

Marek Konecki*

Andrzej Kolbrecki**

BADANIE WPŁYWU WARUNKÓW ŚRODOWISKA POŻARU NA MOŻLIWY CZAS EWAKUACJI

Przy ewakuacji z budynku w razie pożaru wymaga się, aby w przypadku każdego pomieszczenia czas wymagany do ewakuacji był mniejszy niż możliwy czas ewakuacji. Możliwy czas ewakuacji to przedział czasowy pomiędzy czasem zapalenia a czasem, kiedy warunki środowiska osiągną wartości krytyczne (progowe). Warunki te są spowodowane działaniem produktów spalania: ciepła radiacyjnego i konwekcyjnego, gazów narkotycznych, produktów drażniących zmysły i górne drogi oddechowe, zadymieniem. Jedną z metod określania możliwego czasu ewakuacji zawiera program CFAST. W artykule podano wstępne wyniki obliczeń dotyczące układów z jednym i wieloma pomieszczeniami, gdy oddziaływanie parametrów pożaru jest niezależne.

1. Wprowadzenie

Przy określaniu konsekwencji pożaru w budynkach dla życia ludzi, krytycznym kryterium bezpieczeństwa życia jest zasada, aby możliwy czas ewakuacji był dłuższy niż czas wymagany do ewakuacji [1]. Możliwy czas ewakuacji to przedział czasowy pomiędzy czasem zapalenia a czasem, kiedy warunki środowiska osiągną wartości krytyczne (progowe), uniemożliwiające skuteczną ewakuację. Warunki te są spowodowane działaniem produktów spalania:

- a) ciepła radiacyjnego i konwekcyjnego,
- b) gazów narkotycznych,
- c) produktów drażniących zmysły i górne drogi oddechowe,
- d) zadymieniem.

Czas wymagany do ewakuacji jest to czas przeznaczony przez użytkowników do przejścia od miejsca pobytu do miejsca bezpiecznego. W czasie pożaru użytkownicy są poddani działaniu ciepła i gazów pożarowych, co wpływa na szybkość poruszania i wybór drogi ucieczki, a w rezultacie powoduje redukcję efektywności działania i przedłuża ewakuację. Czynniki wpływające na niezbędny czas ewakuacji nie są rozpatrywane w niniejszym artykule.

* dr – adiunkt w Szkole Głównej Służby Pożarnej

** dr inż. – adiunkt w Zakładzie Badań Ogniwych ITB

W Instytucie Techniki Budowlanej prowadzony jest temat naukowo-badawczy dotyczący rozwoju pożaru i zasad ewakuacji. Celem pracy jest określenie możliwego czasu ewakuacji na podstawie przyjętego scenariusza pożaru. Porównanie tego czasu z niezbędnym czasem ewakuacji (określonym niezależnie) służy do określenia efektywności projektowania z punktu widzenia ochrony przeciwpożarowej. Takie porównanie służy do rezygnacji z niepotrzebnych dróg ewakuacji, w zamian za inne strategie ochrony.

W artykule przedstawiono wstępny etap pracy, z określeniem wpływu poszczególnych warunków pożaru na możliwy czas ewakuacji (przyjmując, że ich działanie było niezależne od siebie).

2. Model określania możliwego czasu ewakuacji ludzi w zależności od warunków środowiska pożaru

Model zakłada określanie działania produktów pożaru na ludzi w dyskretnych przedziałach czasowych. Jest wtedy możliwe określanie punktu krytycznego, tj. czasu, kiedy użytkownicy nie są w stanie działać efektywnie.

W takiej analizie możliwy czas ewakuacji zależy od wielu charakterystyk pożaru, pomieszczenia i samych użytkowników. Rodzaj pożaru, na przykład szybkość wydzielania ciepła, liczba i rodzaj palnych elementów, ich skład chemiczny, a także rodzaj pomieszczenia: jego wymiary, wentylacja – określają stężenia gazów toksycznych, temperaturę gazów i ścian, gęstość dymu w pomieszczeniu w funkcji czasu. Dane charakteryzujące użytkowników, na przykład wiek, stan zdrowia, miejsce przebywania i stan aktywności w czasie pożaru – określają ich podatność na oddziaływanie produktów spalania. Ekspozycja jest częściowo określona również przez uwzględnienie położenia głów użytkowników w warstwie dymowej tworzącej się pod sufitem, która potem opuszcza się stopniowo w miarę rozwoju pożaru. W rezultacie działania tych czynników każdy użytkownik będzie miał odmienny dostępny czas ewakuacji. Ze składników cieplnych uwzględnia się zarówno wpływ ciepła konwekcyjnego, jak i radiacyjnego. Zadymienie powoduje dezorientację użytkowników w stopniu utrudniającą efektywną akcję i wpływa na zmniejszenie dostępnego czasu ewakuacji.

Ocenę wpływu produktów pożaru dokonano na podstawie następujących założeń:

- przyjęto, że efekty działania produktów narkotycznych, produktów drażniących, ciepła oraz ograniczenie widzialności są niezależne (pewien stopień interakcji pomiędzy tymi czynnikami jest znany, ale traktowany drugorzędnie w niniejszym artykule),
- toksyczne działanie aerozoli i cząstek stałych oraz współdziałanie z gazowymi produktami spalania nie są uwzględniane,
- forma fizyczna ma wpływ na gwałtowną utratę zdolności działania, ale uważa się, że jest to wpływ drugorzędny w stosunku do działania gazowych produktów spalania,
- stan zdrowia użytkowników wpływa na odporność na działanie zarówno produktów narkotycznych, jak i drażniących; w niniejszym artykule nie jest to uwzględnione.
- metodykę oparto na obecnym stanie wiedzy, dającej niekompletną ocenę konsekwencji oddziaływania produktów spalania na człowieka w okresie krótko- i długoterminowym.

