

Jadwiga Fangrat*

ANALIZA PROCESU ROZPRZESTRZENIANIA PŁOMIENIA PO POWIERZCHNI OKŁADZIN ŚCIENNYCH I SUFITOWYCH

Przedstawiono studium literatury na temat teoretycznej analizy procesu rozprzestrzeniania płomienia oraz modelu rozwoju pożaru w układzie Room Corner (ISO 9705). Przykładowe obliczenia wykonano wykorzystując dostępne wyniki badań grupy 15 materiałów okładzinowych z ich graficzną interpretacją. Pomimo prostoty przyjętego modelu uzyskano pewną zgodność wyników doświadczalnych i teoretycznych.

1. Wprowadzenie

Zapalenie palnego materiału i następujące po nim rozprzestrzenianie płomienia to najważniejsze zjawiska wpływające na szybkość wydzielania ciepła, a w konsekwencji na rozwój pożaru w pomieszczeniu. Dotychczas opracowano kilka teorii rozprzestrzeniania płomieni, przy czym większość z nich ma znaczenie raczej jakościowe niż ilościowe. Ogólnie można je podzielić na dwie grupy:

- teorie chemiczne, tzn. takie, w których rozprzestrzenianie płomienia rozpatruje się stosując równania kinetyki chemicznej, gdzie strumienie ciepła i temperatura płomienia są poszukiwanymi wielkościami zależnymi,
- teorie cieplne, zgodnie z którymi strumień ciepła i temperatura płomienia są wielkościami danymi, tzn. pomija się kinetykę chemiczną, a rozpatruje jedynie równania zachowania energii.

W połowie lat siedemdziesiątych F. Williams [1] pierwszy dokonał spójnej analizy procesu rozprzestrzeniania płomienia i sformułował tzw. podstawowe równanie rozprzestrzeniania płomienia. Równanie to wyraża, że ciepło przenoszone do świeżego paliwa ogrzewa to paliwo od temperatury otoczenia T_0 do pewnej temperatury krytycznej T_{ig} powodując zmianę jego entalpii:

$$\rho V \Delta H = \dot{q}'' \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość materiału palnego (paliwa), kg/m^3 ,
 V – prędkość rozprzestrzeniania płomienia, m/s ,
 ΔH – zmiana entalpii jednostki masy świeżego paliwa przy zmianie temperatury od T_0 do T_{ig} ($T_{ig} > T_0$), kJ/kg ,

* dr inż. – adiunkt w ITB

\dot{q}'' – strumień ciepły dostarczony do świeżego paliwa, niezbędny do podniesienia jego temperatury od T_0 do T_{ig} .

Temperatura T_{ig} , zwana temperaturą zapalenia, jest pewną temperaturą krytyczną, w której ciało stałe wydziela gazy palne w ilości wystarczającej do podtrzymania w fazie gazowej procesu spalania, czyli zapalenia od zewnętrznego źródła. Zwykle znana jest gęstość paliwa, a zakładając, że jego ciepło właściwe c jest wielkością stałą, wzrost entalpii jest przedstawiony jako:

$$\Delta H = c (T_{ig} - T_0) \quad (2)$$

Williams przedyskutował wpływ geometrii paliwa, kierunku rozprzestrzeniania płomienia oraz wielkości podane w równaniu (1); określił też, który sposób przenoszenia ciepła do nie spalonego paliwa ma największy wpływ na \dot{q}'' .

Wyróżniono trzy podstawowe mechanizmy przenoszenia ciepła z płomienia do nie spalonego paliwa (przed frontem płomienia): konwekcję i promieniowanie (w fazie gazowej) oraz przewodzenie (w fazie stałej). W przypadku ogólnym wszystkie mechanizmy występują w procesie rozprzestrzeniania płomienia, ale w różnym zakresie. Dlatego trudno byłoby sformułować i rozwiązać w sposób analityczny ogólne równanie rozprzestrzeniania płomienia. Jeśli jednak – jak uczynił to Williams – uwzględnić się tylko jeden najważniejszy mechanizm, wówczas przybliżone równania rozprzestrzeniania płomienia udało się stosunkowo łatwo sformułować i rozwiązać, wychodząc z równania (1).

Usytuowanie warstwy materiału palnego (paliwa) i warunki przepływu w sposób istotny określają dominujący mechanizm przenoszenia ciepła. Przykładowo, pionowo usytuowana próbka ze źródłem zapalenia u wierzchołka będzie stanowiła przypadek rozprzestrzeniania płomienia przeciwnie do kierunku przepływu konwekcyjnego. Prędkość rozprzestrzeniania płomienia zależy również od tego, czy warstwa paliwa jest „termicznie cienka”, czy „termicznie gruba”. W przypadku paliw „termicznie cienkich” zakłada się, że temperatura jest jednorodna wzdłuż grubości warstwy paliwa, co prowadzi do następującego równania zachowania energii:

$$\rho c \delta (T_{ig} - T_0) \mathbf{V} = \dot{q}'' \Delta \quad (3)$$

Zakłada się przy tym, że nie występują straty ciepła do podłoża oraz że strumień promieniowania \dot{q}'' jest stały na długości Δ . Podobne wyrażenia uzyskuje się w przypadku materiałów „termicznie grubych”, stosując teorię przewodzenia ciepła i zastępując fizyczną grubość warstwy materiału teoretyczną wielkością zwaną głębokością podgrzania.

