

CZĘŚĆ 1 : Oddziaływania termiczne i mechaniczne

L.G. Cajot, M. Haller & M. Pierre
PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Luksemburg

STRESZCZENIE: Ogólnym celem tego opracowania jest skuteczne rozpowszechnienie wiedzy w zakresie projektowania konstrukcji z zachowaniem bezpieczeństwa pożarowego, uzyskanej w ciągu ostatnich 25 lat w ramach licznych projektów finansowanych przez ECSC i zastosowanie jej w praktyce. Pragniemy rozpowszechnić tą wiedzę tak szeroko, jak to będzie możliwe, w wielu krajach i w różnych językach. Pierwsza część opracowania, stanowiąca Pakiet Roboczy 1, zawiera opis stosowanych obecnie narzędzi pozwalających określić **oddziaływania termiczne**, wprowadzonych przez aktualne normy Eurocode.

1. WSTĘP

Liczne dramatyczne pożary, które miały miejsce w latach sześćdziesiątych, takie jak pożar supermarketu "Innovation" w Brukseli, który spowodował śmierć ponad 300 osób, a także pożar w dyskotecce "Le cinq Sept" w Saint-Laurent-du-Pont we Francji, spowodowały wprowadzenie w całej Europie wielu nowych przepisów.

Obecne przepisy dotyczą szeregu dziedzin, m.in.:

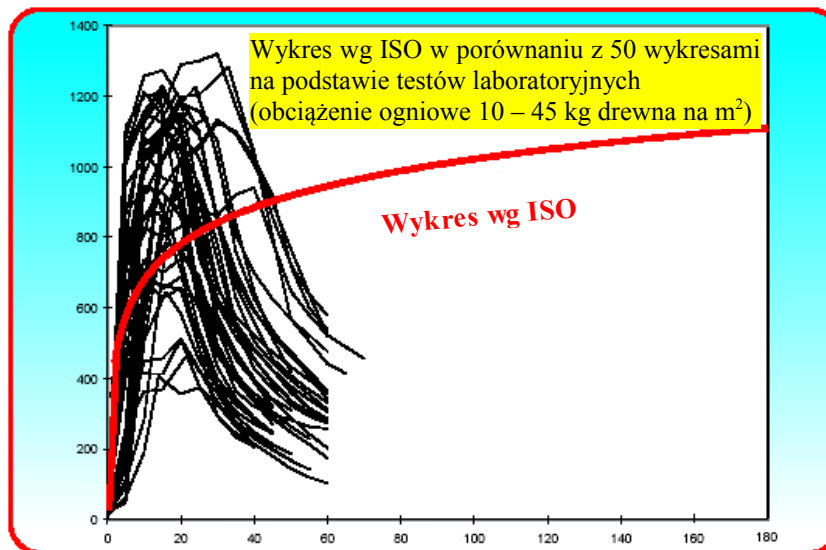
- dróg ewakuacyjnych,
- rozprzestrzeniania ognia, w tym "odporności ogniowej" i „reakcji na ogień”,
- odporności ogniowej konstrukcji w kategoriach okresów odporności, R30, 60, 90 lub 120,
- systemów wentylacyjnych odprowadzających dym i ciepło,
- czynnych systemów walki z pożarem, takich jak gaśnice ręczne, detektory dymu, urządzenia tryskaczowe,
- dostępu dla straży pożarnej.

Nawet jeśli ogólny kontekst i pojęcia dotyczące bezpieczeństwa ogniowego są takie same w całej Europie, to wymagania w tym zakresie nie są jednakowe. Było to przedmiotem analizy w ramach projektu NFSC1 [11] i zostało zaktualizowane dzięki danym zebranych podczas ostatniego projektu ECSC pod nazwą "Wymagania przeciwpożarowe w oparciu o ryzyko" [18]. Na przykład w Hiszpanii wymagana odporność ogniowa dla budynku jednokondygnacyjnego wynosi R120, natomiast w Szwajcarii dla tego typu budynków nie ma żadnych wymagań [18]. Dla budynków biurowych średniej wysokości wymagana odporność ogniowa wynosi R60 w Holandii, natomiast we Francji R120 [11]. Głównymi parametrami określającymi wymagania przeciwpożarowe są wysokość budynku i jego przeznaczenie w kategoriach liczby przebywających w nim ludzi i rodzaju ich aktywności. Wymagania w zakresie odporności ogniowej powinny bazować na parametrach mających wpływ na rozwój pożaru. Parametry te obejmują:

- ogień (prawdopodobieństwo powstania i rozprzestrzenienia się ognia, czas trwania pożaru, obciążenie ogniowe, moc pożaru),
- warunki wentylacji,
- strefy pożarowe (rodzaj, wielkość, geometria),
- warunki ewakuacji,

- bezpieczeństwo ekip ratowniczych,
- zagrożenie rozprzestrzenienia się ognia na sąsiednie budynki,
- środki czynnej ochrony przeciwpożarowej

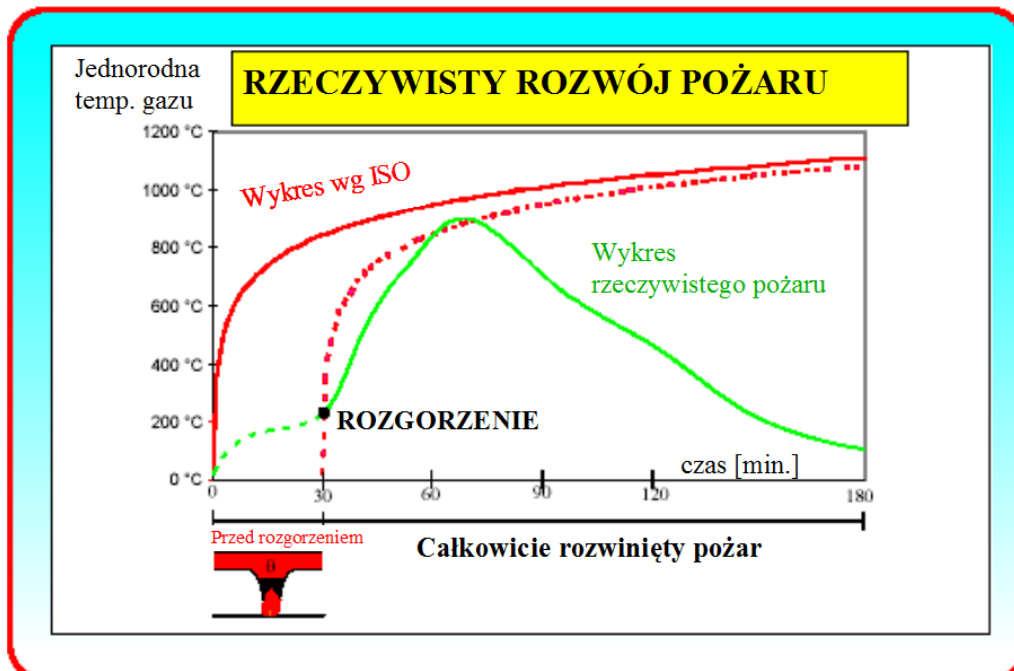
Obecne regulacje nie uwzględniają odpowiednio wpływu tryskaczy na tłumienie lub gaszenie ognia. Dane zebrane w [11, 18] pokazują, że z wyjątkiem kilku przypadków, obecne wymagania są takie same niezależnie od tego, czy zastosowano urządzenia tryskaczowe, czy nie. Aby uwzględnić wszystkie te czynniki fizyczne w systematyczny sposób, wypracowano dzięki różnym projektom badawczym ECSC i w oparciu o "Koncepcję naturalnego bezpieczeństwa pożarowego" [11, 12, 13, 18] bardziej realistyczne i bardziej wiarygodne podejście do analizy bezpieczeństwa strukturalnego w przypadku pożaru, obejmujące aktywne środki zwalczania pożaru i rzeczywistą charakterystykę pożaru. Metodologia ta została opracowana w oparciu o podejście statystyczne, probabilistyczne i deterministyczne, i związane z tym analizy. Można ją stosować w odniesieniu do wszystkich materiałów konstrukcyjnych i wszystkich typów budynków. Rysunek 1.1 przedstawia porównanie "naturalnych" wykresów pożaru przy różnych konfiguracjach (wielkość stref, obciążenia ogniowe, izolacja ścian, charakterystyki palności) ze standardowym wykresem wg ISO.



