_{in,i} (T_{air} - T_i) \left. \right\} + \\ & + \frac{Q_{r,i} + \varphi_i F_r Q_c - Q_{w,i}}{c_p \rho_i V_i} \quad \text{dla } i = 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (21)$$

Podobnie podstawiając prawe strony równań (14) i (16) do (18), można uzyskać analogiczną zależność dla n-tej warstwy:

$$\begin{aligned} \frac{dT_n}{dt} = & \frac{1}{\rho_n V_n} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} (\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}) \cdot T_i - \sum_{i=1}^{n-1} (\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}) \cdot T_n + \dot{m}_{in,n} (T_{air} - T_n) \right\} + \\ & + \frac{(1-F_r) \cdot Q_c + Q_{r,n} - Q_{w,n}}{c_p \rho_n V_n} \end{aligned} \quad (22)$$

Podobnie przekształcając lewą stronę równania (17) do postaci:

$$\frac{d}{dt}(c_p V_i Y_{k,i}) = \rho_i V_i \frac{dY_{k,i}}{dt} + Y_{k,i} \frac{d}{dt}(\rho_i V_i) \quad (23)$$

a następnie podstawiając do niej prawe strony równań (13) i (17) i wykonując odpowiednie przekształcenia, można uzyskać zależność pozwalającą wyznaczyć stężenie k-tego składnika w i-tej warstwie (analogicznie jak w modelu strefowym) dla $i=1, \dots, n-1$:

$$\frac{dY_{k,i}}{dt} = \frac{1}{\rho_i V_i} \left\{ \left[\max(\dot{m}_{i+1,i} Y_{k,i+1}, 0) + \min(\dot{m}_{i+1,i} Y_{k,i}, 0) - \dot{m}_{i+1,i} Y_{k,i} \right] + \right. \\ \left. - \left[\max(\dot{m}_{i,i-1} Y_{k,i}, 0) + \min(\dot{m}_{i,i-1} Y_{k,i-1}, 0) - \dot{m}_{i,i-1} Y_{k,i} \right] + \right. \\ \left. + \dot{m}_{in,i} (Y_{k,air} - Y_{k,i}) \right\} \quad (24)$$

Podobnie podstawiając prawe strony równań (14) i (18), można uzyskać zależność na stężenie k-tego składnika w n-tej warstwie o postaci:

$$\begin{aligned} \frac{dY_{k,n}}{dt} = & \frac{1}{\rho_n V_n} \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} (\dot{m}_{fp,i} - \dot{m}_{fp,i-1}) \cdot Y_{k,i} - \dot{m}_{fp,n} Y_{k,n-1} - \dot{m}_{fp,n} Y_{k,n} + \dot{m}_{in,n} (Y_{k,air} - Y_{k,n}) \right\} + \\ & - \frac{\Gamma_k}{\rho_n V_n} \end{aligned} \quad (25)$$

W skład modelu wielowarstwowego wchodzi również wiele submodeli. Jednym z nich jest submodel przepływu ciepła, który zawiera równania pozwalające określić ciepło przekazywane do ścian i sufitu na drodze przewodzenia. W każdej warstwie ciepło jest również przekazywane poprzez konwekcję ścianom, a w najwyższej warstwie także sufitowi. Ostatnim rodzajem wymiany ciepła jest promieniowanie. W pożarach wewnętrznych (zamkniętych) wydziela się znacznie więcej dymu niż w pożarach otwartych ze względu na ograniczony dostęp tlenu podczas spalania. W przedstawianym modelu większość wypromieniowanego ciepła przejmuje gaz, ale część jest również przekazywana do ścian stykających się z wyższą i niższą warstwą. Prędkość wydzielania ciepła także jest modelowana za pomocą submodelu, który wyznacza ją

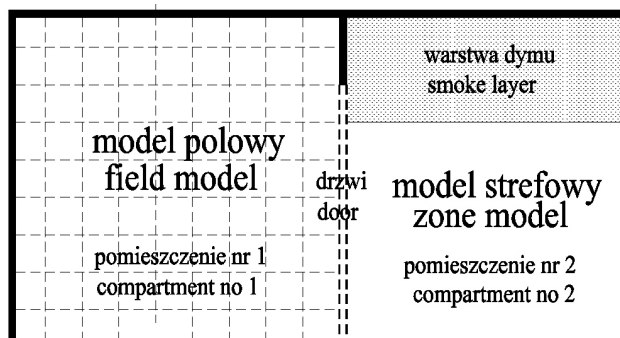
w zależności od rodzaju materiału, jego ilości, a także efektywności spalania. Kolejnymi submodelami są równania pozwalające na obliczenie przepływu masy poprzez kolumnę konwekcyjną, powierzchnię warstw, a także przepływ na zewnątrz i do wewnątrz pomieszczenia poprzez otwory wentylacyjne. Entalpia przepływu poprzez powierzchnię warstw jest obliczana kolejno dla każdej warstwy. Decyduje ona o zwrocie prędkości strumienia gazu netto, który może być skierowany do góry bądź do dołu.