Do określania możliwego czasu ewakuacji przyjęto, zgodnie z dotychczasowymi ustaleniami, następujące wartości graniczne produktów pożaru:

- temperatura górnej warstwy: 180 °C (kryterium Coopera [1] określające warunki cieplne, na jakie narażony jest niezabezpieczony człowiek przebywający w bezpośrednim sąsiedztwie górnej warstwy, przy których przez około 30 s nie zostaje osiągnięty próg bólu),
- temperatura dolnej warstwy: 60 °C (górną granicą temperatury, przy której możliwa jest jeszcze efektywna ewakuacja [2]),
- temperatura warstw wymieszanych: 70 °C (jak wyżej [2]),
- położenie górnej warstwy: 0,9 m (kryterium Coopera [1] określające wysokość dolnej chłodniejszej warstwy, kiedy możliwe jest jeszcze efektywne przemieszczanie się ludzi),
- promieniowanie (w drzwiach pomieszczenia): 2,5 kW/m² (kryterium Coopera związane z przekroczeniem progu bólu po około 30 s [1]),
- stężenia: O₂ – 14%, CO – od 0,1% do 0,2%, CO₂ – 8%, HCl – 1000 ppm [3],
- dym (zasięg widzialności): 5 m (kryterium przy założeniu znajomości obiektu przez użytkowników [4]).

3. Modelowanie pożaru

Modele pożarów umożliwiają całościowy opis zmian środowiska pożaru, które jest wypadkową czasowo-przestrzennych zależności procesów spalania, wymiany ciepła i dynamiki płynów. W opisie podanym niżej ograniczono się do tzw. strefowych modeli pożarów, pomijając modele połowe, probabilistyczne, fizyczne czy hybrydowe.

Symulacja dynamiki środowiska pożaru za pomocą modeli sprowadza się do jednoczesnej zmiany kilkudziesięciu podstawowych parametrów dotyczących każdego pomieszczenia, opisujących materiały palne i rodzaj inicjacji reakcji spalania, wydzielanie energii i masy, wymianę energii cieplnej, hydrodynamikę ośrodka gazowego oraz geometrię pomieszczenia. Dane wejściowe do modeli stanowią w ich strukturze uporządkowany i zamknięty zbiór wartości termodynamicznych, hydrodynamicznych i termofizycznych. Są one zwykle wyznaczone bezpośrednio na drodze doświadczalnej w różnego rodzaju testach. Ich wartości zależą jednak od warunków cieplno-przepływowych testu (a tym samym od warunków rzeczywistego środowiska pożaru), przyjętego zwykle do oznaczeń wybranego parametru przez twórcę modelu pożaru.

Wśród parametrów wejściowych zasadniczą rolę spełniają tzw. cechy pożarowe (ogniowe) – parametry empiryczne określające cechy palności materiałów, będące funkcjami parametrów układu, w którym jest na przykład wyznaczana szybkość wydzielania ciepła, szybkość spalania itp. Otrzymane wartości cech pożarowych danego materiału za pomocą różnych testów są często bardzo odmienne, co prowadzi zarówno do różnic w klasyfikacji materiałów, jak i do rozbieżności w wynikach obliczeń parametrów stanu pożaru.

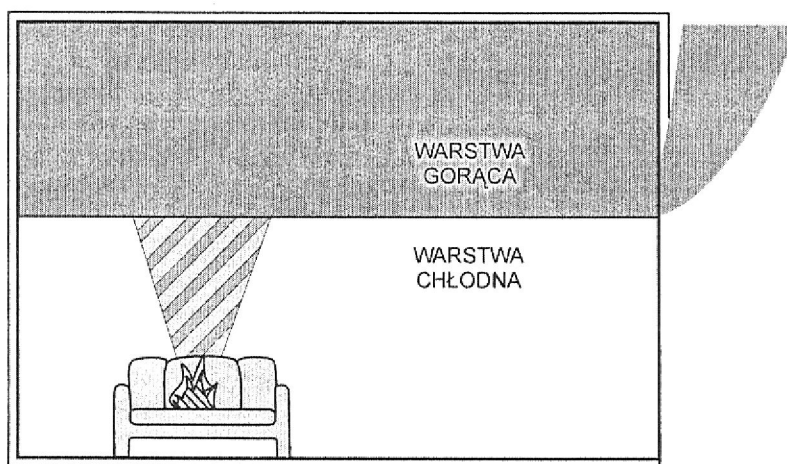
Najbardziej znaną rodziną deterministycznych komputerowych modeli strefowych są modele HARVARD/MARK, FIRST opracowane pod kierunkiem Emmons'a i Mittlera z ośrodków naukowych w USA (National Institute of Standards and Technology – dawniej NBS,

Factory Mutual Corporation i Harvard University) na początku lat osiemdziesiątych [5]. Prace badaczy takich jak Zukoski, Smith, Jones, Tanaka i wielu innych doprowadziły do powstania programów komputerowych opisujących rozwój pożaru w pojedynczym pomieszczeniu i w układach wielu pomieszczeń budynku [6].