Ponieważ w badaniach ogniowych wykonywanych w celu oceny materiału ze względu na bezpieczeństwo pożarowe budynków występuje w zasadzie z drugi przypadek, w niniejszej pracy ograniczono się do omówienia zagadnień związanych z rozprzestrzenianiem płomieni po powierzchni materiałów, które mogą być traktowane jako „termicznie grube” przynajmniej przez określony przedział czasu. Poniżej omówiono zastosowanie równania (3) w modelowaniu rozprzestrzeniania płomienia po powierzchni materiału „termicznie grubego” zgodnie z przepływem konwekcyjnym.

2. Rozprzestrzenianie płomienia w kierunku przeciwnym do przepływu konwekcyjnego

Zasadnicze założenia teorii rozprzestrzeniania płomienia po powierzchni poziomej warstwy materiału „termicznie grubego” w kierunku przeciwnym do przepływu sformułował Quintiere w pracy [2]. Rozważa on płomień (rys. 1) rozprzestrzeniający się z prędkością V w kierunku przeciwnym do strumienia konwekcyjnego o prędkości V_g wytworzonego nad powierzchnią warstwy paliwa stałego (np. palnej okładziny). W wyniku oddziaływania strumienia konwekcyjnego na czoło płomienia, tuż nad powierzchnią materiału tworzy się powietrzna warstwa gasząca o grubości zależnej od prędkości przepływu. W skrajnym przypadku może nastąpić oderwanie płomienia od powierzchni warstwy i zgaśnięcie (inaczej zdmuchnięcie płomienia). Na odcinku o długości Δ , zwanym również długością podgrzania, zachodzi ogrzanie powierzchni paliwa usytuowanej przed czołem płomienia od temperatury początkowej T_0 do charakterystycznej temperatury zapalenia T_{ig} . Płomień jest nachylony, zatem maleje współczynnik „widzenia” (inaczej konfiguracji) między płomieniem a nie spalonym materiałem przed frontem płomienia, w wyniku czego promieniowanie ciepłe z płomienia może być zaniedbane.

Zasadniczym sposobem przenoszenia ciepła w tym przypadku jest konwekcja na krótkim odcinku Δ w pobliżu strefy pirolizy. Konwekcyjny strumień ciepła \dot{q}''_{gc} jest z założenia stały na odcinku Δ (stanowiącym szerokość elementu kontrolnego), a poza nim ma wartość zero.

Jak wspomniano wcześniej – w przypadku materiału „termicznie grubego” – stosując teorię przewodzenia ciepła, zastępuje się fizyczną grubość warstwy materiału głębokością podgrzania δ , którą można wyrazić funkcją:

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c} t} \quad (4)$$

gdzie t – czas, w którym czoło płomienia przebywa odległość Δ .

$$t = \frac{\Delta}{V} \quad (5)$$

Podstawiając równania (4) i (5) do równania (3) otrzymuje się zależność:

$$V = \frac{(\dot{q}''_{gc})^2 \Delta}{\lambda \rho c (T_{ig} - T_0)^2} \quad (6)$$

z uwzględnieniem, że:

$$\dot{q}''_{gc} = \lambda_g \left(\frac{T_f - T_{ig}}{\Delta} \right) \quad (7)$$

gdzie T_f – temperatura płomienia (adiabaticzna stechiometryczna wartość).

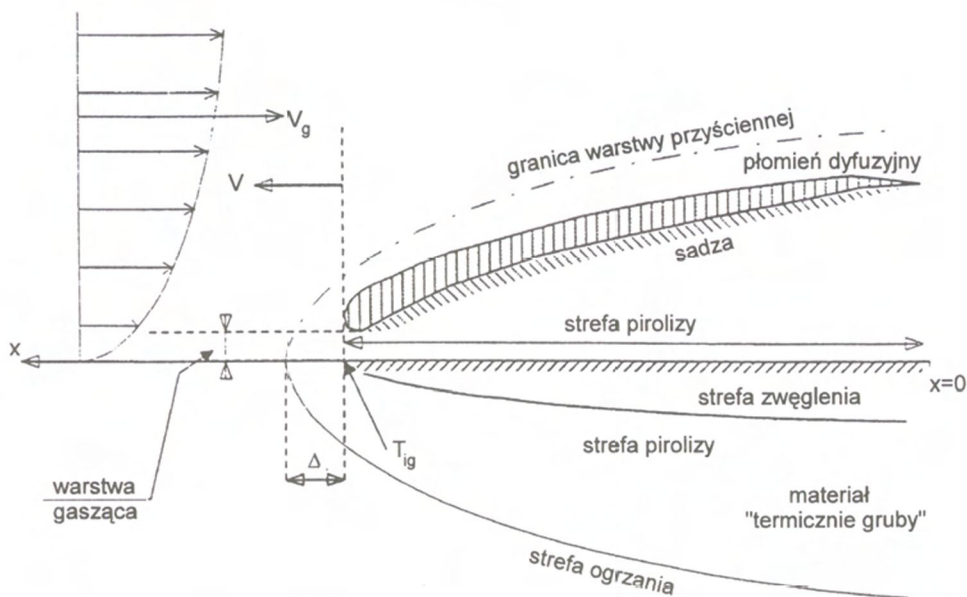
Długość podgrzania Δ wyznaczono, korzystając z zależności podanej przez Quintiere'a. Zakłada on, że w omawianym przypadku przepływ konwekcyjny gazu przed frontem

plamienia musi być zrównoważony przez przepływ konwekcyjny przeciwny do kierunku rozprzestrzeniania plamienia (V_g na rys. 1), tzn.:

$$\Delta \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g V_g} \quad (8)$$