Rysunek. 1.1 Wykres temperatura-czas dla naturalnego pożaru i wykres wg ISO

Rysunek 1.1 pokazuje trudności ze zrozumieniem zachowania się elementów w przypadku rzeczywistego pożaru przy wykorzystaniu danych uzyskanych na podstawie pojedynczego wykresu pożaru wg ISO. Rzeczywisty pożar posiada parametry, które w wykresie wg ISO nie zostały uwzględnione. Charakterystyka prawdziwego pożaru została pokazana na rys. 1.2. Obejmuje ona następujące fazy:

- fazę bezpłomieniową: zapłon i pożar bezpłomieniowy w bardzo niskiej temperaturze, przy czym długość tej fazy jest często trudna do oszacowania. Ta faza nie została pokazana na rys. 1.2.
- fazę rozwoju pożaru zwana fazą przedrozgorzeniową (pożar zlokalizowany): czas trwania tej fazy zależy głównie od charakterystyki strefy. Pożar pozostaje pożarem zlokalizowanym do chwili ewentualnego rozgorzenia.
- fazę rozgorzenia: rozgorzenie stanowi pożar uogólniony. Faza ta jest na ogół bardzo krótka.
- fazę po rozgorzeniu: etap ten odpowiada pożarowi uogólnionemu, którego czas trwania zależy od obciążenia ogniowego i warunków wentylacji,
- fazę zmniejszania się pożaru: pożar zaczyna słabnąć do chwili, gdy wszystkie palne materiały ulegną całkowitemu spalaniu.



Rysunek 1.2 Naturalne fazy pożaru

2. METODOLOGIA

2.1 Wprowadzenie

Określenie rozwoju pożaru w strefie pożarowej wymaga znajomości dużej liczby parametrów. Niektóre z tych parametrów są zdeterminowane charakterystyką budynku. Niemniej jednak główna cecha, "obciążenie ogniowe", jest funkcją prowadzonej w danym miejscu działalności i może nie być stała w ciągu całego okresu użytkowania budynku. Obciążenie ogniowe może być zdefiniowane jako rozkład statystyczny. Obciążenia mechaniczne działające na konstrukcję w temperaturze otoczenia, takie jak ciężar własny, obciążenie użytkowe i parcie wiatru, także są określane poprzez rozkład statystyczny. Podobnie bezpieczeństwo pożarowe w budynku zostało określone dzięki podejściu probabilistycznemu. W ogólnej koncepcji naturalnego bezpieczeństwa pożarowego cele definiowane są poprzez spodziewaną wartość niepowodzenia. Jej przeznaczeniem nie jest zmiana aktualnego poziomu bezpieczeństwa pożarowego określonego w normach, lecz skwantyfikowanie go przy pomocy odpowiedniego realistycznego współczynnika prawdopodobieństwa niepowodzenia lub bezpieczeństwa. Dla osiągnięcia możliwego do zaakceptowania poziomu bezpieczeństwa można wykorzystywać kombinacje czynnych i biernych środków ochrony przeciwpożarowej.

Ogólna metoda kwantyfikacji bezpieczeństwa bazuje na metodzie stosowanej do projektowania konstrukcji w temperaturze otoczenia i definiuje obliczeniowe obciążenie ogniowe uwzględniając prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru i wpływ czynnych środków ochrony przeciwpożarowej. Następnie obliczeniowe obciążenie ogniowe jest wykorzystane w modelu do obliczeń pożarowych do oceny zachowania się konstrukcji w trakcie pożaru. W niniejszym opracowaniu opisano modele do określania temperatury w obrębie strefy.

2.2 Cele

Celem jest osiągnięcie akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa. Taki akceptowalny poziom bezpieczeństwa można definiować poprzez porównanie z innymi istniejącymi zagrożeniami dla życia, włącznie z możliwością zawalenia się konstrukcji budynku w normalnych warunkach użytkowania.

Docelowe prawdopodobieństwo zaważenia się konstrukcji w normalnych warunkach użytkowania wynosi $7,23 \cdot 10^{-5}$ w całym okresie eksploatacji budynku [10]. Cel wygląda następująco: P_f (prawdopodobieństwo zniszczenia) $\leq P_i$ (prawdopodobieństwo docelowe).

Według definicji w Eurokodach, pożar jest zdarzeniem przypadkowym. Przeprowadzono obszerne badania statystyczne w celu określenia prawdopodobieństwa powstania pożaru. Zjawisko zapłonu jest funkcją użytkowania obiektu. Stwierdzono dobrą korelację między danymi statystycznymi pochodzącymi z różnych krajów europejskich [11]. W przypadku wystąpienia pożaru, zaważenia się konstrukcji może nastąpić tylko w warunkach poważnego pożaru. Konieczne jest więc określenie prawdopodobieństwa osiągnięcia przez pożar takiego stadium. W tej fazie ważną rolę do odegrania mają czynne środki gaśnicze, lokatorzy i strażacy. Oznacza to, że w znacznej ilości przypadków pożar taki zostanie zastopowany bardzo szybko i nigdy się nie rozwinie. Zgodnie ze statystykami przy ustalaniu prawdopodobieństwa powstania poważnego pożaru oszacowano działanie aktywnych środków gaśniczych i interwencji straży pożarnej. Tak więc obliczeniowe obciążenie pożarowe jest wyliczane z docelowego prawdopodobieństwa z uwzględnieniem czynnych (tryskacze, detekcja) i biernych (podział na strefy) środków ochrony ppoż., sposobu użytkowania budynku oraz interwencji straży pożarnej. Procedura ta jest opisana dokładniej w rozdziale 5.

2.3 Metoda obliczania rozwoju pożaru

Istnieją różne poziomy metod obliczania rozwoju pożaru:

- modele proste: głównie pożary parametryczne,
- modele strefowe: te modele uwzględniają wszystkie główne parametry kontrolujące pożar,
- modele obszarowe: zbyt skomplikowane, aby stosować je jako ogólnie dostępne narzędzia projektowania. Jednak modele obszarowe są jedynymi narzędziami nadającymi się do stosowania wyrafinowanej geometrii [19].

Założenia modelu jednostrefowego odnoszą się do pożaru uogólnionego z jednorodną temperaturą w pomieszczeniu, podczas gdy dwustrefowy model odnosi się do uwarstwionej warstwy dymu ze zlokalizowanego pożaru.

Głównym parametrem rozwoju pożaru jest szybkość wydzielania ciepła (RHR). Parametr ten jest funkcją wielkości przedziału i sposobu jego użytkowania oraz funkcją czasu. Pożar jest początkowo pożarem zlokalizowanym w fazie przed rozgorzeniem (pożar lokalny). Początek tej fazy charakteryzuje się wzrostem pożaru skwantyfikowanym zgodnie z założeniem pożaru t^2 . Oznacza to, że szybkość wydzielania ciepła określona jest równaniem parabolicznym. Budynki klasyfikuje się do 4 kategorii pod względem prędkości rozprzestrzeniania się pożaru: wolny, średni, szybki, bardzo szybki. Szybkość wydzielania ciepła osiągnie maksymalną wartość odpowiadającą stanowi równowagi definiowanym przez warunki kontroli przez paliwo i/lub wentylację.