W Polsce J. Wolanin (Szkoła Główna Służby Pożarniczej, CNBOP) na początku lat osiemdziesiątych stworzył model strefowy z uwzględnieniem kolumny konwekcyjnej [2]. M. Pofit-Szczepańska (SGSP, ITB) przeprowadziła analizę porównawczą modeli pożaru w pomieszczeniach budynku [7]. A. Teodorczyk (Instytut Techniki Ciepłej PW) jest autorem przystosowania i przetestowania programów ASET i MARK-5 [1]. Prace obliczeniowe z wykorzystaniem programów komputerowych ASET, MARK i FIRST były prowadzone w Zakładzie Badań Ogniwych ITB [8]. W. Piórczyński (SGSP) zaadaptował i rozszerzył model Tanaki dla wielu pomieszczeń [9]. J. Fangrat (ITB) zastosowała program BRANZFIRE do badań pożarów dużych powierzchni ściennych i sufitowych [10].

Obecnie prowadzone są w SGSP prace nad adaptacją i rozszerzeniem o wybrane mechanizmy wymiany ciepła i masy takich modeli-programów jak ASET, CFAST, a także stosuje się do obliczeń jeden z modeli połowych [11]. Mimo powstania modelowania połowego, które dokładniej opisuje środowisko pożaru, programy komputerowe oparte na modelach strefowych są rozwijane i udoskonalane.

W latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych powstało wiele modeli i związanych z nimi metod testowych, co przy braku standaryzacji parametrów wejściowych utrudniało ocenę dokładności modelowania. W końcu lat osiemdziesiątych została zapoczątkowana standaryzacja testowych metod badawczych określających dane wejściowe modeli pożarów. Metoda kalorymetru stożkowego (mała skala geometryczna) umożliwia na przykład jednoczesny pomiar różnych cech pożarowych materiałów w zmiennych warunkach cieplno-przepływowych, a tzw. test narożnika pomieszczenia (*Room Corner Test*) umożliwia badania parametrów pożaru w skali rzeczywistej.



Rys. 1. Schemat modelu dwustrefowego pożaru w pomieszczeniu
Fig. 1 Schema of zone model in fire compartment

Mimo trudności związanych z niemożnością w pełni ilościowego opisu kinetyki reakcji spalania zachodzących w środowisku pożaru oraz braku kompletnego modelu zapalenia, co jest związane różnorodnością potencjalnych źródeł zapłonu, na obecnym etapie badań formułuje się najbardziej prawdopodobne scenariusze pożaru.

Modelowanie pożarów pełni coraz większą rolę w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Modele strefowe pożarów (rys. 1) pozwalają na szybką i tanią ocenę warunków powstawania i rozwoju pożarów zarówno w przypadku pojedynczych pomieszczeń, jak i całych obiektów budowlanych. Umożliwiają zatem ocenę stopnia zagrożenia ludzi w czasie pożarów w budynkach (przy założonych kryteriach zagrożenia) w danych warunkach zamieszkania, wyposażenia obiektu i jego struktury. Weryfikują nowe rozwiązania architektoniczne, określają szybkość rozprzestrzeniania strefy płomieni i dymu, mające bezpośredni wpływ na bezpieczną ewakuację z budynku, są pomocne w analizach popożarowych [12].

4. Strefowy model pożaru będący podstawą programu komputerowego CFAST

Wykorzystywany w niniejszej pracy program komputerowy CFAST (*Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*) jest przeznaczony do obliczeń rozkładu dymu i gazów pożarowych oraz temperatury w różnych pomieszczeniach budynku objętego pożarem. Jest programem, który powstał i jest rozwijany w National Institute of Standards and Technology (NIST) – USA [13]. Stanowi połączenie i rozszerzenie dwóch wcześniej powstałych programów FAST [14] i CCFM.VENTS [15]. Obecnie jest najbardziej złożonym programem komputerowym opartym na zaawansowanym modelu strefowym dla układów wielu pomieszczeń (do trzydziestu), w sposób najbardziej pełny symulującym środowisko pożaru w budynku.

Model będący podstawą CFAST, jak wszystkie znane modele strefowe, ma formę układu równań różniczkowych wraz z warunkami początkowymi i równań algebraicznych. Równania te, wyprowadzane z równań zachowania masy, energii i momentu, uzupełnione prawem gazu doskonałego, z definicjami gęstości i energii wewnętrznej, są formułowane dla każdej strefy lub objętości kontrolnej.

Podstawowy układ równań różniczkowych zwyczajnych w modelu CFAST [13] stanowią zależności dla średniego ciśnienia P , temperatury i objętości górnej gorącej warstwy T_U , V_U oraz temperatury dolnej chłodnej warstwy T_L , formułowane dla każdego z rozważanych pomieszczeń budynku:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U); \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (1)$$

$$\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left[(\gamma - 1) \dot{h}_U - V_U \frac{dP}{dt} \right] \quad (2)$$

$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_U V_U} \left[(\dot{h}_U - c_p \dot{m}_U T_U) + V_U \frac{dP}{dt} \right] \quad (3)$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_L V_L} \left[(\dot{h}_L - c_p \dot{m}_L T_L) + V_L \frac{dP}{dt} \right] \quad (4)$$

- gdzie: c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
 c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości,
 V – objętość pomieszczenia,
 \dot{h}_L, \dot{h}_U – strumienie entalpii wpływającej do warstwy dolnej i górnej,
 \dot{m}_L, \dot{m}_U – strumienie masy gazów wpływających do warstwy dolnej i górnej,
 L, ρ_U – gęstości dolnej i górnej warstwy.