Z równań (6), (7) i (8) otrzymujemy „teoretyczną” prędkość propagacji frontu plamienia w postaci równania:

$$V = \frac{V_g (\lambda \rho c)_g (T_f - T_{ig})^2}{\lambda \rho c (T_{ig} - T_0)^2} \quad (9)$$



Rys. 1. Uproszczony schemat rozprzestrzeniania plamienia po powierzchni materiału „termicznie grubego” w kierunku przeciwnym do przepływu: Δ – długość podgrzania, V_g – prędkość przepływu, V – prędkość rozprzestrzeniania plamienia, T_{ig} – temperatura zapalenia

Fig. 1. Simplified scheme of flame spread over „thermally thick” solid layer opposite to the flow: Δ – preheating distance, V_g – flow velocity, V – flame spread velocity, T_{ig} – ignition temperature

3. Rozprzestrzenianie plamienia w kierunku zgodnym z przepływem konwekcyjnym

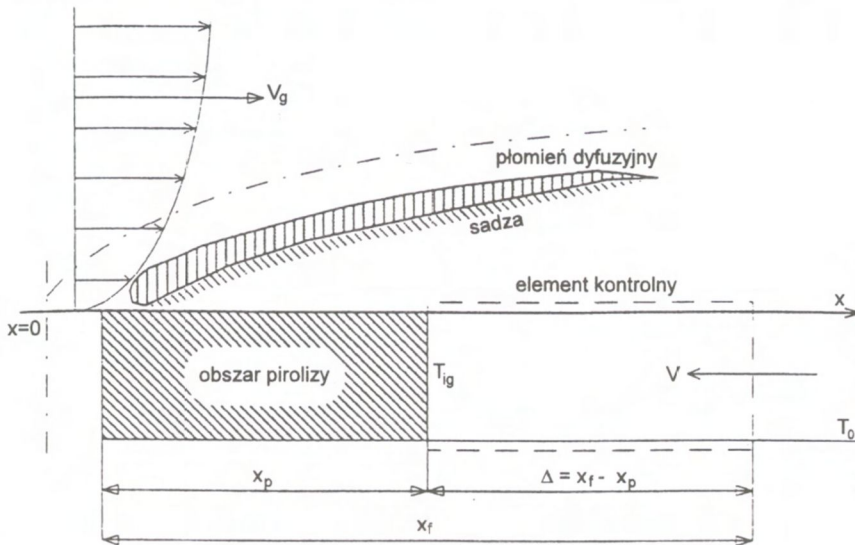
Rozważanie ograniczono tu do przypadku rozprzestrzeniania plamienia po warstwie palnego materiału, w obecności przepływu konwekcyjnego w kierunku propagacji plamienia (rys. 2). Układ współrzędnych związany jest z frontem pirolizy, a element kontrolny o szerokości Δ przylega do odcinka, na którym zachodzi piroliza materiału

warstwy. Warstwa paliwa przesuwa się z prędkością V równą prędkości rozprzestrzeniania płomienia. Zakłada się, że warstwa materiału palnego (paliwa) jest dostatecznie gruba, aby nie zachodziło całkowite wypalenie warstwy podczas rozprzestrzeniania płomienia (to znaczy nie zachodzi przepalenie warstwy).

Równanie zachowania energii dla takiego elementu kontrolnego doprowadza w efekcie do podobnych równań, jak w przypadku rozprzestrzeniania płomienia w kierunku przeciwnym do przepływu konwekcyjnego, ale przy innej interpretacji wielkości \dot{q}''_{gc} i Δ . Otrzymuje się ogólnie znane równanie [3], opisujące temperaturę zapalenia:

$$T_{ig} - T_0 = \frac{2 \dot{q}''_z}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\tau}{\lambda \rho c}} \quad (10)$$

gdzie τ – czas do zapalenia, przy założeniu, że temperatura zapalenia jest równa temperaturze pirolizy materiału warstwy.



Rys. 2. Uproszczony schemat propagacji płomienia zgodnej z kierunkiem przepływu konwekcyjnego nad powierzchnią warstwy materiału palnego
Fig. 2. Simplified scheme of flame spread over combustible solid layer in the flow direction

Uwzględniając, że:

$$\tau = \frac{x_f - x_p}{V}$$

otrzymuje się równanie podobne do (6):

$$V = \frac{4 \dot{q}''_z{}^2 (x_f - x_p)}{\pi \lambda \rho c (T_{ig} - T_0)^2} \quad (11)$$

Saito, Quintiere i Williams [4] przedstawili teorię cieplną rozprzestrzeniania płomienia w kierunku zgodnym z przepływem wzdłuż warstwy paliwa „termicznie grubego” (tzw. model SQW). W rezultacie problem sprowadza się do rozwiązania równania całkowego typu Volterry dla prędkości rozprzestrzeniania płomienia. Zgodnie z rozwiązaniem podanym przez tych autorów równanie (11) można przedstawić w postaci:

$$V(t) = \frac{x_f - x_p}{\tau} = \frac{dx_p}{dt} \quad (12)$$

gdzie:

$$\tau = \frac{\pi \lambda \rho c (T_{ig} - T_0)^2}{4 \dot{q}_z''^2} \quad (13)$$

Jak wynika z powyższego równania, czas do zapalenia zależy od właściwości materiału, temperatury otoczenia oraz strumienia promieniowania cieplnego z płomienia do podłoża, przy czym założono, że czas t jest stały, natomiast zmienna jest różnica $x_f - x_p$. Aby wyprowadzić równanie dla V , należy znaleźć x_f i x_p . W modelu SQW przedstawiono rozwiązanie równania całkowego dla krótkich i długich przedziałów czasu. Thomas i Karlsson [5] otrzymali ogólne analityczne rozwiązanie (wzór 14) i oszacowali je dla różnych warunków, przy następujących założeniach:

1. Materiał jest „termicznie gruby”, jednorodny, a jego właściwości cieplne nie ulegają zmianie wraz ze zmianą temperatury.
2. Nie rozważa się kinetyki chemicznej, zatem przypadki skrajne (bardzo szybkie lub bardzo wolne) rozprzestrzeniania płomienia nie są w pełni wyrażone warunkami gaśnięcia i dlatego mogą być oszacowane jedynie w przybliżeniu.
3. Długość płomienia x_f zależy od szybkości wydzielania ciepła (\dot{Q}).
4. Strumień cieplny z płomienia jest stały na odcinku $x_p < x < x_f$

$$V(t) = \frac{1}{\tau} \left[K \left(\dot{Q}_b + x_{p0} w \dot{Q}''(t) + \int_0^t w \dot{Q}''(t - t_p) V(t_p) dt_p \right)^n + \left(x_{p0} + \int_0^t V(t_p) dt_p \right) \right] \quad (14)$$

Jest to równanie całkowe drugiego rodzaju typu Volterry, opisujące prędkość rozprzestrzeniania płomienia w układzie Room Corner. Dwie składowe po prawej stronie równania wyrażają kolejno: x_f i x_p , t_p jest stałą całkowania, K i n – doświadczalnie określonymi współczynnikami wysokości płomienia, \dot{Q}_b jest mocą palnika, w – stałą z założenia szerokością frontu płomienia (równą szerokości palnika), a $\dot{Q}''(t)$ jest szybkością wydzielania ciepła przez jednostkę powierzchni materiału w czasie równym t .

4. Rozwiązanie analityczne równania rozprzestrzeniania płomienia w kierunku przepływu (analityczny model Karlssona)

Równanie (14) może być rozwiązane analitycznie [5] lub numerycznie [6]. Rozwiązanie analityczne wymaga wprowadzenia następujących dodatkowych założeń:

1. Powierzchnia materiału przed frontem płomienia nie nagrzewa się ani od płomienia, ani od gorącej warstwy gazów pod sufitem, tzn. jej temperatura równa się T_0 . Oznacza to, że czas do zapalenia τ jest stały.

2. Czoło płomienia przesuwają się tylko w jednym kierunku, tzn. szerokość strefy spalania jest stała. Podobne równanie można sformułować wyrażając prędkość rozprzestrzeniania płomienia w funkcji pola powierzchni objętej procesem spalania, co pozwala na obliczenie prędkości rozprzestrzeniania płomienia w strefie podsufitowej, gdzie szerokość strefy spalania nie jest stała.

3. Szybkość wydzielania ciepła z palącego się materiału może być wyrażona matematycznie funkcją: $\dot{Q}''_{\max} e^{-zt}$, podaną po raz pierwszy przez Wickströma i Goranssona [7], [8], gdzie \dot{Q}''_{\max} jest wartością maksymalną (tzw. pierwszym pikiem) szybkości wydzielania ciepła zmierzoną w kalorymetrze stożkowym [9], a z – bezwymiarowym współczynnikiem korelacji, zwanym też stałą zanikania (rys. 3). Możliwe są również inne sposoby opisanie szybkości wydzielania ciepła.

4. Długość płomienia jest liniową funkcją szybkości wydzielania ciepła i może być wyrażona równaniem: $x_f = K \dot{Q}_c$, gdzie K jest stałą wyrażoną w m/kW, a \dot{Q}_c – całkowitą szybkością wydzielania ciepła (kW); wówczas współczynnik n osiąga wartość $n = 1$.

5. Początkowa długość strefy pirolizy x_{p0} zależy od mocy palnika \dot{Q}_b , która jest stała z założenia.

Przy tych założeniach równanie (14) ma postać:

$$V(t) = \frac{1}{\tau} \left[K \left(\dot{Q}_b + x_{p0} w \dot{Q}''_{\max} e^{-zt} + \int_0^t w \dot{Q}''_{\max} e^{-z(t-t_p)} V(t_p) dt_p \right) \right] - \frac{1}{\tau} \left(x_{p0} + \int_0^t V(t_p) dt_p \right) \quad (15)$$

Pierwsze wyrażenie po prawej stronie równania jest długością płomienia x_f , a jego przekształceniem Laplace'a jest:

$$\bar{x}_f(s) = K \left(\frac{\dot{Q}_b}{s} + \frac{x_{p0} w \dot{Q}''_{\max}}{s+z} + \frac{w \dot{Q}''_{\max}}{s+z} \bar{V}(s) \right) \quad (16)$$

gdzie $\bar{V}(s)$ i $\bar{x}_f(s)$ są transformacjami Laplace'a odpowiednio dla $V(s)$ i $x_f(t)$, a s – operatorem transformacji Laplace'a. Drugie wyrażenie po prawej stronie tego równania (15) jest długością strefy pirolizy x_p , a jego transformacja Laplace'a ma postać:

$$\bar{x}_p(s) = \frac{x_{p0}}{s} + \frac{\bar{V}(s)}{s} \quad (17)$$

co w wyniku daje równanie:

$$\bar{V}(s) \tau = K \left(\frac{\dot{Q}_b}{s} + \frac{x_{p0} w \dot{Q}_{\max}''}{s+z} + \frac{w \dot{Q}_{\max}''}{s+z} \bar{V}(s) \right) - \left(\frac{x_{p0}}{s} + \frac{\bar{V}(s)}{s} \right) \quad (18)$$

