

# **PRZEBIEG POŻARU OBLICZENIOWEGO, KONTROLOWANEGO PRZEZ WENTYLACJĘ, OKREŚLONEGO NA PODSTAWIE PARAMETRYCZNYCH KRZYWYCH TEMPERATURA-CZAS**

Marian ABRAMOWICZ<sup>\*\*</sup>, Robert KOWALSKI<sup>\*</sup>, Paweł WRÓBEL<sup>\*\*</sup>

<sup>\*\*</sup> Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej

<sup>\*</sup> Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Warszawska

## **1. Wprowadzenie**

Wśród wymagań stawianych obiektom budowlanym [1, 2] bardzo istotną rolę odgrywa zapewnienie bezpieczeństwa pożarowego. W praktyce najczęściej sprowadza się to do spełnienia wymagań przepisów [3]. Bardziej dokładną ocenę można uzyskać po rozpatrzeniu pożaru jako wyjątkowej sytuacji obliczeniowej [4, 5, 6]. Z punktu widzenia projektowania konstrukcji na warunki pożaru najistotniejsze jest przyjęcie takich rozwiązań, aby spełnione były wymagania stawiane poszczególnym elementom konstrukcyjnym w zakresie odporności ogniowej. Najlepszym sposobem oceny tego parametru jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Sposób ten jest jednak kosztowny i nie we wszystkich przypadkach możliwy do zastosowania. Zazwyczaj badane są elementy typowe i powtarzalne. W odniesieniu do dużych nietypowych elementów konstrukcyjnych wykonanie badań często nie jest możliwe i w związku z tym konieczne jest stosowanie metod obliczeniowych. Istotnym etapem obliczeniowego prognozowania odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych jest określenie scenariusza pożaru i odpowiadającego mu pożaru obliczeniowego [6, 7].

Według [5] w odniesieniu do konstrukcji, w stosunku do których stawiane są wymagania odporności ogniowej określone w przepisach, można przyjmować, że pożar obliczeniowy jest określony krzywą standardową. Krzywa ta jest bardzo uproszczonym odwzorowaniem pożaru. Również proste, ale bardziej dokładne prognozowanie przebiegu pożaru można uzyskać stosując parametryczne krzywe temperatura-czas [5, 8, 9].

Celem pracy jest porównanie przebiegu pożaru obliczeniowego, kontrolowanego przez wentylację, tzn. takiego, o którego rozwoju decyduje dopływ powietrza, określonego na bazie parametrycznych krzywych temperatura-czas, z pożarem określonym krzywą standardową[5].

## **2. Przebieg pożaru parametrycznego**

Prognozowanie przebiegu pożaru na podstawie krzywych parametrycznych temperatura-czas [5] jest rozwiązaniem pośrednim między przyjęciem jednego z tzw. pożarów nominalnych (najczęściej krzywej standardowej), a pracochłonnymi obliczeniami bazującymi

na numerycznych modelach mechaniki płynów (Computational Fluid Dynamics). Istotną zaletą krzywych parametrycznych jest to, że do ich określenia nie są potrzebne zaawansowane programy komputerowe, a pomimo tego jest możliwe stosunkowo proste uwzględnienie najbardziej istotnych czynników, mających wpływ na rozwój i przebieg pożaru, w tym:

- geometrii rozpatrywanego pomieszczenia,
- liczby i wymiarów otworów w ścianach zewnętrznych,
- gęstości obciążenia ogniowego,
- charakterystyki termicznej przegród zewnętrznych.

Krzywe parametryczne odnoszą się do pożaru jednostrefowego, tzn. takiego, w którym przyjmuje się, że w całej strefie ogarniętej pożarem panuje jednakowa temperatura. W praktyce stosowanie krzywych parametrycznych jest ograniczone do pożarów, w których występuje rozgorzenie. Należy również pamiętać, że nośność konstrukcji powinna być analizowana przez cały czas trwania pożaru parametrycznego (łącznie z fazą stygnięcia).

Według [5] możliwość stosowania krzywych parametrycznych jest ograniczona w następujący sposób:

- powierzchnia podłogi rozpatrywanego pomieszczenia nie może być większa niż 500m<sup>2</sup>,
- wysokość pomieszczenia nie może być większa niż 4m,
- w rozpatrywanym pomieszczeniu nie mogą występować otwory w dachu.