Strumienie entalpii i masy gazów obliczane są przy założeniu submodeli chemii spalania, złożonej wymiany ciepła oraz klasycznej dynamiki płynów.

Struktura systemu CFAST zawiera podstawowe procedury umożliwiające wczytywanie danych, obliczenia i wydruk w formie graficznej i tekstowej.

W pracy zastosowano program komputerowy CFAST (wersja 3.1.6, 1999 r.) do obliczeń możliwego czasu ewakuacji pojedynczego pomieszczenia oraz układu trzech pomieszczeń.

5. Weryfikacja doświadczalna modelu pożaru

Porównano wyniki obliczeń uzyskane za pomocą programu CFAST z danymi doświadczalnymi pożarów w skali rzeczywistej [13]. Obliczono wartości parametrów, takich jak temperatura górnej i dolnej warstwy, położenie dolnej krawędzi górnej warstwy, stężenia gazów itd. Próby testowe przeprowadzono w różnych układach pomieszczeń – od pomieszczenia pojedynczego o objętości 21 m³ do 7-piętrowego budynku o objętości 140 000 m³. Szybkości wydzielania ciepła (max) zmieniano w granicach od 100 kW (palnik gazowy) do 7 MW (pożar mebla i ściany).

Na rysunkach 2 i 3 podano wyniki pomiarów i obliczeń parametrów pożaru dotyczące wybranych prób: trzech pomieszczeń z korytarzem o całkowitej objętości 100 m³ i szybkości wydzielania ciepła przez palnik gazowy w jednym z pomieszczeń o mocy 100 kW oraz czterech pomieszczeń z korytarzem o całkowitej objętości 200 m³ i palniku o mocy 1 MW.

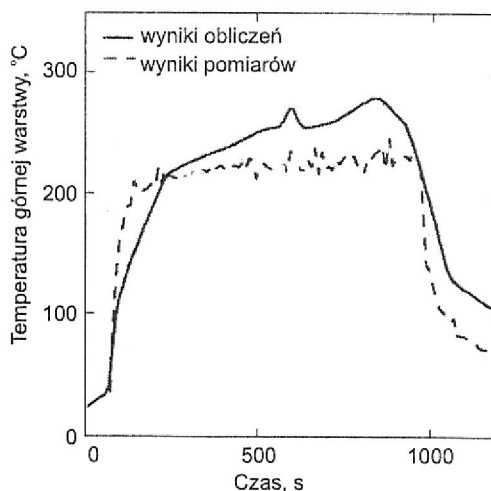
Uogólniając, wartości temperatury i położenia górnej warstwy przewidywane przez CFAST są nieco wyższe od wartości eksperymentalnych. Wyższe położenie warstwy górnej powoduje, że ma ona mniejszą objętość, co w przypadku danej entalpii przekazywanej do mniejszej objętości daje wynik w postaci wyższej temperatury.

Obliczone wartości strumieni masy są zwykle niższe od doświadczalnych. Jest to – jak się wydaje – związane z niedoskonałością teorii kolumn konwekcyjnych w otworach wentylacyjnych. Stężenia CO₂, CO są niższe od zmierzonych, co wynika najprawdopodobniej z założenia uproszczonego submodelu szybkości spalania jako funkcji stężenia tlenu w pomieszczeniu.

Mimo stosunkowo dobrej zgodności wartości obliczonych z danymi eksperymentalnymi, model CFAST ma ograniczenia, a także braki (jak podano wyżej), wynikające z nieuwzględnienia różnych zjawisk w środowisku pożaru lub potraktowanie ich w sposób nadmiernie uproszczony, co w sposób oczywisty wpływa na wyniki obliczeń [13].

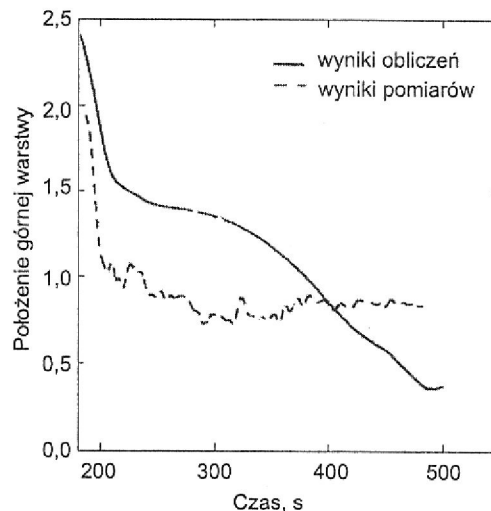
Rys. 2. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów temperatury górnej gorącej warstwy w pomieszczeniu ze źródłem ognia [13]; układ – trzy pokoje z korytarzem, źródło ognia – palnik gazowy

Fig. 2. Comparison of calculation values and measuring values of temperature in hot upper zone for fire compartment [13]; arrangement of compartments – three rooms and corridor, fire source – gas burner



Rys. 3. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów położenia górnej gorącej warstwy w pomieszczeniu ze źródłem ognia [13]; układ – cztery pokoje z korytarzem, źródło ognia – palnik gazowy