Stąd, podstawiając $x_{p0} = K \dot{Q}_b$, po przekształceniu otrzymuje się wzór:

$$\bar{V}(s) = \frac{1}{\tau} \frac{s K \dot{Q}_{\max}'' x_{p0} w}{s^2 + s \frac{1}{\tau} \left(1 - K \dot{Q}_{\max}'' + z \tau \right) + \frac{z}{\tau}} \quad (19)$$

W celu uproszczenia zapisu wprowadza się oznaczenia:

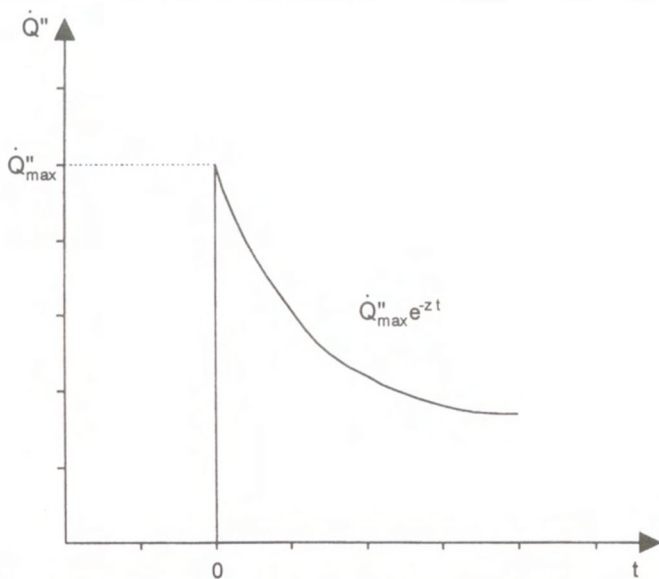
$$a = K \dot{Q}_{\max}''$$

$$c_1 = \frac{K \dot{Q}_{\max}'' x_{p0} w}{\tau}$$

Wzór (15) przyjmuje postać:

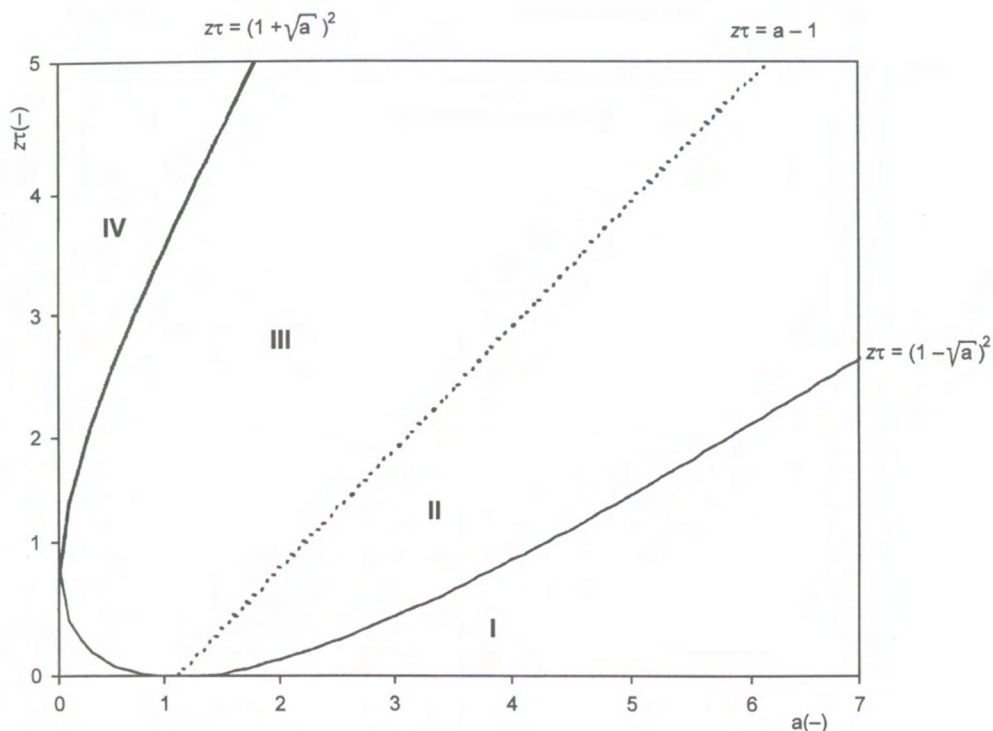
$$V(t) = \frac{c_1}{s_2 - s_1} \left(s_2 e^{s_2 t} - s_1 e^{s_1 t} \right) \quad (20)$$

gdzie s_1 i s_2 są rzeczywistymi pierwiastkami równania kwadratowego w mianowniku równania (19).



Rys. 3. Graficzna interpretacja szybkości wydzielania ciepła w kalorymetrze stożkowym zastosowana w modelu Karlssona (tzw. pierwszy pik)

Fig. 3. Graphical interpretation of the heat release rate measured in Cone Calorimeter as applied in Karlsson analytical model (so called first pik)



Rys. 4. Charakterystyczne obszary propagacji płomienia
 Fig. 4. Characteristic zones of flame propagation

Warunkiem przyrostu prędkości płomienia jest dodatnia wartość jednego lub obu pierwiastków s_1 i s_2 . Kiedy wyznacznik równania kwadratowego ma wartość ujemną, czyli:

$$(1 - \sqrt{a})^2 < z\tau < (1 + \sqrt{a})^2 \quad (21)$$

rzeczywiste rozwiązania równania otrzymuje się wprowadzając liczby urojone. Współczynniki $e^{s_1 t}$ i $e^{s_2 t}$ stają się funkcjami trygonometrycznymi.