W opisie metody podanej w [5] znajdują się jeszcze inne, nie przytoczone tu wymagania dotyczące przedziałów zmienności parametrów i współczynników występujących we wzorach służących do określenia zależności opisujących przebieg pożaru.

W celu wyznaczenia przebiegu pożaru obliczeniowego na bazie krzywych parametrycznych [5] konieczne jest:

- określenie zależności temperatura-czas w fazie nagrzewania,
- wyznaczenie maksymalnej temperatury pożaru, na podstawie której określa się czas, po którym kończy się faza nagrzewania, a rozpoczyna się faza studzenia,
- określenie zależności temperatura-czas w fazie studzenia.

Podczas fazy nagrzewania wzrost temperatury gazu ( $\Theta_g$ , °C) w pomieszczeniu ogarniętym pożarem jest określony wzorem:

$$\Theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (1)$$

w którym:

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad (2)$$

t – oznacza czas upływający od rozpoczęcia pożaru (wyrażony w godzinach), a

$\Gamma$  – oznacza współczynnik funkcji czasu określony wzorem:

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad (3)$$

W sytuacji, gdy  $\Gamma$  jest równe jedności, równanie (1) przybliża krzywą standardową.

We wzorze (3) symbol b oznacza współczynnik absorpcyjności termicznej określony wzorem:

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)} \quad (4)$$

w którym:

$\rho$  – oznacza ciężar objętościowy, wyrażony w kg/m<sup>3</sup>,

$c$  – oznacza ciepło właściwe, wyrażone w J/(kg·K)

$\lambda$  – oznacza przewodność cieplną elementów ograniczających, wyrażoną w W/(m·K).

Wartości współczynnika  $b$  musi zawierać się w przedziale od 100 do 2200 J/(m<sup>2</sup>·s<sup>0,5</sup>·K).

W przypadku, gdy w analizowanym pomieszczeniu poszczególne przegrody są wykonane z różnych materiałów, wartość współczynnika absorpcyjności ( $b$ ) oblicza się ze wzoru:

$$b = \left( \frac{\sum (b_j / A_j)}{A_t - A_v} \right) \quad (5)$$

w którym:

$b_j$  – oznacza właściwość termiczną powierzchni ograniczającej  $j$ , obliczoną ze wzoru (4).

$A_j$  – oznacza pole powierzchni ograniczającej  $j$  (np. powierzchnię ściany), z wyłączeniem otworów,

$A_v$  – oznacza całkowitą powierzchnię otworów we wszystkich ścianach,

$A_t$  – oznacza całkowitą powierzchnię elementów ograniczających (ścian, sufitów i podłogi, łącznie z otworami).

We wzorze (3) symbol  $O$  oznacza wskaźnik otworów określony wzorem:

$$O = \frac{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (6)$$

w którym  $h_{eq}$  oznacza średnią ważoną wysokości okien we wszystkich ścianach. Wartość wskaźnika otworów musi zawierać się w przedziale od 0,02 do 0,2 m<sup>0,5</sup>.

Przebieg zależności temperatura-czas w fazie nagrzewania zależy od geometrii pomieszczenia oraz od rodzaju przegród zewnętrznych. Wzór (1) nie uwzględnia natomiast wpływu gęstości obciążenia ogniowego występującego w analizowanym pomieszczeniu. Parametr ten jest uwzględniany przy określaniu czasu, po którym temperatura w pomieszczeniu osiąga wartość maksymalną.