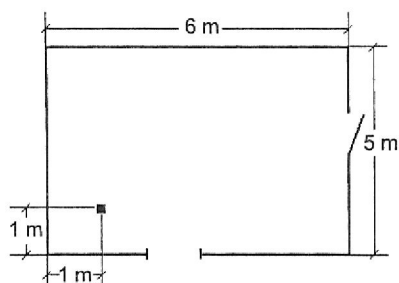
Fig. 3. Comparison of calculation values and measuring values of height of hot upper zone for fire compartment [13]; arrangement of compartments – four rooms and corridor, fire source – gas burner



6. Symulacja pożaru w pojedynczym pomieszczeniu

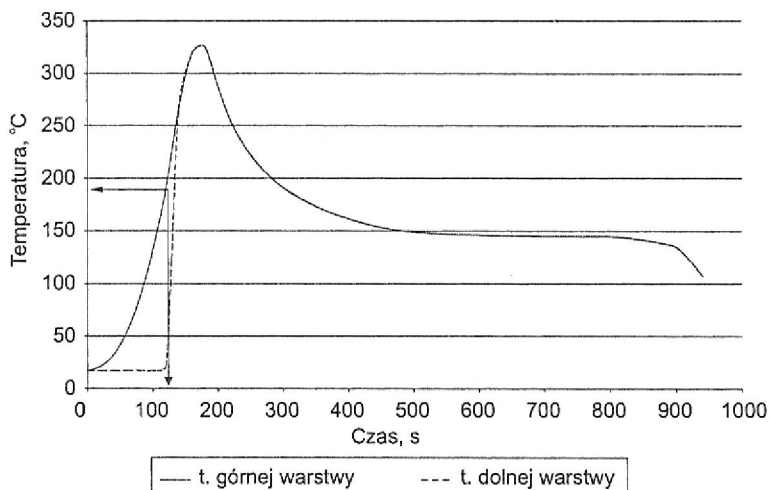
Założono, że pomieszczenie biurowe ma wymiary (6 × 5 × 3) m. Ściany i sufit są zbudowane z cegły pokrytej tynkiem gipsowym, podłoga – z materiału niepalnego. Pomieszczenie ma drzwi o szerokości 1 m i wysokości 1,98 m, źle dopasowane do ramy o wymiarach (1 × 2) m – nieuszczelności o wymiarach (1 × 0,01) m w górnej i dolnej części drzwi – oraz okno o wymiarach (1 × 1) m otwierane pionowo na szerokość 0,1 m. Płomień zapoczątkowuje szybki wzrost pożaru w rogu pomieszczenia (rys. 4.). Założono, że szybkość wydzielania ciepła (*Heat Release Rate* – HRR) podczas spalania mebla (krzesło wyścielane) osiąga wartość 1 MW po 150 s od momentu zapłonu, a następnie

po 800 s maleje do zera. Emisje gazowych produktów spalania i cząstek dymu przyjęto zgodnie z normą [3].

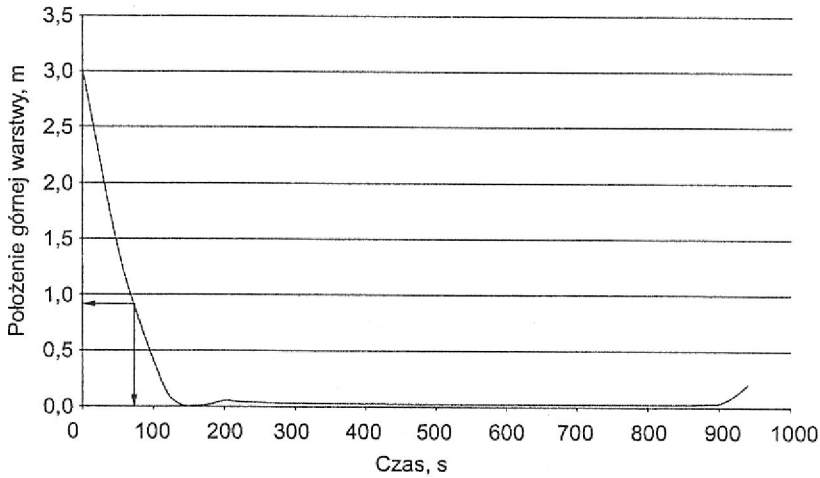


Rys. 4. Pojedyncze pomieszczenie (kwadratem oznaczono miejsce powstania pożaru)
 Fig. 4. Single compartment (black square – place of initiation of a fire)

Na rysunku 5 przedstawiono wykres temperatury górnej i dolnej warstwy w pomieszczeniu objętym pożarem. Wartość warstwy dolnej nie zmienia się do 120 s pożaru, a następnie w ułamku sekundy rośnie bardzo szybko. Jest to spowodowane osiągnięciem w 120 s przez górną warstwę dymu położenia poziomu podłogi, co pokazano na rysunku 6. Maksymalną wartość 33 °C osiąga temperatura w 160 s trwania pożaru. Obniżenie górnej warstwy dymu w 120 s pożaru do poziomu podłogi powoduje pogorszenie się widzialności i utrudnia prowadzenie ewakuacji. Do końca trwania pożaru warstwa ta pozostaje w tym samym miejscu.