Pomimo że przedstawiony model nie posiada praktycznie żadnych cech charakterystycznych dla modelu polowego, można uznać go za model hybrydowy ze względu na użyte w nim submodele, a także podejście szczegółowe do wielu zjawisk związanych ze spalaniem płomieniowym w pomieszczeniach.

5. Model strefowo-polowy HFAZM

Model mieszany strefowo-polowy, zwany w skrócie HFAZM (Hybrid Field And Zone Model), został po raz pierwszy zaprezentowany przez Hua i innych w pracy [36]. Jego idea polegała na odpowiednim skojarzeniu ze sobą dwóch znanych wcześniej modeli – strefowego i polowego. Model polowy jest stosowany w pomieszczeniu o dużej dynamice pożaru charakteryzującego się szybkimi zmianami jego parametrów np. tam, gdzie się znajduje źródło pożaru. Model strefowy jest stosowany natomiast w tych pomieszczeniach, gdzie występuje wyraźna stratyfikacja warstwy gorącej (zadymionej), a zmiany parametrów pożarów następują niezbyt szybko w korytarzu oddalonym od strefy ognia. Model mieszany HFAZM zgodnie z sugestią autorów może znaleźć zastosowanie przy pożarach w budynkach wielokondygnacyjnych. Przykład wykorzystania tego modelu do dwóch pomieszczeń, z których jedno zawiera źródło pożaru, a drugie jest puste, połączonych otwartymi drzwiami, pokazano na ryc. 9. W pierwszym pomieszczeniu zastosowano model polowy, natomiast w drugim strefowy. W części polowej modelu uproszczono sam proces spalania. W celu przyspieszenia obliczeń w symulacji wzięto pod uwagę tylko samą objętość źródła zamiast skomplikowanego submodelu procesu spalania. Szybkość wydzielenia ciepła jest określona za pomocą danej \dot{Q} , którą wprowadzono do równań zachowania energii na granicy dwóch modeli (powierzchni styku). W części strefowej modelu cała objętość pomieszczenia pustego podzielona jest na dwie strefy górną gorącą oraz dolną zimną, określaną także jako warstwa powietrza. W każdej z tych warstw zakłada się, że takie właściwości dymu lub powietrza jak: temperatura, gęstość, stężenie konkretnego produktu pirolizy są jednakowe w obrębie każdej z warstw. Symulator traktuje warstwy jako dwie objętości o pewnych ustalonych parametrach.

Submodel strefowy bazuje na dwóch równaniach zachowania masy i energii. Na ich podstawie obliczane są wartości strumieni masy i energii wymienianych między górną i dolną warstwą (ryc. 9). Przepływ dymu poprzez pionowe otwory wentylacyjne takie jak drzwi czy okna, jest zależny od różnicy ciśnień między pomieszczeniami.



Ryc. 9. Przykład dwóch sąsiadujących pomieszczeń w modelu HZAFM [36]

Fig. 9. Example of two adjacent compartments in the model HZAFM [36]

Całkowita różnica ciśnienia wyrażana jest wzorem:

$$\Delta P = 0,5C_v\rho u^2 \text{ [Pa]} \quad (26)$$

gdzie:

C_v – współczynnik oporu przepływu przez otwór wentylacyjny,

ρ – gęstość powietrza po stronie pomieszczenia ze źródłem pożaru, kg/m^3

u – prędkość strumienia powietrza, m/s .

Wykorzystując wzór (26), można określić szybkość przepływu masy przez otwór wentylacyjny, dla której równanie przyjmuje postać:

$$\dot{m} = \rho u A = A \left(\frac{2\rho\Delta P}{C_v} \right)^{1/2} \quad (27)$$

gdzie:

A – powierzchnia otworu, m^2

Jedną z ważniejszych części opisywanego modelu jest interfejs między submodelami polowym i strefowym. W tym przypadku interfejsem jest powierzchnia otworu wentylacyjnego łączącego dwa pomieszczenia. To na niej dochodzi do wymiany parametrów między submodelami. Część polowa modelu będzie korzystała z danych otrzymanych z modelu strefowego, czyli z dynamicznie ustalonego ciśnienia i granicznego warunku temperatury. Ciśnienie dla granicznego warunku jest obliczane z zasady zachowania pędu, a równanie przyjmuje postać:

$$P = P_{0,2} - \int_{H_1}^H \rho g dh - 0,5\rho U^2$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} = 0 \quad (28)$$

gdzie:

$P_{0,2}$ – ciśnienie statyczne w drugim pomieszczeniu, Pa

n – zwrot normalnego wektora jednostkowego przepływu strumienia skierowanego na zewnątrz pomieszczenia 1,

U – wektor prędkości ruchu gazu, m/s .