Maksymalną temperaturę gazu, odpowiadającą zakończeniu fazy nagrzewania ( $\Theta_{max}$ ), oblicza się ze wzoru (1) wstawiając do niego  $t^* = t^*_{max}$ , określane wg wzorów (7-9).

$$t^*_{max} = t_{max} \cdot \Gamma \quad (7)$$

$$t_{max} = \max \left[ \left( 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O} \right); t_{lim} \right] \quad (8)$$

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot \frac{A_f}{A_t} \quad (9)$$

We wzorach (7-9):

$q_{t,d}$  – oznacza obliczeniową wartość gęstości obciążenia ogniowego odniesioną do całkowitego pola powierzchni ograniczających ( $A_t$ ); wartości  $q_{t,d}$  muszą zawierać się w przedziale od 50 do 1000 MJ/m<sup>2</sup>; przyjmuje się, że obciążenie ogniowe strefy podlega całkowitemu spalaniu,

$q_{f,d}$  – oznacza obliczeniową wartość gęstości obciążenia ogniowego odniesioną do pola powierzchni podłogi  $A_f$  i wyrażona jest w MJ/m<sup>2</sup>; według [5] obliczeniowa wartość gęstości obciążenia ogniowego uwzględnia wiele czynników, w tym ryzyko powstania pożaru oraz wpływ czynnych i biernych systemów zabezpieczeń przeciwpożarowych,

$t_{\max}$  – oznacza czas (wyrażony w godzinach) upływający od początku pożaru do wystąpienia maksymalnej temperatury gazu,

$t_{\lim}$  – oznacza czas (wyrażony w godzinach) upływający do wystąpienia maksymalnej temperatury gazu w przypadku pożaru kontrolowanego za pomocą paliwa. Wartość  $t_{\lim}$  zależy od prędkości rozwoju pożaru; przyjmuje się  $t_{\lim}$  równe 15, 20 lub 25 min – odpowiednio dla dużej, średniej i małej prędkości rozwoju pożaru.

Przedstawiona metoda uwzględnia możliwość wystąpienia dwóch typów pożaru: kontrolowanego przez wentylację albo za pomocą paliwa. Pożar kontrolowany za pomocą paliwa występuje wtedy, kiedy we wzorze (8) przyjmuje się  $t_{\max}=t_{\lim}$ . Odpowiada to sytuacji, w której otwory w ścianach pomieszczenia są relatywnie duże w stosunku do jego powierzchni i nie występuje ograniczenie dopływu powietrza. W przeciwnym przypadku, tzn. wtedy, kiedy jako  $t_{\max}$  przyjmuje się wartość wyrażenia podanego w nawiasie we wzorze (8), występuje pożar kontrolowany przez wentylację.

Wzory przedstawione w referacie dotyczą przypadku pożaru kontrolowanego przez wentylację. W przypadku pożaru kontrolowanego za pomocą paliwa, we wzorach występują pewne modyfikacje [5].

Temperaturę gazu w pomieszczeniu w fazie studzenia określa się według jednej z przedstawionych niżej zależności:

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625(t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{dla } t_{\max}^* \leq 0,5 \quad (10a)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250(3 - t_{\max}^*)(t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{dla } 0,5 < t_{\max}^* < 2,0 \quad (10b)$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250(t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{dla } t_{\max}^* \geq 2,0 \quad (10c)$$

w których:

$t^*$  - jest określony przez (2)

$x=1,0$  jeżeli  $t_{\max} > t_{\lim}$ , lub  $x = t_{\lim} \cdot \Gamma / t_{\max}^*$  jeżeli  $t_{\max} = t_{\lim}$

$$t_{\max}^* = \left( 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{q_{f,d}}{O} \right) \cdot \Gamma \quad (10)$$

### 3. Analiza przebiegu pożaru charakteryzowanego krzywą parametryczną

W pracy przeanalizowano przebieg pożaru w przykładowym pomieszczeniu o wymiarach 7,5 x 10 m, wysokości 3,5 m. Przyjęto, że sufit i podłogę pomieszczenia stanowią płyty żelbetowe, a ściany wykonane są z różnych materiałów. Założenia dobrano tak, aby we wszystkich przypadkach pożar był kontrolowany przez wentylację i rozwijał się ze średnią prędkością.

Rozpatrzono trzy wartości gęstości obciążenia ogniowego:

- stosunkowo małą -  $q_{f,d} = 500 \text{ MJ/m}^2$  (biuro, pomieszczenia handlowe)
- przeciętną -  $q_{f,d} = 1000 \text{ MJ/m}^2$  (mieszkanie, magazyn)
- stosunkowo dużą -  $q_{f,d} = 3500 \text{ MJ/m}^2$  (magazyn, biblioteka)

W nawiasach podano przeznaczenie pomieszczenia, któremu w przybliżeniu może odpowiadać przyjęta wartość gęstości obciążenia ogniowego.