Jednym ze sposobów oceny jest poznanie ewolucji RHR i określenie, czy pożar rozgorzeje, czy pozostanie pożarem zlokalizowanym. Jeśli warunki rozgorzenia lub pożaru uogólnionego nie zostaną osiągnięte, pożar pozostanie zlokalizowany. W takim przypadku wykorzystuje się model dwustrefowy do oszacowania ogólnych skutków warstwy dymu. Studiuje się także skutki lokalne w pobliżu pożaru przy pomocy modeli empirycznych opracowanych podczas poprzednich badań "pożar naturalny w dużych przedziałach" [8]. Hasemi [17] przeprowadził badania doświadczalne w celu określenia lokalnych termicznych wpływów pożaru, na podstawie których opracowano uproszczoną metodę. Połączenie obu modeli pozwala na określenie pola temperatur w pobliżu pożaru i daleko od niego.

2.4 Zachowanie konstrukcji podczas pożaru

Należy obliczyć przepływ ciepła do elementów konstrukcyjnych zgodnie z oddziaływaniem termicznym. Zachowanie konstrukcji można oszacować przy pomocy modeli o różnych poziomach skomplikowania, uwzględniając pole temperatur w konstrukcji i kombinację obciążeń mechanicznych w razie pożaru.

Można stosować modele uproszczone wykorzystujące obliczenia element/element. Generalnie ten model opiera się na pojęciu temperatury krytycznej. Jeżeli temperatura po ogrzaniu jest niższa od temperatury krytycznej, nie nastąpi zniszczenie, w przeciwnym razie zniszczenie nastąpi. Jest to kryterium „zero-jedynkowe”. Cel jest osiągnięty, jeżeli czas potrzebny do zniszczenia konstrukcji jest dłuższy od naturalnej ekspozycji ognia.

Można zastosować bardziej wyrafinowane modele, na przykład wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES). Wyniki uzyskane dzięki tym modelom określają na ogół odkształcenia podczas trwania całego pożaru. W niektórych przypadkach przedstawione kryteria (potrzebne do określenia, na jakim poziomie cele są spełnione) mogą określać odkształcenia konstrukcji.

Wiedza na temat zachowania konstrukcji podczas pożaru pozwala na ocenę w odniesieniu do szeregu kryteriów w kategoriach ograniczonego odkształcenia lub zniszczenia konstrukcji. Wybór kryteriów do celów projektowych uzależniony będzie od konsekwencji zniszczenia i funkcji budynku. Dla niektórych ważnych wielopiętrowych budynków może to oznaczać, że przez cały czas trwania pożaru nie może nastąpić żadna awaria konstrukcji. Charakterystyki modeli będą omówione w Pakiecie Roboczym nr 3.

2.5 Wymagane dane

Zastosowanie tej metodologii wymaga poznania charakterystyki budynku. Metoda jest stosowana kolejno, strefa po strefie. Strefa musi być zdefiniowana nie tylko pod względem geometrii, ale także termicznych charakterystyk ścian mogących akumulować i przekazywać dużą część energii uwalnianej podczas pożaru, a także otworów pozwalających na wymianę powietrza z przestrzenią na zewnątrz strefy.

3 CHARAKTERYSTYKA STREF POŻAROWYCH

3.1 Wstęp

Koncepcji Naturalnego Bezpieczeństwa Pożarowego jest oparta na fizycznie określonych oddziaływaniach termicznych. W przeciwieństwie do konwencjonalnego projektowania, istotną rolę odgrywają parametry takie jak wielkość obciążenia pożarowego, szybkość wydzielania ciepła i wielkość wentylacji. W większości budynków liczba możliwych scenariuszy pożaru jest nieskończenie duża i musi zostać ograniczona. Analizuje się tylko "wiarygodnie najgorsze scenariusze pożarowe". Jeśli zostaną wybrane scenariusze pożaru, istnieje określona liczba modeli pożaru do obliczania oddziaływania termicznego.

3.2 Elementy brzegowe strefy

W koncepcji Naturalnego Bezpieczeństwa Pożarowego rozwój pożaru opisany jest w strefie pożarowej. Zgodnie z założeniem pożar nie rozprzestrzeni się do innych stref. To, czy założenie jest prawdziwe, zależy od zachowania się w warunkach pożaru elementów brzegowych (podłogi, ściany [wraz z drzwiami], itp).

Konieczne jest poznanie tego zachowania aby ustalić zdolność tych elementów do pełnienia funkcji barier pożarowych. Poniżej przedstawione są dostępne opcje:

- testy *ad hoc*: w piecu element może być wystawiony na działanie krzywej temperatura-czas zgodnie z obliczeniami modeli pożaru opartych na najniekorzystniejszych scenariuszach pożarowych,
- oceny ekspertów: to podejście wykorzystuje dostępne dane z badań odporności ogniowej wg ISO elementów przegród,
- bezpośrednie wykorzystanie wymogów ISO: krajowe przepisy określają strefy pożarowe według danych odporności ogniowej wg ISO dla ścian, stropów, drzwi i podłóg, zależnie od sposobu użytkowania i geometrii budynku.

Pierwsze dwie opcje generują bardzo duże koszty i mogą być użyte tylko dla ograniczonej liczby elementów przegród. W praktyce najczęściej trzeba stosować trzecią opcję.

3.3 Ściany: charakterystyka termiczna

Strata ciepła ze strefy jest istotnym czynnikiem określania temperatury. Straty ciepła do granic strefy powodowane są przez konwekcję i promieniowanie. Należy znać właściwości termiczne ścian. Trzy główne parametry charakteryzujące termiczne właściwości materiału:

- ciepło właściwe c ,
- gęstość ρ ,
- przewodność λ .

Przewodność i ciepło właściwe zależą od temperatury.

W uproszczonych modelach stosowana jest tylko absorbcyjność termiczna dla całkowitej powierzchni elementów ograniczających zwana współczynnikiem b . Określa się ją z właściwości termicznych przy pomocy następującego równania (3.1):

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (3.1)$$

Gęstość ρ , ciepło właściwe c i przewodność λ (elementów ograniczających) służą do wyznaczania współczynnika b można określać w temperaturze otoczenia [1].

W przypadku ścian z wielu materiałów sugeruje się określenie współczynnika b poniższą metodą:

- kiedy materiał (2) jest izolowany przez materiał cięższy (1), czyli $b_1 < b_2$, wtedy współczynnikiem b jest współczynnik materiału 1: $b = b_1$,
- w przeciwnym wypadku, jeśli $b_1 > b_2$, można określić graniczną grubość materiału 1 według zależności (3.2):

$$s_{1,lim} = \sqrt{\frac{t_d \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} \quad \text{gdzie } t_d \text{ jest czasem trwania pożaru do fazy zaniku.} \quad (3.2)$$

Wtedy określamy współczynnik b jak niżej:

- jeżeli $s_1 > s_{1,lim}$ wtedy $b = b_1$,
- jeżeli $s_1 < s_{1,lim}$ wtedy $b = \frac{s_1}{s_{1,lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{1,lim}}\right) b_2$.

Tablica 3.1 podaje charakterystyki termiczne najczęściej używanych materiałów w różnych temperaturach.

Tablica 3.1 Termiczne właściwości materiałów				
Materiał	Temperatura	λ (W/m/K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)
Beton o normalnym ciężarze	20	2	2300	900
	200	1.63	2300	1022
	500	1.21	2300	1164
	1000	0.83	2300	1289
Beton lekki	20	1	1500	840
	200	0.875	1500	840
	500	0.6875	1500	840
	1000	0.5	1500	840
Stal	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
Gips izolacyjny	20	0.035	128	800
	200	0.06	128	900
	500	0.12	128	1050
	1000	0.27	128	1100
Cement uszczelniający	20	0.0483	200	751
	250	0.0681	200	954
	500	0.1128	200	1052
	800	0.2016	200	1059
Płyta CaSi	20	0.0685	450	748
	250	0.0786	450	956
	450	0.0951	450	1060
	1050	0.157	450	1440
Drewno	20	0.1	450	1113
	250	0.1	450	1125
	450	0.1	450	1135
	1050	0.1	450	1164
Cegła	20	1.04	2000	1113
	200	1.04	2000	1125
	500	1.18	2000	1135
	1000	1.41	2000	1164
Szkło	20	0.78	2700	840

3.4 Charakterystyka otworów

Otwory w obudowie to okna, drzwi i odpowietrzenia dachowe. Intensywność pożaru w przedziale zależy od liczby otworów w obudowie.