Natomiast graniczny warunek na temperaturę jest obliczany z zasady zachowania energii za pomocą następujących równań:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \text{gdy} \quad U \cdot n \geq 0$$

$$T = T_2, \quad \text{gdy} \quad U \cdot n < 0 \quad (29)$$

gdzie:

T_2 – temperatura dolnej bądź górnej warstwy panująca w drugim pomieszczeniu w zależności od położenia komórki względem warstwy dymu, K

Przyporządkowanie strumienia gazów modelu połowego do strefowego następuje w zależności od temperatury krytycznej dymu (T_s). Jeśli wartość temperatury powietrza na powierzchni styku jest wyższa od T_s , wtedy przepływ strumienia gazów ma miejsce w zakresie górnej warstwy pomieszczenia nr 2 (model strefowy). To, czy będzie on wpływał albo wypływał, zależy od zwrotu prędkości przepływu strumienia gazów. Szybkość przepływu energii i masy, na powierzchni styku, w górnej i dolnej warstwie w zależności od T_s przedstawiają równania:

$$\dot{m}_g = \sum \rho_k U_k n \delta A_k \quad \text{gdy} \quad T \geq T_s$$

$$\dot{E}_g = Cp \sum \rho_k U_k n T_k \delta A_k \quad \text{gdy} \quad T \geq T_s \quad (30)$$

$$\dot{m}_d = \sum \rho_k U_k n \delta A_k \quad \text{gdy} \quad T < T_s$$

$$\dot{E}_d = Cp \sum \rho_k U_k n T_k \delta A_k \quad \text{gdy} \quad T < T_s \quad (31)$$

gdzie:

δA_k – pole powierzchni bocznej k-tej siatki komórek obliczeniowych na powierzchni styku modelu połowego i strefowego, indeksy „g” i „d” odnoszą się do górnej i dolnej warstwy modelu strefowego, m².

Pozostałe bardziej szczegółowe informacje na temat modelu HZAFM, a w szczególności wyniki badań symulacyjnych i ich porównanie z wynikami modelu strefowego, a także ich analizę i wnioski można znaleźć w pracy [37].

Podobną filozofię zastosowano w publikacji [3], gdzie w modelu mieszanym wykorzystano gotowe narzędzia w postaci programów SMARTFIRE (model połowy) i CFAST (model strefowy). Jednym z najistotniejszych zagadnień w tego typu modelach, oprócz zapewnienia zasad zachowania energii i masy, spójności i odpowiedniego połączenia kodów obu programów, jest właściwe zdefiniowanie warunków przejścia z modelu strefowego do połowego i odwrotnie na otworze łączącym pomieszczenia. W tym przypadku przyjęto następujące rozwiązanie:

- ciśnienie i temperatura w modelu strefowym jest równe średniej arytmetycznej wszystkich ciśnień lub temperatur wyznaczonych dla objętości kontrolnych stykających się bezpośrednio z warstwą gorącą lub zimną,
- ciśnienie w modelu połowym jest wyznaczane zgodnie z założonym rozkładem ciśnienia hydrostatycznego z następującej zależności:

$$P(h) = \begin{cases} -g\rho_l h + P_z, & \text{if } h \leq l \\ -g(\rho_l l + \rho_u(h-l)) + P_z, & \text{if } h > l \end{cases} \quad (32)$$

gdzie:

ρ_l, ρ_u – gęstości w warstwie dolnej (zimnej) i górnej (gorącej), kg/m³

l – wysokość dolnej warstwy, m

h – wysokość, dla której jest liczone ciśnienie, m.

natomiast rozkład temperatury jest wyznaczany według poniższego prostego algorytmu:

$$T = \begin{cases} T_l, & \text{if } h \leq l \\ T_u, & \text{if } h > l \end{cases} \quad (33)$$

gdzie:

T_l – średnia temperatura w warstwie dolnej, K

T_u – średnia temperatura w warstwie górnej, K.