W celu przeanalizowania, jaki wpływ na przebieg rozwoju pożaru ma liczba i wielkość otworów w ścianach, wykonano przykładowe obliczenia wartości wskaźnika otworów (O). Wykorzystano wzór (6), do którego wstawiono dane przedstawione w tabelicy 1. Przyjęto, że

otwory to okna szklone szkłem zwykłym. Przyjmuje się wtedy, że szyby zostaną wybite na początku pożaru [8].

Tablica 1. Przyjęte parametry otworów

Lp	Liczba otworów	Otwór nr 1		Otwór nr 2		Otwór nr 3		Wskaźnik otworów $O$ , $m^{0,5}$
		Wymiar otworu, m		Wymiar otworu, m		Wymiar otworu, m		
		szer.	wys.	szer.	wys.	szer.	wys.	
1	1	3,0	1,5	-	-	-	-	0,02
2	2	3,0	1,5	3,0	1,5	-	-	0,04
3	4	3,0	1,5	3,0	1,5	3,0	1,5	0,061

W celu przeanalizowania, jaki wpływ na przebieg rozwoju pożaru ma rodzaj przegród zewnętrznych rozpatrzono trzy warianty ścian: stosunkowo lekką, przeciętną i stosunkowo masywną. W tablicy 2 podano przyjęte założenia oraz wartości współczynników absorbcyjności ( $b_j$  i  $b$ ) obliczone ze wzorów (4) i (5).

Tablica 2. Przyjęte parametry elementów ograniczających

Lp.	Materiał, z którego są wykonane ściany	$\rho$ , $kg/m^3$	$c$ , $J/kgK$	$\lambda$ , $W/mK$	Wskaźnik absorbcyjności $b_j$ , $J/m^2 \cdot s^{0,5} \cdot K$	Wskaźnik absorbcyjności $b$ , $J/m^2 \cdot s^{0,5} \cdot K$
1	Beton lekki	500	840	0,22	304	1186
2	Cegła dziurawka	1400	880	0,62	874	1381
3	Żelbet	2500	900	1,70	1856	1913

Na rysunku 1 przedstawiono możliwy przebieg pożaru w rozpatrywanym pomieszczeniu, w zależności od wartości gęstości obciążenia ogniowego i wskaźnika otworów. Wykresy odnoszą się do pomieszczenia o ścianach wykonanych z betonu lekkiego (por. tabl. 2).

Na rysunku 2 przedstawiono możliwy przebieg pożaru, w rozpatrywanym pomieszczeniu, w zależności od gęstości obciążenia ogniowego i wskaźnika absorbcyjności ścian pomieszczenia. Wykresy odnoszą się do przypadku, w którym wskaźnik otworów wynosi  $O=0,061 m^{0,5}$  (por. tabl. 1).