Wskaźnik otworów O używany w uproszczonych modelach jest określany zgodnie z równaniem (3.3) dla pojedynczego pionowego otworu:

$$O = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}, \quad (3.3)$$

Jeśli istnieje konieczność uwzględnienia kilku otworów pionowych, należy wykorzystać powierzchnię całkowitą i wysokość równoważną. Określa się je przy pomocy równań (3.4) i (3.5):

$$A_v = \sum A_{vi}, \quad (3.4)$$

$$h_{eq} = \left[\frac{\sum A_{vi} \cdot \sqrt{h_i}}{\sum A_{vi}} \right]^2, \quad (3.5)$$

gdzie A_v jest całkowitą powierzchnią otworów pionowych we wszystkich ścianach, h_{eq} jest średnią ważoną wysokością okien we wszystkich ścianach a h_i wysokością otworu pionowego i .

3.5 Mechaniczna wentylacja

Zastosowanie podwyższonego ciśnienia w klatkach schodowych jest interesującym sposobem ich ochrony ppoż. Mechaniczna wentylacja jest również często używana w systemach wentylacyjnych odprowadzających dym i ciepło (SHEVS).

4. CHARAKTERYSTYKA POŻARU

Celem tego rozdziału jest dostarczenie wszystkich informacji, jakie mogą być potrzebne projektantowi stojącemu przed problemem związanym z pożarem. Pierwszą niezbędną informacją konieczną do zaprojektowania budynku na obciążenie ogniowe jest wartość energii, jaka wywrze wpływ na konstrukcję. Sposobem na jej poznanie może być wykonanie rzeczywistego testu pożarowego w budynku. Jest to sposób nieekonomiczny i, ponadto, dostarcza informacji dotyczących jednego tylko z wielu możliwych pożarów, które mogą wystąpić w budynku. Informacje z testów pożarowych, istniejących modeli i dynamiki pożaru zostały połączone w celu uzyskania charakterystyk pożaru dla różnych przypadków.

4.1 Obciążenie ogniowe

Pierwszy problem polega na tym, aby wiedzieć, które obciążenie ogniowe powinno być uwzględnione przy projektowaniu. Obciążenie ogniowe rzadko znane jest deterministycznie, zazwyczaj musi być zdefiniowane statystycznie.

4.1.1 Podejście deterministyczne

Obciążenie ogniowe Q w przedziale pożarowym (strefie pożarowej) jest definiowane jako całkowita energia, która może zostać uwolniona w przypadku pożaru. Część energii zostanie użyta do ogrzania strefy (ścian i wewnętrznych gazów), pozostała będzie uwolniona przez otwory. Na obciążenie ogniowe składają się elementy budynku takie jak pokrycia ścian i sufitów, a także wyposażenie budynku, takie jak meblowanie. Obciążenie ogniowe Q podzielone przez powierzchnię podłogi daje gęstość obciążenia ogniowego q_f . W EN 1991 [1]. Charakterystyczna gęstość obciążenia ogniowego wyrażona jest równaniem (4.1):

$$q_{f,k} = \frac{1}{A_f} \sum (\psi_i \cdot m_i \cdot H_{ui} \cdot M_{k,i}) \quad (4.1)$$

gdzie:

$M_{k,i}$ = ilość materiałów palnych i [kg],

H_{ui} = wartość ciepła spalania netto materiału i (MJ/kg) (patrz tablica 4.1),

m_i = współczynnik opisujący zachowanie się materiału i w trakcie spalania,

ψ_i = współczynnik opcjonalny uwzględniający zabezpieczone obciążenia ogniowe,

A_f = powierzchnia podłogi strefy pożarowej lub obszaru odniesienia [m²].

$H_{ui} \cdot M_{k,i}$ reprezentuje całkowitą ilość energii zawartej w materiale i , uwalnianej przy założeniu całkowitego spalania. Współczynnik m jest bezwymiarowym współczynnikiem zawierającym się w przedziale między 0 i 1, przedstawiającym efektywność spalania: $m = 1$ odpowiada całkowitemu spalaniu, a $m = 0$ odpowiada przypadkowi, gdy materiał w żaden sposób nie przyczynia się do podtrzymania pożaru. Sugerowana wartość dla standardowych materiałów wynosi $m = 0,8$. Dla drewna sugerowana jest wartość H_u wynosząca 17,5 [MJ/kg], co prowadzi do wartości 14 MJ/kg dla ($m H_u$).

Tablica 4.1 Wartości ciepła spalania netto H_u (MJ/kg) materiałów palnych do obliczania obciążeń ogniowych.

Ciała stałe	
Drewno	17,5
Inne materiały celulozowe ubrania korek bawełna papier, tektura jedwab słoma wełna	20
Węgiel antracyt węgiel drzewny węgiel kamienny	30
Substancje chemiczne	
Węglowodory nasycone metan etan propan butan	50
Węglowodory nienasycone etylen propylen buten	45
Węglowodory aromatyczne benzen toluen	40
Alkohole metanol etanol glikol etylowy	30
Paliwa benzyna, ropa naftowa olej napędowy	45
Tworzywa z czystych węglowodorów polietylen polistyren polipropylen	40
Inne produkty	
Kopolimer ABS (tworzywo)	35
Poliester (tworzywo)	30
Polizocjanian i poliuretan (tworzywa)	25
Polichlorek winylu, PCW (tworzywo)	20
Bitumen, asfalt	40
Skóra	20
Linoleum	20
Opony gumowe	30
UWAGA Wartości podane w tej tablicy nie są odpowiednie do obliczania zawartości energii w paliwach.	

4.1.2 Podejście statystyczne

Gęstość obciążenia ogniowego można oszacować przez zsumowanie wszystkich obciążeń ogniowych występujących w budynku: jest to podejście deterministyczne. Dostępne są pewne informacje dotyczące gęstości obciążenia ogniowego dla określonych typów budynków takich jak biura i szkoły. Takie podejście statystyczne stosuje się tylko dla tych typów budynków, w których można oczekiwać podobnych wielkości obciążenia ogniowego. W tych przypadkach gęstość obciążenia ogniowego może być podana jako rozkład statystyczny z wartością średnią i odchyleniem standardowym.

W kolejnej tabelicy podano te wartości dla kilku typów budynków. Wartości te oparte są na rozkładzie pierwszego typu Gumbela. Wartości (dla fraktyli 80%, 90% i 95%) obliczone są według tego rozkładu, przy założeniu współczynnika wariacyjnego równego 0,3. Wartości w tabelicy 4.2 pochodzą z zestawienia powszechnie akceptowanych wartości uzyskanych z międzynarodowych dokumentów [2, 21, 22].

Tabela 4.2 Dane gęstości obciążenia ogniowego dla różnych budynków $q_{f,k}$ [MJ/m ²] (pasujących do rozkładu I-szego typu Gumbela) dla różnych sposobów użytkowania.					
Sposób użytkowania	Standardowe odchylenie	średnia	fraktyl 80%	fraktyl 90%	fraktyl 95%
Mieszkanie	234	780	948	1085	1217
Szpital (pokój)	69	230	280	320	359
Hotel (pokój)	93	310	377	431	484
Biblioteka	450	1500	1824	2087	2340
Biuro (standardowe)	126	420	511	584	655
Sala lekcyjna	85,5	285	347	397	445
Centrum sklepowe	180	600	730	835	936
Teatr (kino)	90	300	365	417	468
Komunikacja (przestrzeń publiczna)	30	100	122	139	156

4.2 Typy pożarów

Kolejnym pytaniem, na jakie należy znaleźć odpowiedź, jest określenie jaka wielkość całkowitego obciążenia ogniowego spali się podczas pożaru i jaki będzie to miało wpływ na krzywą temperatura–czas występującą w przyjętym scenariuszu.