Jeżeli chodzi o przepływy pomiędzy komórką modelu połowego leżącą na granicy obu warstw a modelem strefowym, to w przypadku gdy wartość temperatury strumieni jest wyższa od wartości temperatury warstwy górnej, obydwa strumienie są kierowane do tej warstwy. Podobnie jeżeli wartość temperatury strumieni jest niższa od wartości temperatury dolnej warstwy, to obydwa strumienie są do niej kierowane. Dla wartości temperatury strumieni zawierającej się pomiędzy wartościami temperaturami obu warstw górnej i dolnej, strumienie są dzielone proporcjonalnie do wartości R_l i R_u wyznaczanych zgodnie z poniższym algorytmem:

$$R_l = \frac{T_u - T}{T_u - T_l}, \quad R_u = 1 - R_l \quad (34)$$

Do testowania modelu przyjęto trzy pomieszczenia o tych samych wymiarach położone jedno za drugim. Pośród środkowym pomieszczeniem, a każdym z dwóch pozostałych jest jedna para otwartych drzwi. Istnieje bezpośredni kontakt obydwu pomieszczeń zewnętrznych za pomocą otwartych drzwi. Założono pożar o stałej wartości strumienia wydzielanego ciepła równego 100 kW zlokalizowany w centralnym punkcie podłogi środkowego pomieszczenia. W jednym z pomieszczeń położonym po prawej stronie pomieszczenia ze źródłem pożaru zamiast modelu połowego zastosowano model strefowy. Porównano wartości temperatur w wybranym punkcie pomieszczenia uzyskane przy pomocy proponowanego modelu hybrydowego oraz modeli CFAST i SMARTFIRE. Okazało się, że różnice pomiędzy pełnym modelem połowym, a zastosowanym modelem mieszanym były niewielkie

i nie przekraczały 5%, natomiast czas obliczeń przy założonym czasie symulacji 100 s i kroku iteracji 1 s był krótszy o ponad jedną godzinę.

6. Ocena modeli hybrydowych

Modele hybrydowe mają na celu istotne skrócenie czasu obliczeń potrzebnych komputerowi do przeprowadzenia jednokrotnej symulacji środowiska pożaru. Proces ten jest niezwykle skomplikowany. Mnogość procesów fizycznych i chemicznych zachodzących podczas spalania materiału w pomieszczeniu zmusza użytkownika do zastosowania takiego narzędzia, które będzie je w sposób jak najdokładniejszy, odwzorowywało przy pomocy odpowiedniego modelu matematycznego.

Poniżej zamieszczono krótkie podsumowanie i ocenę każdego z omówionych wcześniej modeli hybrydowych pożaru:

6.1. Model Chowa

Pomimo zwiększenia dokładności obliczeń przyjęte w modelu Chowa objętości kontrolne są wciąż zbyt duże, aby można było określić dostatecznie dokładnie parametry pożaru w dowolnym punkcie pomieszczenia. Są one obciążone dużym błędem ze względu na założenia przyjęte przy budowie samego programu CFAST. Jest on bowiem oparty na modelu strefowym, który nie nadaje się do symulowania parametrów pożaru w pomieszczeniu, w którym zachodzi proces spalania. Przy jego pomocy można otrzymać jedynie przybliżone wartości parametrów pożaru. Podsumowując, model komórkowy W. K. Chowa jest dobrą alternatywą dla modeli strefowych i polowych, gdyż uzyskane przez autora wyniki świadczą o zwiększonej dokładności obliczeń. Użycie do obliczeń modelu polowego dałoby trochę lepsze rezultaty, jednakże czas, w jakim zostają uzyskane te wyniki jest znacznie krótszy niż w przypadku modeli polowych. Opracowane przez model środowisko pożaru, nie uwzględnia zmian niektórych parametrów pożaru (np. wentylacja), które w trakcie pożaru mogą się zmieniać. Założenie, że do budynku prowadzą drzwi o tak dużych rozmiarach, nie daje możliwości uwzględnienia mniejszych otworów lub braku otworów wentylacyjnych. Model nie uwzględnia także wpływu kolumny konwekcyjnej na temperaturę dymu w pomieszczeniu.

6.2. Modele FASIT i FAS3D

Uwzględnienie dodatkowej warstwy w modelach FASIT i FAS3D w procesie obliczeniowym można określić mianem kroku milowego w dziedzinie rozwoju modeli hybrydowych pożaru. Poprzez wprowadzenie warstwy mieszania uwzględnia on przepływy masy i ciepła pomiędzy warstwami, a także zjawisko opadania dymu. Dzięki temu wyliczona grubość warstwy dymu i temperatura tej warstwy są bardziej zbliżone do rzeczywistości. Jednak model ten również nie uwzględnia kilku ważnych dla pożaru procesów np. wymiany ciepła na drodze konwekcji, przepływów strumieni wywołanych wentylacją mechaniczną. Nie posiada on również możliwości obliczenia stężeń toksycznych produktów pirolizy np. tlenku lub dwutlenku węgla. Mimo tych braków model jest dobrą al-

ternatywą dla procesu modelowania pożarów w pomieszczeniach.