Rozwiązanie analityczne odnosi się jedynie do dodatnich wartości prędkości (rozprzestrzenianie zgodne z przepływem), przy założeniu, że płomień ma zawsze dodatnią wysokość. Thomas i Karlsson określili graniczne warunki propagacji płomienia w kierunku zgodnym z przepływem, wyrażając prędkość w funkcji długości płomienia, jak w modelu SQW. Na tej podstawie Baroudi i Kokkala [10] dokonali graficznej interpretacji granic propagacji płomienia w funkcji t , z i a (rys. 4), która umożliwiła szybką ocenę zachowania się rozwiązania równania (19) przy różnych wartościach parametrów $a = K Q''_{\max}$ i $z\tau$. W przypadku materiałów mieszczących się w obszarze I obserwujemy wykładnicze rozprzestrzenianie płomienia. W obszarach II i III

otrzymujemy rozwiązanie trygonometryczne i przez dłuższy czas prędkość oscyluje między wartością dodatnią i ujemną. W obszarze II, $V(t) \rightarrow \pm \infty$, jeżeli $t \rightarrow \infty$. Rozwiązania te mają znaczenie fizyczne jedynie do chwili, gdy prędkość po raz pierwszy osiąga wartość ujemną. W obszarze IV natomiast prędkość stale maleje.

5. Przykłady zastosowania modelu Karlssona

W tabelicy 1 podano zestawienie materiałów, na przykładzie których zostanie omówiona możliwość praktycznego zastosowania opisanego modelu analitycznego. Materiały te były badane metodami małej (ISO 5657 – metoda kalorymetru stożkowego [9]) oraz dużej skali geometrycznej (ISO 9705 – metoda Room Corner [11]), co zostało opublikowane w pracy [12]. Wyniki badania w kalorymetrze stożkowym zastosowano jako dane wejściowe do modelu obliczeniowego. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań w skali zbliżonej do naturalnej.

Tabela 1. Charakterystyka analizowanych materiałów
Table 1. Characteristics of analysed materials

Nr	Wyrób	Grubość mm ±10%	Gęstość kg/m ² ±10%
1	Sklejka liściasta	5,5	8,7
2	Izolacyjna płyta paździerzowa	10	2,7
3	Płyta gipsowo-kartonowa (20 mm) z warstwą isocyjanianu (9,5 mm)	29,5	7,4
4	Płyta gipsowo-kartonowa	9,5	6,2
5	Płyta gipsowo-kartonowa + tapeta PCW nr 1 (300 g/m ²)	9,5	6,5
6	Płyta gipsowo-kartonowa + tapeta PCW (500 g/m ²)	9,5	6,2
7	Płyta gipsowo-kartonowa + tapeta PCW nr 2 (300 g/m ²)	9,5	6,2
8	Płyta gipsowo-kartonowa + tapeta włókiennicza (Rayon 700 g/m ²)	9,5	6,2
9	Płyta gipsowo-kartonowa + tapeta włókiennicza (Rayon 300 g/m ²)	9,5	6,2
10	Płyta gipsowo-kartonowa + farba emulsyjna	9,5	6,5
11	Płyta gipsowo-kartonowa + emalia akrylowa	9,5	6,5
12	Płyta gipsowo-kartonowa + powierzchniowa impregnacja akrylowa	9,5	6,2
13	Płyta gipsowo-kartonowa + powierzchniowa impregnacja ogniochronna	9,5	6,2
14	Płyta gipsowo-kartonowa + tapeta PCW z proszkiem aluminiowym (800 g/m ²)	9,5	7,0
15	Błacha stalowa (0,6 mm) + trudno zapalna pianka polietylenowa (4 mm)	4,6	4,7

Na podstawie równania (19) podzielono materiały na 4 grupy (tablica 3) odpowiadające czterem charakterystycznym obszarom propagacji płomienia (rys. 5): przyspieszenia – bezwzględnego (I) i warunkowego (II) – lub spowolnienia – bezwzględnego (IV) i warunkowego (III). W obszarze I są usytuowane materiały, które rozprzestrzeniają płomień z rosnącą wykładniczo prędkością, a wszystkie materiały z tej grupy przechodzą do rozgorzenia; materiały 2 i 3 zaliczają się do tej kategorii. Obszar II zawiera materiały początkowo rozprzestrzeniające płomień z rosnącą prędkością, która następnie maleje do zera w pewnym przedziale czasu – z badanej serii jest to tylko numer 14 – materiały w tej grupie mogą w pewnych warunkach przejść do rozgorzenia. Obszary III i IV reprezentują odpowiednio rozprzestrzenianie z malejącą prędkością od chwili początkowej (rys. 6) i brak rozprzestrzeniania. W obszarach tych nie zachodzi rozgorzenie; odpowiednie przykłady podano w tablicy 3, gdzie wytuszczoną czcionką zaznaczono materiały nie przechodzące do rozgorzenia w badaniach dużej skali według ISO 9705, a podkreślono przypadki przejścia do rozgorzenia po czasie dłuższym niż 10 min.