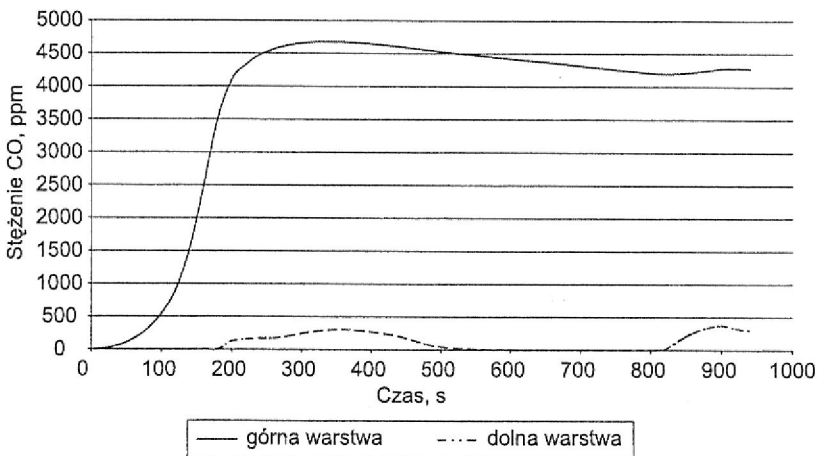


Rys. 5. Wykres temperatury górnej gorącej warstwy i dolnej chłodnej warstwy w pomieszczeniu; strzałki wskazują sposób określania możliwego czasu ewakuacji
 Fig. 5. Temperature of hot upper zone and cool lower zone in fire compartment. Arrows show method of estimation of time of ASET



Rys. 6. Położenie górnej warstwy gorących gazów w pomieszczeniu
 Fig. 6. Height of hot upper zone in fire compartment

Wartość krytyczna temperatury górnej warstwy $T_{kr} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (miejsce na osi rzędnych oznaczone strzałką) jest osiągana po 115 s (miejsce na osi rzędnych oznaczone strzałką) – rysunek 5. Wartość krytyczna położenia górnej warstwy gorących gazów nad podłogą pomieszczenia $z_{kr} = 0,9\text{ m}$ osiągana jest po czasie 73 s (rys. 6).



Rys. 7. Stężenie CO w górnej i dolnej warstwie dymu
 Fig. 7. Concentration of CO in upper and lower zones of smoke

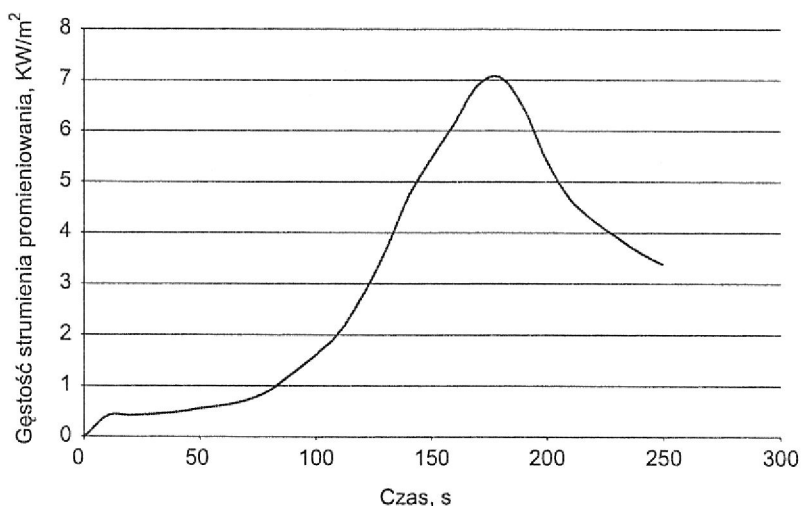
Od chwili zainicjowania spalania stężenie CO rośnie bardzo szybko (rys. 7). W 120 s pożaru, czyli w momencie gdy górna warstwa znajduje się na wysokości podłogi, stężenie CO wynosi 1000 ppm, co może wywoływać silny ból głowy, duszności, wymioty,

osłabienie. Do tego czasu osoby znajdujące się w pomieszczeniu mają szansę ucieczki. W 300 s stężenie CO osiąga maksimum, wynoszące 4700 ppm, co po 2 min oddziaływania na człowieka może powodować zatrzymanie oddechu i zgon.

Stężenie O_2 w górnej warstwie zaczyna maleć tuż po zainicjowaniu spalania. W 120 s pożaru, gdy górna warstwa osiąga poziom podłogi, stężenie O_2 wynosi 16% – biorąc [pod uwagę zagrożenie ludzi, jest to jeszcze wartość bezpieczna. Po 180 s stężenie O_2 osiąga wartość 10%, co może wywoływać mdłości, wymioty, niemożność poruszania się oraz zanik świadomości.

Dwutlenek węgla nie jest gazem toksycznym przy stężeniu do 5%. Wartość ta zostaje przekroczona już w 160 s pożaru. W tym momencie górna, gorąca warstwa znajduje się już na poziomie podłogi. W 300 s stężenie CO_2 osiąga maksimum – 10% i utrzymuje się na tym poziomie do końca trwania pożaru.

Na rysunku 8 pokazano zmianę gęstości strumienia promieniowania cieplnego q'' od strefy spalania i warstwy gorących gazów w płaszczyźnie drzwi pomieszczenia w czasie trwania pożaru. Wartość krytyczna $q''_{kr} = 2,5 \text{ kW/m}^2$ jest osiągnięta po 17 s.