6.3. Model wielowarstwowy

Główną ideą modelu wielowarstwowego zaproponowanego przez Suzuki i innych był podział całej objętości pomieszczenia na dowolną ilość warstw poziomych, która jest ustalana przez użytkownika modelu. Skupili się oni na wymianie ciepła i masy w płaszczyźnie pionowej. Aby dokładniej modelować strumienie ciepła, wykorzystali w swoim modelu submodele przekazywania ciepła na drodze konwekcji, przewodzenia i promieniowania, a także strumienie ściennie. Uwzględnia on wydostawanie się gazów pożarowych na zewnątrz pomieszczenia, a także dopływ powietrza przez otwór wentylacyjny. Drobiazgowo podejście do procesu spalania dobrze się sprawdza przy modelowaniu rozkładu temperatury, a także stężeń niektórych produktów spalania. Model wielowarstwowy zakłada jednakową temperaturę i inne parametry w płaszczyźnie poziomej. Badania eksperymentalne potwierdzają, że istnieją duże różnice między wartościami temperatur w płaszczyźnie poziomej dochodzące nawet do 20% [30]. Nieuwzględnienie rozkładu parametrów pożaru w tej płaszczyźnie sprawia, że model daje tylko przybliżone wyniki i nie będzie on adekwatny w przypadku symulacji pożarów w obiektach o większej kubaturze. Stanowi on bardziej rozbudowany model strefowy, który może być dobrym narzędziem do określania parametrów pożaru w pojedynczych niedużych pomieszczeniach.

6.4. Model mieszany Hua

Połączenie ze sobą dwóch różniących się znacząco między sobą modeli polowego i strefowego do uzyskania modelu hybrydowego przedstawili Hua, J., Wang, J., Kumar, K. Chcąc trafnie modelować środowisko pożaru, zarówno w pomieszczeniu, gdzie zachodzi proces spalania, jak i do niego przyległych, należy wziąć pod uwagę dynamikę zmian parametrów pożaru. W związku z tym przyjęto, że w pomieszczeniu, gdzie zachodzą szybsze zmiany parametrów pożaru (np. pomieszczenie ze źródłem pożaru), należy zastosować bardziej dokładny model polowy. W pozostałych pomieszczeniach, gdzie będzie zachodziło tylko wolne rozprzestrzenianie się dymu, można zastosować mniej dokładny model strefowy, który wymaga znacznie krótszego czasu obliczeń niż model polowy. Wcześniejsze prace skupiały się głównie na wielkogabarytowych obiektach lub pojedynczych pomieszczeniach. Omawiany model pozwala również na modelowanie pożaru w obiektach wielokondygnacyjnych z długimi korytarzami i klatkami schodowymi. Jednak i on ma swoje słabe strony. Jego autorzy podeszli w bardzo ogólny sposób do źródła pożaru, określając jedynie jego moc i objętość, a rozwój pożaru opisano z góry zadaną krzywą. Nie uwzględniono w nim złożoności procesu spalania, w tym takiego istotnego zagadnienia jak bieżące zapotrzebowanie na tlen. Model ten nie uwzględnia także lokalnych zawirowań i przepływów nieustalonych. Procesy te mogą w znaczny sposób wpłynąć na otrzymane wyniki. Wyżej wymienione cechy powodują, że nie może

on zostać uznany za uniwersalne narzędzie do modelowania pożaru w pomieszczeniach.

Aby modele hybrydowe mogły w pełni zastąpić modele polowe oparte na technice CFD, należy jeszcze włożyć wiele pracy w ich rozwój. Aby było możliwe stworzenie takiego modelu, przyszłe prace powinny skoncentrować się na wymienionych niżej zagadnieniach, które pozytywnie wpłynęłyby na ich funkcjonalność:

1. Uwzględnienie gradientu temperatury i innych parametrów pożaru w każdej komórce w celu dokładniejszego zobrazowania ich rozkładu i możliwości określenia tego parametru w dowolnym punkcie geometrii pomieszczenia.
2. Uwzględnienie procesu gaszenia w pomieszczeniu. Do obliczenia ciepła odbieranego ze środowiska pożaru przez strumień rozpylony czystej lub modyfikowanej wody niezbędna jest znajomość rozkładu średnich średnic objętościowych kropeł tzw. widma kropeł. Może on być wyznaczony tylko przy pomocy badań eksperymentalnych z zastosowaniem specjalizowanych urządzeń pomiarowych. Najlepszym rozwiązaniem byłoby stworzenie submodeli dla każdego rodzaju stałego urządzenia gaśniczego (tryskacze, dysze wodne itp.). Ich działanie można by było uwzględnić w trakcie modelowania i dokładniej ukazać wpływ na środowisko pożaru. W takim submodelu należałoby także uwzględnić czasy alarmowania i uruchomienia urządzeń. W późniejszych pracach można przewidzieć możliwość otrzymania takiego modelu, który pozwalałby na stworzenie optymalnego ustawienia stałych urządzeń gaśniczych w przestrzeni pomieszczenia w celu uzyskania ich jak najlepszej skuteczności.
3. Założenie kilku źródeł pożaru w tym samym czasie, a także uwzględnienie możliwości rozprzestrzenienia się pożaru na inne materiały palne.
4. Zbadanie wpływu temperatury i innych parametrów na konstrukcję nośną budynku (pomieszczenia). Zgodnie z przeznaczeniem modeli i ich rozwojem, wyniki przez nie otrzymany nie mogłyby być wykorzystane w działaniach prewencyjnych Państwowej Straży Pożarnej. Submodel, który pozwalałby na zobrazowanie wpływu parametrów pożaru byłby bardzo praktycznym narzędziem, które wpłynęłoby na uniwersalność stosowania modeli hybrydowych.
5. Dążenie do uzyskiwania coraz to dokładniejszych wyników zbliżonych do tych otrzymanych podczas badań eksperymentalnych. Dodatkowe próby pożarowe pozwoliłyby na porównanie konkretnych scenariuszy pożaru, a otrzymane różnice należałoby przeanalizować i próbować wprowadzić takie zmiany w modelu, aby je zminimalizować.
6. Stworzenie dla osoby modelującej możliwości samodzielnego decydowania o dokładności, z jaką program powinien wykonywać obliczenia. W ten sposób osoba zainteresowana uzyska wpływ na czas wykonywania obliczeń.
7. Uwzględnienie przepływu mas, energii i dowolnego czynnika toksycznego między komórkami z uwzględnieniem wentylacji mechanicznej.

8. Określenie bieżącego zapotrzebowania na tlen i porównanie go z ilością aktualnie dostępną w celu uwzględnienia tego faktu w procesie spalania, a w szczególności jego wpływu na ilość wydzielanego ciepła i produktów pirolizy.
9. Uwzględnienie wszystkich wymian ciepła na drodze konwekcji, przewodzenia i promieniowania.
10. Uwzględnienie zjawiska turbulencji w modelach.

Model, który będzie spełniał powyższe kryteria może w przyszłości zastąpić szeroko stosowane obecnie modele polowe.