Tablica 2. Zestawienie wielkości zmierzonych i zastosowanych parametrów teoretycznych
Table 2. Summary of measured values and theoretical parameters used in analysis

Nr	t_{ig}^* [s]	$\dot{Q}_{max}''^*$ [kW/m ²]	z [s ⁻¹]	$z\tau$ [-]	a [-]
1	21	222	0,1378	4,92	3,33
2	7	218	0,0133	0,16	3,27
3	2	115	0,1171	0,05	3,27
4	37	76	0,141	8,87	1,14
5	12	95	0,0833	1,70	1,42
6	8	142	0,089	1,21	2,13
7	19	95	0,0392	1,27	1,42
8	37	135	0,4258	26,78	2,02
9	23	216	0,1785	6,98	3,24
10	56	215	0,4136	39,37	3,22
11	29	171	0,2609	12,86	2,56
12	41	240	0,5277	36,78	3,6
13	39	191	0,1447	9,59	2,86
14	9	111	0,0322	0,49	1,66
15	232	8	0,2473	97,53	0,12

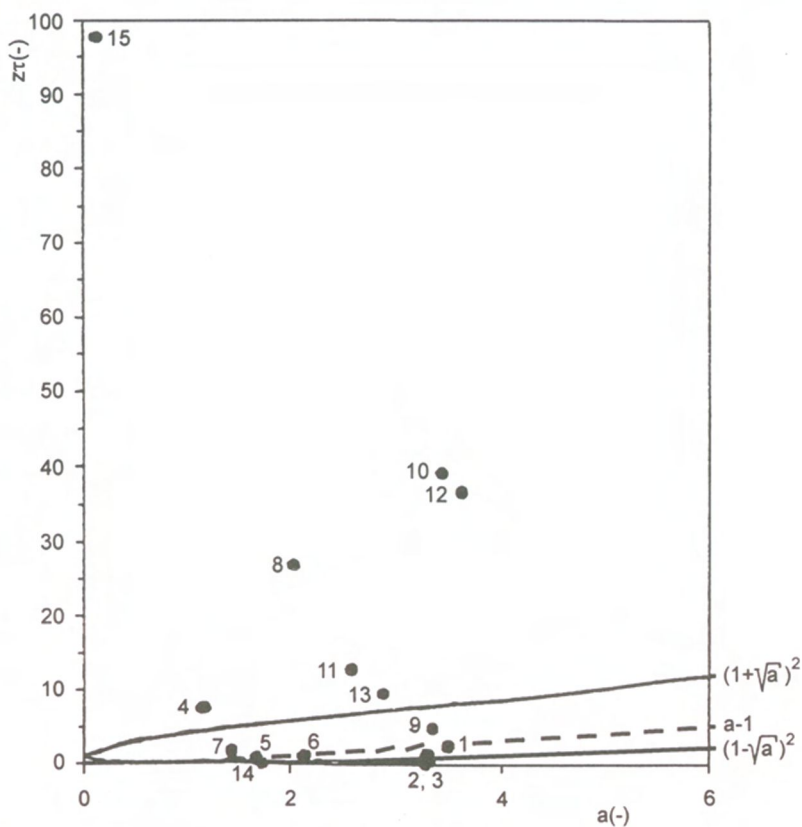
* Wielkości zmierzone w kalorymetrze stożkowym (CC) w zakresie promieniowania 50 (kW/m²). W tablicy podano wartości zmierzone tej z trzech badanych próbek, w której uzyskano największą maksymalną szybkość wydzielania ciepła (tzw. pierwszy pik).
 $K = 0,015 \text{ m}^2/\text{kW}$, t_{ig} – czas do zapalenia, $t = 1,7 t_{ig}$, $a = K \dot{Q}_{max}''$

Tablica 3. Wstępna kwalifikacja układu materiałów na podstawie modelu Karlssona (numeracja zgodna z tablicą 1)

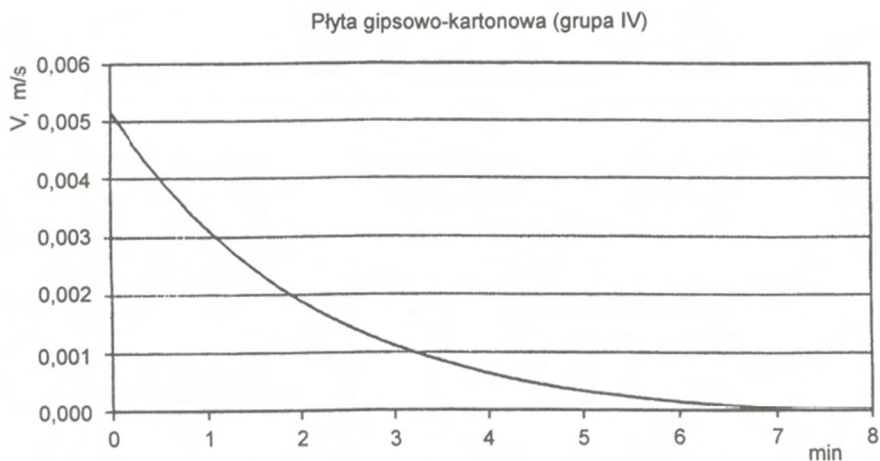
Table 3. Preliminary evaluation of set of materials on the basis of Karlsson model (numbering of materials according to the table 1)

Grupa	Materiał nr (por. tablica 1)	Grupa	Materiał nr (por. tablica 1)
I	2, 3	III	1, <u>5</u> , <u>6</u> , 7, 9
II	<u>14</u>	IV	4, 8, 10, 11, 12, 13, 15

Czcionką wytłuszczzoną oznaczono materiały, dla których nie nastąpiło rozgorzenie w badaniu Room Corner, podkreślono natomiast przypadki przejścia do rozgorzenia w czasie dłuższym niż 10 min.