Pożary nigdy (za wyjątkiem podpalenia lub eksplozji, które nie są tematem tych badań) nie rozpoczynają się w tym samym czasie w całej strefie. Pożar powstaje zawsze jako pożar lokalny, który przekształca się w duży pożar w zależności od szeregu warunków. Główne różnice między pożarem lokalnym i w pełni rozwiniętym wyszczególnione zostały w tabelicy 4.3.

Tabela 4.3 Różnice między pożarami lokalnym i całkowicie rozwiniętym		
	Obciążenie ogniowe	Temperatura gazów
Pożar lokalny	Tylko w części strefy	Dwie strefy (dwie krzywe temperatura–czas)
Pożar w pełni rozwinięty	Równomiernie rozłożone w całej strefie	Jedna strefa (jedna krzywa temperatura–czas)

W sytuacji w której cała strefa jest ogarnięta przez pożar, zakłada się jednorodną temperaturę gazu. Przy całkowicie rozwiniętym pożarze całe obciążenie ogniowe pali się, więc cała strefa jest wypełniona dymem, produktami spalania i powietrzem, które mieszają się ze sobą tak dobrze, że gaz w całej strefie

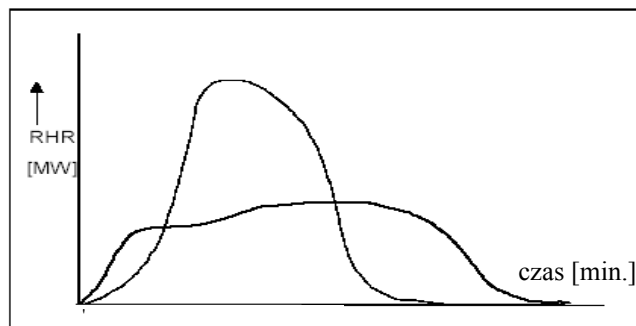
można uważać za jednorodny i reprezentowany przez jedną wartość temperatury. Metoda, która pozwala na określenie krzywych temperatura–czas (T-t) i stosowanych przy analizie zachowania się konstrukcji w przypadku pożarów lokalnych i całkowicie rozwiniętych, jest opisana szczegółowo w rozdziale 6.

4.3 Pożar obliczeniowy

Po scharakteryzowaniu wartości obciążenia ogniowego należy określić szybkość jego spalania. To prowadzi do określenia RHR (szybkości wydzielania ciepła).

4.3.1 Pożary kontrolowane przez paliwo lub wentylację

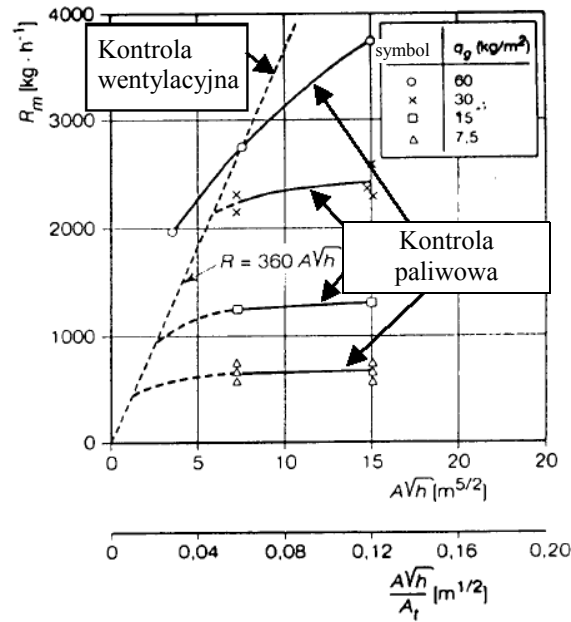
Obciążenie ogniowe określa wielkość dostępnej energii, jednak temperatura gazu w trakcie pożaru zależy od RHR (szybkości wydzielania ciepła). To samo obciążenie ogniowe spalające się bardzo szybko lub tępiące się może prowadzić do uzyskania całkowicie odmiennych krzywych temperatury gazu.



Rysunek 4.1 Dwie krzywe RHR odpowiadające tym samym wielkościom obciążenia ogniowego, gdyż pola powierzchni ograniczone obiema krzywymi są równe

RHR jest źródłem wzrostu temperatury gazu i siłą odpowiedzialną za rozprzestrzenianie się gazu i dymu. Typowy pożar zaczyna się jako mały pożar, następnie przechodzi przez fazę wzrostu. W trakcie rozwoju pożaru mogą wystąpić dwie sytuacje w zależności od tego, czy w procesie wzrostu przez cały czas ilość tlenu była wystarczająca do podtrzymania spalania. Albo, gdy wielkość pożaru osiąga maksimum bez ograniczenia ilości tlenu. RHR jest ograniczona przez dostępne obciążenie ogniowe (**paliwowa kontrola pożaru**) albo, gdy wielkość otworów w obudowie przedziału jest zbyt mała, aby dopuścić do wnętrza wystarczającą ilość powietrza, RHR jest ograniczana dostępnością tlenu - pożar określa się wtedy jako **kontrolowany wentylacyjnie**. Zarówno pożary kontrolowane paliwowo jak i wentylacyjnie mogą przejść przez fazę rozgorzenia.

To ważne zjawisko, rozgorzenie, oznacza przejście z lokalnego pożaru do pożaru w pełni rozwiniętego, angażującego wszystkie odsłonięte powierzchnie palne w strefie. Dwa wspomniane tryby zostały przedstawione na rys. 4.2, który przedstawia wykresy szybkości palenia się w stosunku do parametru wentylacji $A_v \sqrt{h}$, gdzie A_v jest powierzchnią otworu a h wysokością otworu. Pokazano wykresy dla różnych gęstości obciążenia ogniowego. Poczynając od lewej strony rysunku w trybie kontroli wentylacyjnej widzimy, że ze wzrostem parametru wentylacji szybkość palenia się rośnie do wartości granicznej określanej przez gęstość obciążenia ogniowego, a następnie pozostaje w przybliżeniu stała (obszar kontroli paliwowa).



Rysunek 4.2 Masowa szybkość spalania dla różnych gęstości obciążenia ogniowego

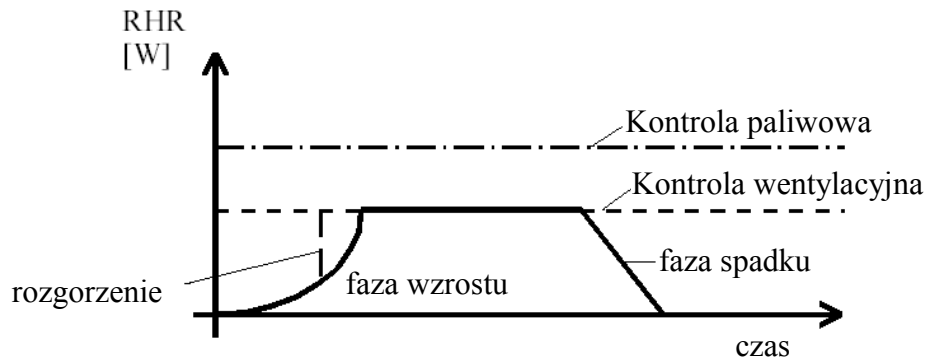
4.3.2 Obliczeniowe RHR

Wzrost szybkości wydzielania ciepła (RHR) do wartości maksymalnej (rys. 4.3) opisuje zależność (4.2):

$$RHR = \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (4.2)$$

gdzie:

- RHR = szybkość wydzielania ciepła podczas rozwoju pożaru (MW)
- t = czas (s)
- t_α = stała czasowa według rys. 4.4 (s)



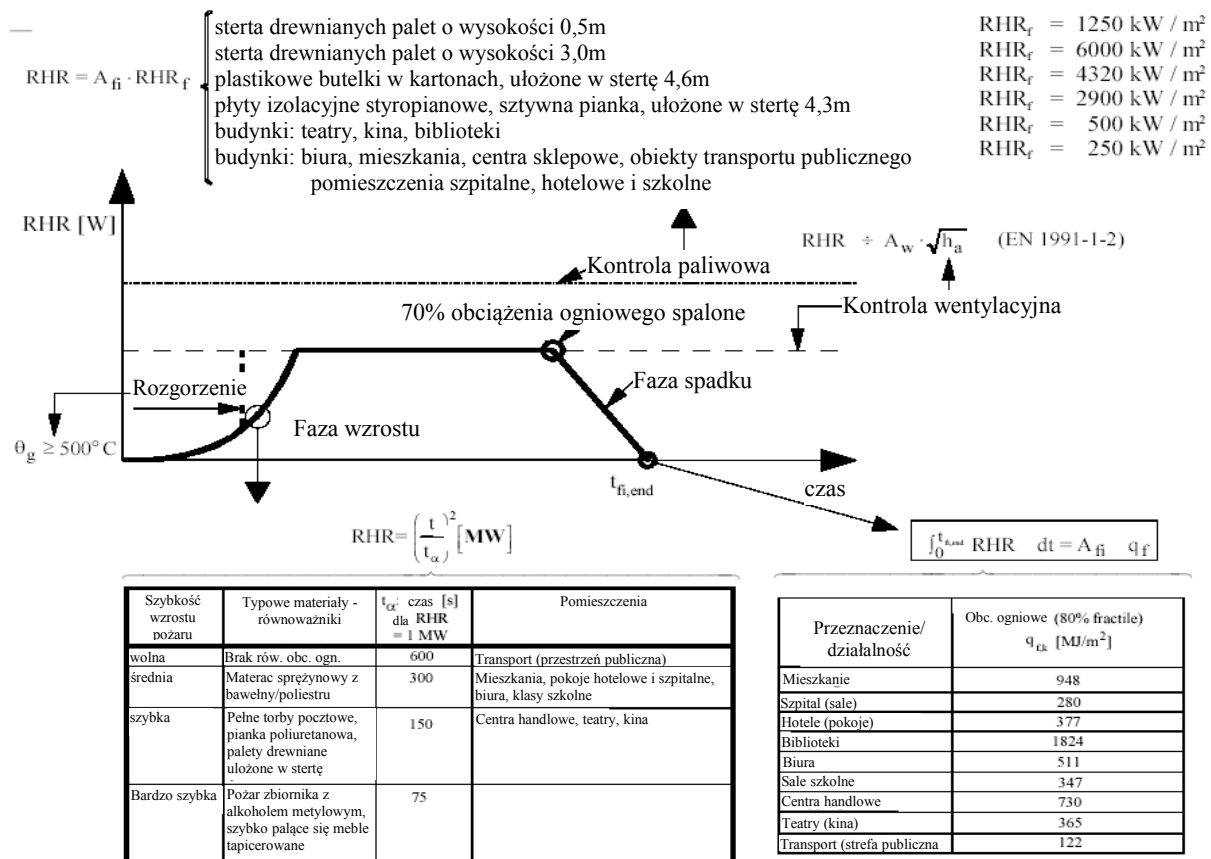
Rysunek 4.3 RHR w funkcji czasu

Rozróżnia się trzy fazy: wzrost, plateau [pożar ustabilizowany, po rozgorzeniu] i spadek. Parametry rozwoju pożaru podane w normach [1, 2] zmieniają się w zależności od typu budynku. Pewne wskazówki dotyczące klasyfikacji i określania tego parametru pokazano na rys. 4.4. Po fazie wzrostu

krzywa RHR biegnie po poziomym plateau, gdzie maksymalna wartość RHR odpowiada warunkom kontroli paliwowej (patrz rys. 4.4) lub kontroli wentylacyjnej.

W pozycjach [1, 2, 7] przyjmuje się, że w fazie zaniku spadek RHR następuje liniowo. Podaje się tam wzory na wyznaczenie początku i czasu trwania fazy spadku. Bazując na wynikach badań można przyjąć, że faza spadku rozpoczyna się, gdy spaleni ulegnie około 70% całości obciążenia ogniowego.

Na poniższym rysunku pokazano propozycję krzywej RHR dla projektu NFSC. Krzywa obejmuje fazę rozwoju, stan ustabilizowany i fazę zaniku.



Rysunek 4.4 Obliczeniowa krzywa RHR [1]

4.3.3 Dane eksperymentalne

Innym sposobem uzyskania krzywych RHR są badania doświadczalne. Techniki pomiaru RHR (poza bombą cieplną) stały się dostępne dopiero kilka lat temu, po opracowaniu zasady kalymetrii zużycia tlenu. Wcześniejsze próby wymagały bezpośrednich pomiarów odczuwalnej entalpii, których poprawne wykonanie jest bardzo trudne. Natomiast technika zużycia tlenu pozwala na proste i dokładne wykonanie tych pomiarów. Zasada zużycia tlenu stwierdza, że w ramach niewielkiego pasma niepewności ciepło uwolnione na skutek spalania jakiegokolwiek typowego materiału palnego jest jednoznacznie powiązane z masą tlenu usuniętą ze strumienia spalania [6]. Technika ta była już stosowana i pozwoliła na wygenerowanie bazy danych wyników testów. Dane dotyczące wartości RHR dostępne są w różnych źródłach [3, 4, 5, 6].

Dwustrefowy model symulacyjny Hazarda [5] obejmuje bazę danych zawierającą informacje o różnych przedmiotach, m.in. o ich RHR. Przedmioty te zasadniczo można znaleźć w domach, są to np. krzesła, telewizory, choinki. Stanowi to niewątpliwie ograniczenie w stosowaniu tej bazy, choć w swojej

dziedzinie jest ona bardzo dobrym źródłem informacji, gdyż zawiera wszystkie fazy krzywej RHR. Argos [4] jest kolejną bazą danych, jaką można znaleźć w obrębie programu symulacji pożaru. Baza ta podaje różne równania dla pożaru materiałów stałych, materiałów topliwych, materiałów płynnych i tłących się pożarów. Równania te definiują RHR jako funkcję prędkości rozprzestrzeniania się pożaru w kierunku poziomym i pionowym. Baza Argos podaje numeryczne wartości dla różnych materiałów i przedmiotów. Dokument „Początkowe Pożary” opracowany na Uniwersytecie w Lund [3] jest kolejnym źródłem informacji o wynikach testów pożarowych. Ma on ten sam format co baza danych Hazard, ale zawiera więcej wyników. W tym dokumencie można znaleźć informacje nie tylko o przedmiotach użytku domowego ale również innych, jak na przykład o różnych typach pojazdów. CTICM we Francji przeprowadziło pożarowe testy na nowych samochodach (wyprodukowanych w 1996 r.) [9], w pokojach hotelowych i na prawdziwych meblach, związane z pomiarem RHR. Otrzymane dane eksperymentalne są bardzo interesujące, ponieważ większość dotychczasowych testów pożarowych opisanych w literaturze przeprowadzono przy użyciu drewnianych palet [kaszyc] jako paliwa.

5. ASPEKT PROBABILISTYCZNY

5.1 Wstęp

Prawdopodobieństwo wybuchu pożaru na basenie jest dużo mniejsze niż w lakierni. Prawdopodobieństwo rozprzestrzenienia się pożaru i objęcia całej strefy zależy od powierzchni strefy oraz od występowania środków czynnej ochrony ppoż. takich jak urządzenia tryskaczowe, automatyczne detektory dymu i ciepła, automatyczny przekaz sygnału alarmowego do straży pożarnej i jej interwencja.