Literatura

1. Beard A. N., *Limitations of Fire Models*, Journal of Applied Fire Science, vol. 5(3), 1995-96, pp. 233-243;
2. Beard A. N., *Requirements for acceptable model use*. Fire Safety Journal, vol. 40, 2005, pp. 477-484;
3. Burton D.J., Grandison A.J., Patel M.K., Galea E.R., Ewer J.A.C., *Introducing a Hybrid Field/Zone Modelling Approach for Fire Simulation*, Proceedings of INTERFLAM 2007, London 2007, pp. 1491-1497;
4. Chow W.K., Wong W.K., *Application of the Zone Model FIRST on the Development of Smoke Layer and Evaluation of Smoke Extraction Design for Atria in Hong Kong*. Journal of Fire Sciences, vol. 11, 1993, s. 329-347;
5. Chow W.K., *A Short Note on the Simulation of the Atrium Smoke Filling Process Using Fire Zone Models*. Journal of Fire Sciences, vol. 12, 1994, s. 516-528;
6. Chow W.K., Cheung Y.L., *Simulation of Sprinkler-Hot Layer Interaction Using a Field Model*. Fire and Materials, vol. 18, 1994, s. 359-379;
7. Chow W.K., *Multi-cell Concept for Simulating Fires in Big Enclosures Using with a Zone Model*. Journal of Fire Sciences, vol. 14, 1996, s. 186-198;
8. Chow W.K., *Performance of Sprinkler in Atria*. Journal of Fire Sciences, vol. 14, 1996, s. 466-489;
9. Chow W.K., *Fire Hazard Assessment in a Big Hall with Multi-cell Zone Modelling Concept*. Journal of Fire Sciences, vol. 15, 1997, pp. 14-28.
10. Chow W.K., Cui E.: *Plume Equations for Studying Smoke-filling Process in Atria with a Zone Model*. Fire and Materials, vol. 21, 1997, s. 235-245;
11. Chow M.K., *On the Use of Time Constants for Specifying the Smoke Filling Process in Atrium Halls*. Fire Safety Journal, vol. 28, 1997, s. 165-177;
12. Chow W.K., *An Approach for Evaluating Fire Zone Models*. Journal of Fire Sciences, vol. 16, 1998, s. 25-31;
13. Chow W.K., *Predictability of Flashover by Zone Models*. Journal of Fire Sciences, vol. 16, 1998, s. 335-350;
14. Christian, N., *An analysis of pre-flashover fire experiments with field modeling comparisons*. Master thesis, Canterbury: University of Canterbury, 2000;
15. Cooper L. Y., *Fire-Plume-Generated Ceiling Jet Characteristics and Convective Heat Transfer to Ceiling and Wall Surfaces in a Two-Layer Zone-Type Fire Environment*. Natl. Inst. Stand. Technol., NISTIR 4705, 1991, s. 57;
16. Cooper L.Y., *The Interaction of fan Isolated Sprinkler Spray and a Two-layer Compartment Fire Environment. Phenomena and Model Simulations*. Fire Safety Journal, vol. 2, 1995, s. 89-92;
17. Cooper L.Y., *Simulating Smoke Movement through Long Vertical Shafts in Zone-type Compartment Fire Models*. Fire Safety Journal, vol. 31, 1998, s. 85-99;
18. Cox G.: *Compartment Fire Modelling*. Combustion Fundamentals of Fire, Academic Press, 1995, p. 334.
19. Davis W. D., *The Zone Fire Model JET: A Model for the Prediction of Detector Activation and Gas Temperature in the*