Rys. 5. Graficzne porównanie wyników pomiarów i obliczeń z zastosowaniem analitycznego modelu Karlssona (numeracja materiałów zgodna z tablicą 1)
 Fig. 5. Graphical comparison of measurements et calculation results by means of Karlsson analytical model (numbering of materials according to the table 1)



Rys. 6. Przykładowe profile teoretycznej prędkości rozprzestrzeniania płomienia otrzymane przy zastosowaniu analitycznego modelu Karlssona

Fig. 6. Exemplary profiles of theoretical flame spread rate obtained by means of Karlsson analytical model

Podsumowanie

Pożar w pomieszczeniu, w którym palne okładziny ścienne i sufitowe są podstawowym źródłem paliwa, może rozwinąć się w różnorodnych warunkach, zależnych od geometrii układu oraz typu, mocy cieplnej i rozmieszczenia źródła zapalenia. Bez względu na geometrię układu zasadniczym elementem rozwoju pożaru jest w tych warunkach

rozprzestrzenianie się turbulentnego dyfuzyjnego płomienia. W początkowej fazie płomień ten przyczynia się do wstępnego ogrzania znajdujących się w pobliżu palnych okładzin i wykładzin oraz utworzenia gorącej warstwy podsufitowej stanowiącej mieszaninę powietrza i lotnych produktów rozkładu termicznego materiałów usytuowanych w pobliżu źródła ognia. Jeżeli płomień jest dostatecznie wysoki, może nastąpić bezpośrednio zapalenie okładziny na suficie pomieszczenia, a nawet zniszczenie jego konstrukcji. Natomiast typowym procesem wpływającym na przejście lokalnego pożaru do pożaru rozwiniętego jest rozprzestrzenianie płomienia w kierunku przeciwnym do przepływu konwekcyjnego po powierzchni palnych materiałów usytuowanych na ścianach, suficie lub innych przegrodach pochylonych. Płomień wydostający się przez otwory na przykład drzwiowe lub okienne może być przyczyną przeniesienia pożaru do sąsiednich pomieszczeń, górnych kondygnacji, a nawet sąsiednich budynków.

Przedmiotem przykładów rozważanych w niniejszej pracy było pomieszczenie średniej wielkości, w którego narożniku przeciwnym do otworu drzwiowego umieszczono palnik gazowy o stosunkowo dużej mocy cieplnej. Modelowanie rozwoju pożaru w takim układzie wymaga rozwiązania równania rozprzestrzeniania płomienia z uwzględnieniem procesów wymiany ciepła, dynamiki płynów i spalania. Wyniki analizy teoretycznej przeprowadzonej za pomocą opisanego w artykule analitycznego modelu Karlssona, której poddano grupę piętnastu okładzin ściennych i sufitowych, porównano z danymi z literatury [12] – wynikami doświadczalnymi uzyskanymi w układzie Room Corner – dotychczasymi tych materiałów. Wykazano, że analityczny model Karlssona w połączeniu z charakterystycznymi wielkościami pożarowymi materiału wyznaczonymi w badaniach małej skali może być zastosowany do wstępnej oceny układu ze względu na rozprzestrzenianie płomienia, ale praktyczne znaczenie takiej oceny jest ograniczone. Z większą dokładnością problem może być rozwiązany przy założeniu bardziej złożonego modelu (na przykład strefowego [3]).

Praca częściowo finansowana w ramach projektu badawczego KBN 7 T07 E 01314.

Bibliografia

- [1] Williams, F.A.: Mechanism of fire spread. XVI Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg 1977, s. 1281–1294
- [2] Quintiere J.: A simplified theory for generalizing results from a radiant panel rate of flame spread apparatus. *Fire and Materials*, t. 5, nr 2, 1981, s. 52–60
- [3] Cox G. (ed.): Combustion fundamentals of fire. Academic Press, 1995, s. 40
- [4] Saito K., Quintiere J.G., Williams F.A.: Upward turbulent flame spread. Proc. First Int. Symposium on Fire Safety Science, Hemisphere Publishing Corporation, New York 1984, s. 75–86
- [5] Karlsson B.: A mathematical model for calculating heat release rate in the room corner test. *Fire Safety Journal*, 20, 1993, s. 93–113
- [6] Karlsson B.: Models for calculating flame spread on wall lining materials and the resulting heat release rate in a room. *Fire Safety Journal*, 23, 1994, s. 365–386

- [7] Wickström U., Goransson. U. : Prediction of heat release rates of surface materials in large-scale fire tests based on cone calorimeter results. *Journal of fire testing and Evaluation*, t. 15, nr 6 (Nov) 1987, s. 364–370
- [8] Wickström U., Goransson. U.: Flame spread predictions in the room/corner test based on the cone calorimeter, Interflam '90
- [9] ISO 5660:1990 Fire tests – Reaction to fire – Rate of heat release from building products. International Organization for Standardization, Genewa
- [10] Baroudi D., Kokkala M.: Analysis of upward flame spread, VTT publications 89, Espoo, Finlandia, 1992
- [11] ISO 9705:1993 Fire tests – Full scale room test for surface products. International Organization for Standardization, Genewa, 1993
- [12] Yoshida M., Hasemi Y., Tanaike Y., Tasaka S., Saito F., Fangrat J. : Comparative studies in the reduced-scale model box and room corner test. Proceedings INTERFLAM '99, Interscience Communications, Londyn 1999, t. 1, s. 23–34

ANALYSIS OF FLAME SPREAD OVER WALL AND CEILING COVERINGS

Summary

The analysis of flame spread process and analytical model to predict fire growth in Room Corner test (ISO 9705) are presented. The exemplary 15 lining materials are considered. Results are presented both in direct and graphical mode. Despite simplicity of the model, acceptable correlation with the experimental data is obtained.

Praca wpłynęła do Redakcji 21 VIII 2001