Różne projekty badawcze ECSC [11, 18] umożliwiły zebranie statystyk i określenie prawdopodobieństwa:

- powstania pożaru,
- niepowodzenia gaszenia pożaru przez użytkowników,
- niepowodzenia gaszenia pożaru przez automatyczne czynne środki zwalczania pożaru (tryskacze),
- niepowodzenia gaszenia pożaru przez straż pożarną.

Prawdopodobieństwo pomyślnej interwencji straży pożarnej zależy głównie od czasu do momentu wykrycia pożaru (automatyczne wykrycie pożaru przez detektory dymu lub ciepła) oraz czasu dotarcia do budynku (automatyczny przekaz informacji o alarmie i odległość budynku od remizy strażackiej).

Korzystając z tych prawdopodobieństw, możemy określić współczynnik obciążenia ogniowego γ_{qf} przy pomocy procedury opartej na Załączniku C normy EN 1990 [10] i obliczeń niezawodności. Procedura ta omówiona została w podrozdziale 5.4. Współczynnik γ_{qf} został podzielony na trzy współczynniki δ_{q1} , δ_{q2} , δ_{ni} uwzględniające odpowiednio wielkość strefy, typ budynku i sposoby czynnej ochrony ppoż. Charakterystyczną wartością gęstości obciążenia ogniowego $q_{f,k}$ należy pomnożyć przez $\gamma_{qf} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{ni} \cdot m$ aby uzyskać obliczeniową wartość gęstości obciążenia ogniowego $q_{f,d}$. Obliczeniowa wartość gęstości obciążenia ogniowego $q_{f,d}$ jest wykorzystywana w narzędziach "Naturalne modele pożarowe" (patrz następny rozdział 6) do obliczania naturalnego obliczeniowego ogrzania pożarowego.

5.2 Statystyki

Poniższa analiza statystyczna bazuje na następujących danych [11]:

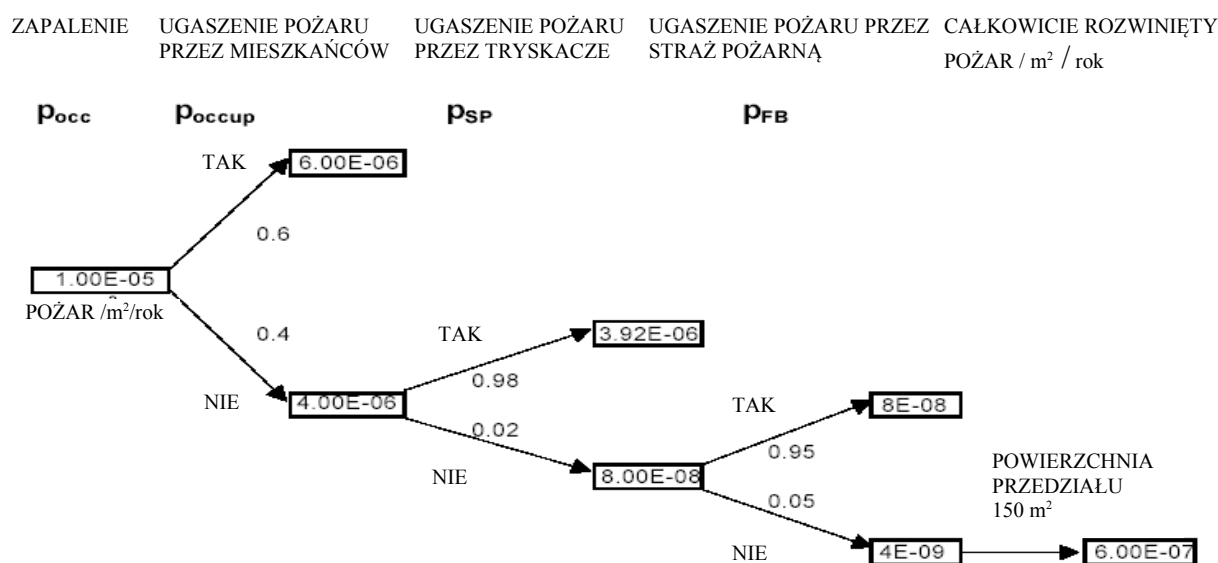
- Szwajcaria: szczegółowe informacje i analizy wszystkich pożarów (około 40.000 pożarów) powodujących zniszczenia o wartości ponad 1.000.000 CHF w Bernie w latach 1986-1995;
- Francja: pożary w budynkach przemysłowych między styczniem 1983 a lutym 1984; wszystkie interwencje straży pożarnej w roku 1995 (3.253.855 interwencji z których 312.910 dotyczyło pożarów);
- Holandia: pożary w budynkach przemysłowych między styczniem 1983 a styczniem 1985;
- Finlandia: wszystkie pożary budynków w 1995 r. (2.109 pożarów przy całkowitej liczbie budynków wynoszącej 1.150.494). W ramach projektu [18] uzyskano dodatkowe wyniki dla Finlandii bazujące

na połączonych informacjach pochodzących z krajowej statystycznej bazy pożarowej PRONTO Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i innych krajowych baz statystycznych dotyczące lat 1996-1999;
 – Luksemburg: raporty straży pożarnej z lat 1995 i 1997;
 i danych międzynarodowych z różnych źródeł dotyczących bezpieczeństwa pożarowego, mianowicie efektywności urządzeń tryskaczowych. Bazy danych dotyczących skutków działania tryskaczy zestawiono lub zebrano z USA, Finlandii, Niemiec, Francji, Australii i Wielkiej Brytanii [13]. Poniższe statystyki dotyczą głównie budynków mieszkalnych, biurowych i przemysłowych i zostały przyjęte do opracowania procedury. Procedura została rozszerzona na inne budynki przez zastosowanie współczynnika δ_{q1} podanego w tabelicy 5.6.

5.3 Prawdopodobieństwa

5.3.1 Analiza drzewa zdarzeń

Można zbudować drzewo zdarzeń (patrz rys. 5.1) od początku pożaru aby opisać jego rozwój, używając zalecanych wartości domyślnych z Tabelicy 5.1.



Rysunek 5.1 Przykład drzewa zdarzeń dla rozwoju pożaru w biurze o powierzchni przedziału 150 m²

		mieszkanie	biuro	przemysłowy
wystąpienie pożaru [1/(m ² rok)]	p_{occ}	$30 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
pożar ugaszony przez użytkowników	p_{occup}	0,75	0,60	0,45
pożar ugaszony przez system tryskaczy	p_{sp}	patrz tablica 5.5		
pożar ugaszony przez standardową straż pożarną	p_{fb}	0,90 – 0,95	0,90 – 0,95	0,80 – 0,90

5.3.2 Występowanie pożarów i ich rozwój

Prawdopodobieństwo wystąpienia w ciągu roku poważnego pożaru zdolnego do zagrożenia stabilności konstrukcji może być wyrażona wzorem (5.1):

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot A_{fi} \cdot p_4 \quad (5.1)$$

gdzie:

p_1 : prawdopodobieństwo poważnego pożaru zawierające efekty interwencji użytkowników i standardowej publicznej straży pożarnej (na każdy m² powierzchni podłogi i na rok);

p_2 : dodatkowy czynnik redukujący uzależniony od rodzaju straży pożarnej i czasu upływającego między alarmem i interwencją;

p_3 : czynnik redukcyjny w przypadku gdy zainstalowane są automatyczne detektory pożarowe (dymu i ciepła) i/lub automatyczny system powiadamiania o pożarze;

p_4 : czynnik redukcyjny jeśli występuje system urządzeń tryskaczowych (p_4 jest również prawdopodobieństwem uwzględniającym nieugaszenie pożaru przez tryskacze);

A_{fi} : pole powierzchni strefy pożarowej.