#### 4. Analiza przebiegu pożaru parametrycznego kontrolowanego przez wentylację

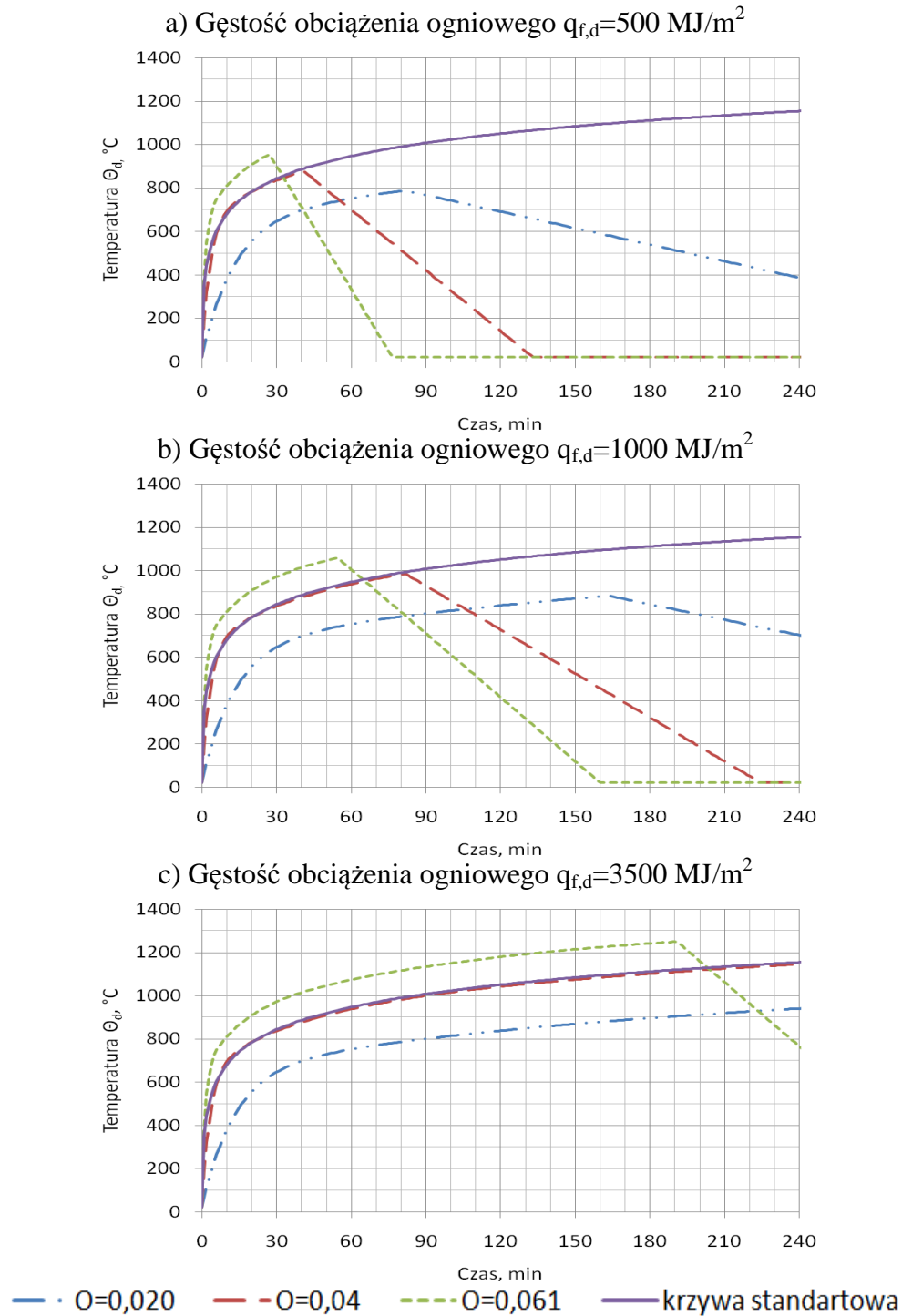
Rozpatrując rysunek 1 należy zauważyć, że niezależnie od gęstości obciążenia ogniowego, przy stosunkowo dużej wartości wskaźnika otworów, przebieg pożaru określonego za pomocą krzywej parametrycznej jest bardziej gwałtowny od określonego krzywą standardową. Przy przeciętnej wartości wskaźnika otworów ( $O = 0,04 m^{0,5}$ ) przebieg pożaru parametrycznego w rozpatrywanym pomieszczeniu jest praktycznie taki sam jak przebieg pożaru standardowego. Przy małej liczbie otworów temperatura określona krzywą parametryczną jest niższa od określonej krzywą standardową.

Gwałtowny wzrost temperatury pożaru parametrycznego, spowodowany stosunkowo dużą wartością wskaźnika otworów, skutkuje szybkim spalaniem się materiałów w pomieszczeniu. Przy niezbyt dużej ilości paliwa (mała gęstość obciążenia ogniowego), dobry dostęp powietrza (duża wartość wskaźnika otworów) prowadzi do stosunkowo szybkiego zakończenia pożaru.