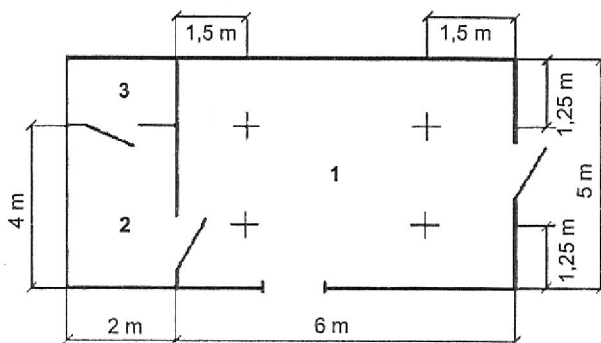


Rys. 8. Przebieg gęstości strumienia promieniowania cieplnego w drzwiach pomieszczenia
Fig. 8. Changes of heat radiation density measured in door of the compartment

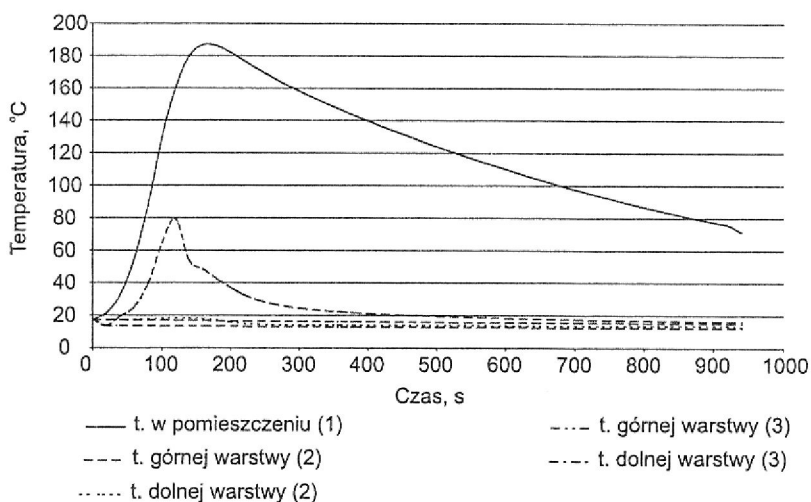
7. Symulacja pożaru w trzech pomieszczeniach

Układ pomieszczeń (rys. 9) składał się z pomieszczenia biurowego nr 1 (o wymiarach takich jak poprzednio), połączonego z pomieszczeniem nr 2 o wymiarach $(2 \times 4 \times 3)$ m, oraz toalety (pomieszczenie nr 3) wielkości $(2 \times 1 \times 3)$ m. Pomieszczenia nr 2 i 3 są połączone z biurem takimi samymi drzwiami, jak poprzednie (te same nieszczelności). Toaleta ma dodatkowo otwór wentylacyjny o powierzchni $0,02 \text{ m}^2$, $(0,1 \times 0,2)$ m, na wysokości 2,5 m nad podłogą. Ponadto w pomieszczeniu biurowym zainstalowano system tryskaczowy skła-

dający się z czterech standardowych tryskaczy o intensywności zraszania 5 l/min/m^2 , $RTI = 100 \text{ (m s)}^{0,5}$ i temperaturze zadziałania $68 \text{ }^\circ\text{C}$. Założono pożar o tym samym przebiegu HRR w funkcji czasu i miejscu powstania (pomieszczenie nr 1), jak w symulacji pierwszej.



Rys. 9. Układ trzech pomieszczeń z rozmieszczonymi tryskaczami w pomieszczeniu nr 1; miejsca zamocowania tryskaczy zaznaczono krzyżykami.
 Fig. 9. Arrangement of three compartments with sprinklers in compartment 1. Crosses show places of sprinklers



Rys. 10. Temperatura górnej i dolnej warstwy w pomieszczeniach 1, 2 i 3
 Fig. 10. Temperature of upper and lower zones in compartments 1, 2 and 3

Rysunek 10 przedstawia temperaturę górnej i dolnej warstwy w pomieszczeniu objętym pożarem (1) oraz w pomieszczeniach sąsiednich (2) i (3). Zmianom ulega jedynie temperatura górnych warstw w pomieszczeniu (1) oraz (2). Pozostałe wartości

temperatury nie ulegają zmianom. Po 180 s największa temperatura występuje w górnej warstwie w pomieszczeniu (1) i wynosi 190 °C. Potem następuje jej powolny i stały spadek, spowodowany zadziałaniem urządzenia tryskaczowego, które schładza gorącą, górną warstwę, dzięki czemu osiągnane temperatury są niższe niż otrzymane w symulacji pierwszej.

Strumień ciepłych gazów, jaki przedostaje się z pomieszczenia (1) do (2) przez nieszczelne drzwi, w 100 s pożaru powoduje wzrost temperatury górnej warstwy do 80 °C. Jest to jednak zjawisko krótkotrwałe i po tym czasie temperatura spada. Temperatura dolnej warstwy zmienia się tylko w pomieszczeniu (1) ze strefą spalania. Jednak wartości, jakie osiąga, rzędu od 30 °C do 35 °C, nie powinny utrudniać w większym stopniu ewakuacji ludzi i stwarzać zagrożenia ich życia i zdrowia.

Po upływie 125 s górna warstwa w pomieszczeniu (1) osiąga poziom podłogi, powodując pogorszenie widzialności. Wpływ tryskaczy na szybkość opadania warstwy dymu jest znikomy. Natomiast położenie tej warstwy w pomieszczeniu (2) zmienia się wolniej niż w pomieszczeniu (1) i po upływie 150 s osiąga swój najniższy poziom między 0,4 m a 0,5 m.

Wykonano ponadto obliczenia zmian stężeń O_2 , CO_2 i CO .