- Presence of a Smoke Layer*. NISTIR 6324, National Institute of Standards and Technology, 1999;
20. Ewer J., Galea E.R., Patel M.K., Taylor S., Knight B., Petridis M., *SMARTFIRE: An Intelligent CFD Based Fire Model*. Journal of Fire Protection Engineering, vol. 10(1), 1999, s. 13-27;
 21. Friedman R., *An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke*. Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 4, No. 3, 1992, s. 81-92;
 22. Galea E.: *On the Field Modeling Approach to the Simulation of Enclosure Fires*. Journal of Fire Protection Engineering, vol. 1(1), 1989, s. 11-22;
 23. Gałaj, J., *Komputerowa symulacja rozwoju pożaru w obiektach wielokondygnacyjnych*. Materiały VII Warsztatów Naukowych PTSK. Zakopane-Kościelisko 14-16 wrzesień 2000;
 24. Gałaj, J., *Computer simulation of fire development in multi-storey building*. The 7th International Conference „Modern Building Materials, Structures and Techniques. Vilnius May 16-18, 2001;
 25. Gałaj, J., *Modelowanie cyfrowe rozwoju pożaru w budynkach wysokich*. „Ochrona Mienia” (6) 2001. Warszawa 2001;
 26. Gałaj J., *Computer Tests of Fire in Multi-storey Building for Different Configuration of Vents*. Proceedings of 8-th International Conference „Modern Building Materials, Structures and Techniques. Vilnius May 19-21, 2004;
 27. Gałaj J., Konecki M., *Zasady hybrydowego modelowania pożaru w układzie pomieszczeń*, Referat Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2008;
 28. Gałaj J., *A general concept of fire hybrid modelling in compartments*, Journal of Civil Engineering and Management, vol. 15(3), Vilnius, 2009, s. 237-245;
 29. Gałaj J., *A new version of hybrid model of fire in compartments*. Proceedings of 10-th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, Vilnius May 19-21, 2010;
 30. Gałaj J, Tuśnio, N., *Validation of popular zone and field models using the results of full-scale fire tests with polyurethane foam*. Proceedings of the 10-th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, Vilnius May 19-21, 2010.
 31. Gandhi, P.D., *Validation of a Zone Model for Predicting Smoke Filing Process in Atrium Halls*. Fire Safety Sciences, vol. 12, 1994, s. 313-325;
 32. Gottuk D.I., Roby R.J., Beyler C.L., *The Role of Temperature on Carbon Monoxide Production in Compartment Fires*. Fire Safety Journal, vol. 24, 1995, pp. 315-331;
 33. Gupta A. K., Kumar R., *Compartments Fires. A Simple Mathematical Model*. J. Applied Fire Science, 11 (1), s. 53-74, 2002 – 2003;
 34. Hadjisophocleous G. V., Yakan A., *Computer Modeling of Compartment Fires*. Internal Report No. 613, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, ON, 1991;
 35. He Y., Beck V., *Smoke Spread Experiment in a Multi-storey Building and Computer Modelling*. Fire Safety Journal, vol. 28, 1997, s. 139-164;
 36. Hua J., Wang J., Kumar K.: *Development of a Hybrid Fields and Zone Model for Fire Smoke Propagation Simulation in Buildings*, Fire Safety Journal, vol. 40, 2005, s. 99-119;
 37. Kim, E., Woycheese, J., Dembsey, N., *A study of fire dynamics simulator version 4.0 for tunnel fire scenarios with forced longitudinal ventilation*. Proceedings of 11th International Conference INTERFLAM 2007, London 2007, s. 503-515.
 38. Konecki M., Tuśnio N., *Rozszerzenie komputerowego modelu pożaru ASET-B o wybrane mechanizmy wymiany ciepła i masy*. Zeszyty Naukowe SGSP, vol. 26, 2001, s. 33-56;
 39. Konecki M., Tuśnio N., *The Multi-zone Model for Predicting the Compartment Fire Environment*. 17-th International Symposium on Combustion Processes, 24-27 September 2001, Poznań, pp. 148-153;
 40. Konecki M., *Zastosowanie modelu strefowego do badań różnych scenariuszy pożaru w pomieszczeniu*. Archiwum Spalania, vol. 2 (1), 2002;
 41. Konecki M., *Problemy modelowania rozwoju pożaru w pomieszczeniach*, Archiwum Spalania, Vol. 2, nr 1, Warszawa 2002, s. 69-91;
 42. Konecki M., *Modelowanie strefowo – przestrzenne pożaru w pomieszczeniach. Modele FASIT i FAS3D*, Warszawa 2007;
 43. Luo M., *One Zone or Two Zones in the Room of Fire Origin During Fires? The Effects of the Air-handling System*. Journal of Fire Sciences, vol. 15, 1997, s. 240-260;
 44. Luo, M., He, Y., Beck, V., *Application of field model and two-zone model to flashover fires in a full-scale multi-room single level building*. Fire Safety Journal, vol. 29, 1997, s. 1-25;
 45. McGrattan K. B., Forney G. P., *Fire Dynamics Simulator – User’s Manual*. NISTIR 6469, National Institute of Standards and Technology, 2000;
 46. Oleksy M., *Ocena hybrydowych modeli pożarów*, Praca dyplomowa, SGSP 2009;
 47. Piórczyński, W, Gałaj, J. *Matematyczny model rozprzestrzeniania się pożaru w budynkach wielokondygnacyjnych*, Zeszyty Naukowe SGSP, nr 21, Warszawa 1998, s. 5-50;
 48. Rockett, J., A., Morita, M., Cooper, L., Y., *Comparisons of NBS/Harvard VI Simulations and Data from all Runs of a Full-scale Multi-room Fire Test Program*. Fire Safety J. 1989, 15, 115-169;
 49. Steckler K.D., Quintiere J.G., Rinkinen W.J., *Flow Induced by Fire in a Compartment*. NBSIR 822520, NBS, Washington, DC, 1982;
 50. Suzuki K., Harada K.; Tanaka T., *A multi-layer zone model for predicting fire behaviour in a single room*, Proceedings of the 7th international symposium on Fire Safety Science, 2002.

dr inż. Jerzy Gałaj – ukończył Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa na Politechnice Warszawskiej. Posiada stopień doktora nauk technicznych. Pracuje na stanowisku kierownika Zakładu Hydromechaniki i Przewodności Pożarowej Zaopatrzenia w Wodę w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Jest autorem ponad 60-ciu publikacji naukowych. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na następujących zagadnieniach: modelowanie pożarów w szczególności modele hybrydowe, spalanie drewna i tworzyw sztucznych, modelowanie systemów gaśniczych i badanie ich efektywności gaśniczej, modelowanie taktycznych rozwinięć linii węzowych i systemów przesyłania wody na duże odległości (wkład 80%: rozdziały 1-4, literatura i redakcja całości).

mgr inż. Mateusz Oleksy – roku 2009 ukończył studia I stopnia na wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. W roku 2011 ukończył studia II stopnia na tym samym wydziale. Posiada stopień magistra pożarnictwa. Jest funkcjonariuszem PSP i obecnie pracuje jako dowódca sekcji w Komendzie Powiatowej PSP w Pruszkowie k/W-wy (wkład 20% – rozdział 5).