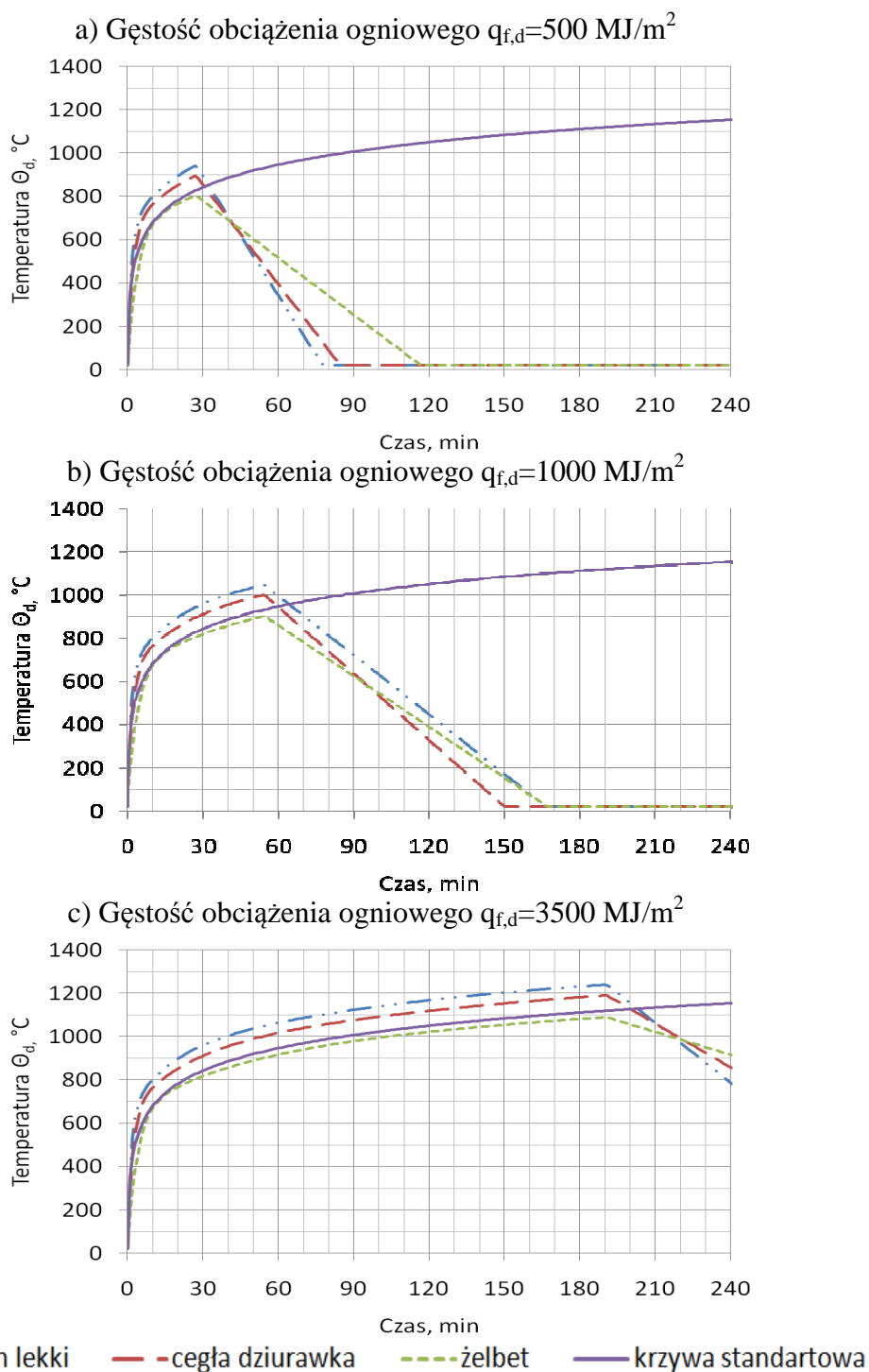
Rozpatrując rysunki 1 a i b warto zauważyć, że pole mieszczące się pod krzywą odpowiadającą dużej wartości wskaźnika otworów jest mniejsze od pól zawartych pod krzywymi odpowiadającymi mniejszym wartościom tego wskaźnika. Zdaniem autorów

można ostrożnie wnioskować, że przy niezbyt dużej gęstości obciążenia ogniowego, w pewnych przypadkach, destrukcja konstrukcji spowodowana wpływem pożaru parametrycznego może osiągnąć największe rozmiary przy ograniczonej wentylacji pomieszczenia ogarniętego pożarem.