8. Podsumowanie

Zbadano wpływ poszczególnych warunków pożaru określonych przez parametry pożaru na możliwy czas ewakuacji. Wykonano symulacje środowiska pożaru przy założeniu danego scenariusza jego rozwoju w pojedynczym pomieszczeniu i w układzie trzech pomieszczeń.

Możliwy czas ewakuacji jest przedziałem czasowym pomiędzy czasem zapalenia a czasem, kiedy warunki środowiska osiągają wartości krytyczne (progowe), uniemożliwiając skuteczną ewakuację. Przyjęcie wartości krytycznych parametrów pożaru pozwala na określanie punktu krytycznego, tj. czasu, kiedy użytkownicy pomieszczeń budynku nie są w stanie działać efektywnie.

Tablica 1. Wpływ poszczególnych parametrów pożaru na możliwy czas ewakuacji
Table 1. Influence of fire parameters on ASET

Parametr pożaru	Pojedyncze pomieszczenie	Układ trzech pomieszczeń z tryskaczami (dane dot. pomieszczenia nr 1)
Temperatura górnej warstwy	115 s	140 s
Położenie górnej warstwy	73 s	75 s
Gęstość strumienia promieniowania cieplnego	117 s	–
Stężenie tlenu	150 s	250 s
Stężenie tlenku węgla	140 s	180 s
Stężenie dwutlenku węgla	200 s	600 s

W tablicy 1 podano wyniki analizy czasu osiągnięcia założonych krytycznych wartości parametrów pożaru w pomieszczeniu ze źródłem ognia oraz w takim samym pomieszczeniu (z tryskaczami) w układzie trzech pomieszczeń. W obu przypadkach największe zagrożenie jest związane z obniżaniem się górnej warstwy dymu. Możliwy czas ewakuacji wynosi odpowiednio 73 s i 75 s. Inne parametry pożaru osiągają wartości krytyczne po dłuższym okresie. Działanie tryskaczy powoduje znaczne (szczególnie w przypadku stężenia CO₂) wydłużenie czasu osiągnięcia stanu zagrożenia (z wyjątkiem położenia górnej gorącej warstwy dymu).

Bibliografia

- [1] Teodorczyk A.: Program komputerowy do obliczania dopuszczalnego czasu ewakuacji. BIT KGSP, 1, 1988, s. 41–53
- [2] Wolanin J. i in.: Matematyczno-komputerowy model kryminalistycznych badań przyczyn i okoliczności pożarów. MSW, Warszawa 1989
- [3] ISO/TS 13571. Life – Threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data
- [4] Jin T.: Visibility through fire smoke. *Journal of Fire and Flammability*, 9, 1978, s.135–155
- [5] Friedman R.: An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*, 4, 1992, 81–92
- [6] Dinunno P. J.: The Future of Fire Modeling, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. NFPA, Massachusetts 1992
- [7] Pofit-Szczepańska M.: Teoretyczna i literaturowa analiza modeli rozwoju pożarów w pomieszczeniach. Praca badawcza ITB, CPBR 6.4.26.1.3, 1989, maszyn., biblioteka ITB
- [8] Kolbrecki A., Konecki M.: Zagrożenie ludzi dymem i toksycznymi produktami spalania w pożarach budynków. Praca badawcza ITB, CPBR 6.4. 29.1.4, 1988–1990, maszyn., biblioteka ITB
- [9] Piórczyński W.: Badanie parametrów pożaru z uwzględnieniem własności materiałów palnych i mechanizmu procesu spalania. Rozprawa doktorska. SGSP, Warszawa 1997
- [10] Fangrat J.: Rozwój pożaru w pomieszczeniu. Rozprzestrzenianie płomienia przez okładziny ścienne i sufitowe. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria: Inżynieria Łądowa, 71, Kraków 2001, s. 1–105
- [11] Konecki M.: Problemy modelowania rozwoju pożaru w pomieszczeniu. Archiwum Spalania, vol. 2, nr 1, 2002, s. 67–91
- [12] Nelson H. E.: Application of Fire Growth Models to Fire Protection Problems, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. NFPA, Massachusetts 1992
- [13] Peacock R. D., Forney G. P., Reneke P., Portier R., Jones W. W.: CFAST, the consolidated model of fire growth and smoke transport, NIST Technical Note 4985/1997
- [14] Jones W. W., Peacock R. D.: Technical reference guide for FAST Version 18. Nat. Inst. Stand. Tech., Note 1262, 1989
- [15] Forney G. P., Cooper L. Y.: The consolidated compartment fire model (CCFM) computer application CCFM.VENTS. Nat. Inst. Stand. Tech., Note 90–4343, 1990

ESTIMATION OF AVAILABLE SAFE EGRESS TIME FROM COMPARTMENTS AS A FUNCTION OF FIRE CRITICAL PARAMETERS

Summary

For all spaces in building, the time taken to evacuate the space (required time for evacuation) must be less than the time for the environment in that space to become life threatening (Available Safe Egress Time - ASET). That time is the time when certain tenability limits are exceeded. Tenability criteria will generally be concerned with the following phenomena: convective heat, radiant heat, visibility through a smoke layer (or smoke obscuration), concentration of narcotic and irritant gases. One of computer-based methods for assessing in evacuation calculation is CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport). This paper is initial: shows calculations for one- and multi-compartments objects when fire parameters act independently of each other.

Praca wpłynęła do Redakcji 16 IV 2004