Rozpatrując rysunek 2 można zauważyć, że wpływ rodzaju ścian ma drugorzędne znaczenie na przebieg pożaru parametrycznego.



Rys. 1. Przebieg pożaru określonego krzywą parametryczną w rozpatrywanym pomieszczeniu, w zależności od wskaźnika otworów ( $O$ ) i gęstości obciążenia ogniowego ( $q_{t,d}$ ). Ściany wykonane z betonu lekkiego.



Rys. 2. Przebieg pożaru określonego krzywą parametryczną w rozpatrywanym pomieszczeniu, w zależności od rodzaju ścian i gęstości obciążenia ogniowego ( $q_{f,d}$ ); wskaźnik otworów  $O = 0,061 \text{ m}^{0,5}$

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę określania przebiegu pożaru obliczeniowego, określonego za pomocą parametrycznych krzywych temperatura-czas, wg wymagań [5]. Przyjmując różne

wartości gęstości obciążenia ogniowego przeanalizowano przykładowo, jaki wpływ na przebieg pożaru mają liczba i wielkość otworów w ścianach zewnętrznych oraz właściwości termiczne tych ścian.

Przy dobrej wentylacji pomieszczenia (duża liczba otworów w ścianach), niezależnie od gęstości obciążenia ogniowego, wzrost temperatury pożaru parametrycznego w wielu przypadkach jest bardziej gwałtowny od określonego krzywą standardową.

Występowanie dobrej wentylacji w pomieszczeniu skutkuje szybkim spalaniem się materiałów, a więc szybkim zanikiem pożaru.

Można ostrożnie wnioskować, że przy niezbyt dużej gęstości obciążenia ogniowego, w pewnych przypadkach, destrukcja konstrukcji spowodowana wpływem pożaru parametrycznego może być większa przy ograniczonej wentylacji pomieszczenia.

Parametry termiczne ścian zewnętrznych ograniczających pomieszczenie mają, w porównaniu z wpływem wentylacji, drugorzędne znaczenie na przebieg pożaru parametrycznego.

## **Literatura**

- [1] Ustawa Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994. Dziennik Ustaw 2006 nr 156 poz. 1118 (z późn. zm.)
- [2] Dyrektywa Rady Wspólnot Europejskich 89/106/EWG z 21 grudnia 1988 r. w sprawie zbliżenia ustaw i aktów wykonawczych państw członkowskich dotyczących wyrobów budowlanych. Wyd. w jęz. Polskim: ITB, Warszawa 1994.
- [3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. nr 72 z dnia 15.06.2002r., poz. 690 (z późn. zm.)
- [4] PN-EN 1990:2004. Eurokod- Podstawy projektowania konstrukcji
- [5] PN-EN 1991-1-2: 2006. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania na konstrukcję w warunkach pożaru.
- [6] Kowalski R.: Obliczeniowa ocena nośności zginanych elementów żelbetowych w sytuacji pożaru. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo, 149/2008.
- [7] Kosiorek M.: Bezpieczeństwo pożarowe budynków. W: Budownictwo ogólne, Tom 2. Fizyka Budowli. Praca zb. Pod red. P. Klemma, Arkady, Warszawa 2006.
- [8] Valorisation project: Natural Fire Safety Concept, 2001.
- [9] Cajot L.G., Haller M. & Pierre M., Seminarium - Projektowanie Konstrukcji Stalowych Zespolonych z Uwzględnieniem Warunków Pożarowych, DIFISEK, Poznań 2008.

## **VENTILATION-CONTROLLED FIRE DETERMINING ON THE BASIS OF PARAMETRIC TEMPERATURE-TIME CURVES**

### **S u m m a r y**

The aim of this paper is to present a method for determining development of design fire on the basis of parametric temperature-time curves, defined by Eurocod 1, part 1-2. Possible cases of ventilation-controlled fires taking place in a simple room have been examined in comparison to a standard curve. The paper also analyses the impact of fire load density, the number and size of openings in walls and physical characteristics of external partitions.