Uwaga: Współczynnik p_1 uwzględnia działania użytkowników i publicznej straży pożarnej w ramach powstrzymywania rozwoju pożaru lokalnego do rozmiarów pożaru w pełni rozwiniętego i nie należy go mylić z częstotliwością występowania pożarów.

Wpływy typów brygad strażackich, czasu między ogłoszeniem alarmu pożarowego a interwencją straży pożarnej, automatycznego wykrywania pożaru i powiadamiania o nim (p_2 , p_3) nie są uwzględnione w tabeli 5.1; p_1 w tabeli 5.2 odpowiada $p_{occ} \cdot (1 - p_{occup}) \cdot (1 - p_{FB})$.

Zgodnie z [11, 18] poniższe wartości są rekomendowane dla p_1 , p_2 , p_3 i p_4 .

Tabela 5.2 Częstotliwość występowania pożarów i ich rozwoju do poziomu w pełni rozwiniętego pożaru z uwzględnieniem interwencji standardowej publicznej straży pożarnej	
użytkownicy/działalność	$p_1 [10^{-7} / (m^2 \cdot rok)]$
Biuro	2,0 – 4,0
Mieszkanie	4,0 – 9,0
Przemysł	5,0 – 10,0

Tabela 5.3 Dodatkowy współczynnik redukcyjny zależny od typu straży pożarnej i czasu między alarmem a interwencją strażaków			
p_2	Czas między alarmem a interwencją strażaków		
	$\leq 10'$	$10' < t \leq 20'$	$20' < t \leq 30'$
Typ straży pożarnej			
Profesjonalna	0,05	0,10	0,20
Amatorska	0,10	0,20	1,00

Tabela 5.4 Redukcyjny współczynnik dla automatycznej detekcji dymu i ciepła oraz automatycznego powiadamiania o pożarze straży pożarnej	
Środki aktywne	p_3
Czujniki dymu	0,0625
Czujniki ciepła	0,2500
Automatyczne powiadamianie o pożarze straży pożarnej	0,2500

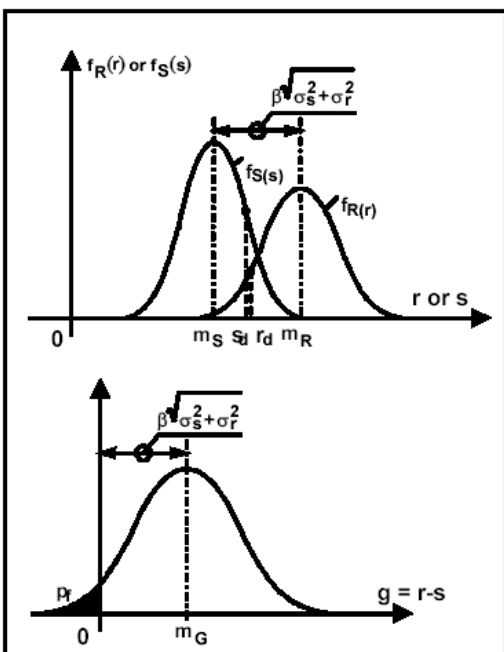
Tablica 5.5 Redukcyjny współczynnik dla systemu urządzeń tryskaczowych	
Typ tryskaczy	p_f
Standardowy (np. spełniające przepisy)	0,020
Wysoki standard (np. elektronicznie sprawdzane zawory, dwa niezależne źródła wody)	0,010 – 0,005
Niski standard (np. niezgodne z przepisami)	$\geq 0,050$

5.4 Procedura

5.4.1 Określanie obliczeniowych wartości oddziaływania i odporności – współczynniki bezpieczeństwa γ według Eurokodów – zasady dla normalnych warunków użytkowania

Odporność R i oddziaływanie S są zależne od statystycznych rozkładów, które są zdefiniowane przez standardowe odchylenia (σ_S, σ_R) i średnie (m_S, m_R). Aby zapewnić dostateczne bezpieczeństwo konieczne jest, aby zniszczenie ($S > R$) występowało jedynie z bardzo małym prawdopodobieństwem p_f przedstawianym przez zakreskowany obszar (patrz rys. 5.2). Obszar ten można zmierzyć przy pomocy indeksu bezpieczeństwa β .

Eurokody w normalnych warunkach wymagają maksymalnego prawdopodobieństwa zniszczenia na poziomie $p_f = 7,23 \cdot 10^{-5}$ dla całego okresu użytkowania budynku, który odpowiada indeksowi bezpieczeństwa $\beta_i = 3,8$.



$$p_f \leq p_i (= 7,23 \cdot 10^{-5}) \rightarrow \beta > \beta_i (= 3,8)$$

$$m_R - m_S \geq \beta \sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2} = \beta \frac{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}}$$

$$\Rightarrow m_R - \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}} \beta \sigma_R \geq m_S - \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_S^2 - \sigma_R^2}} \beta \sigma_S$$

$$\Rightarrow r_d \geq s_d$$

Rysunek 5.2 Podejście probabilistyczne

Wartości obliczeniowe dwóch zmiennych S (oddziaływanie) i R (odporność) podano odpowiednio jako s_d i r_d . Istnieje jednak wiele oddziaływań (ciężar własny, obciążenie zmienne, śnieg, wiatr, trzęsienie ziemi, pożar), i wiele odporności (wytrzymałość betonu na ściskanie, granica plastyczności kształtowników stalowych, prętów zbrojeniowych).

W związku z tym problem jest o wiele bardziej złożony niż porównanie dwóch zmiennych statystycznych. Dlatego właśnie Eurokody przyjęły pół-probabilistyczne podejście bazujące na metodzie FORM – metoda niezawodności pierwszego rzędu. To uproszczenie w Eurokodzie polega na przyjęciu:

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = 0,8 \quad \text{dla odporności} \quad (5.2)$$

$$\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = (-0,7) \text{ dla głównego oddziaływania i } (-0,28) \text{ dla drugorzędnego oddziaływania} \quad (5.3)$$

$$\Rightarrow s_{d,i} = \text{obliczeniowa wartość} = m_{S,i} + 0,7 \beta \sigma_{S,i}$$

$$\Rightarrow r_{d,i} = \text{obliczeniowa wartość} = m_{R,i} - 0,8 \beta \sigma_{R,i}$$

Rozważając wartości stałe dla wagowych współczynników $\alpha_{s,i}$ obliczeniowe wartości $s_{d,i}$ dla oddziaływań mogą być zdefiniowane bez odnoszenia się do odporności, ponieważ te obliczeniowe wartości zależą tylko od współczynnika bezpieczeństwa β , z średnim i standardowym odchyleniem odpowiadającym statystycznemu rozkładowi oraz oczywiście od rodzaju rozkładu (patrz wzór na rys. 5.2 [10]).

Obliczeniowe wartości $s_{d,i}$ oddziaływań są więc wartościami działań które muszą być uwzględnione żeby uzyskać wymagane bezpieczeństwo. Jeśli $\beta_t = 3,8$ tak jak w Eurokodzie, oznacza to, że ryzyko zniszczenia jest równe $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$ w czasie całego okresu użytkowania budynku. Dlatego dla każdego oddziaływania możliwe jest określenie współczynnika bezpieczeństwa γ , który jest wyrażony przez zależność (5.4):

$$\gamma = \frac{S_d}{S_k} \quad (5.4)$$

W ten sposób możemy znaleźć współczynniki bezpieczeństwa podane w Eurokodach: po stronie oddziaływań 1,35 i 1,50 dla ciężaru własnego oraz dodatkowego obciążenia; po stronie odporności 1,0, 1,15 i 1,5 odpowiednio dla konstrukcji stalowych, prętów zbrojeniowych i betonu [1, 16, 20, 24].

Poniżej podano jako przykład obliczenie γ_s wynoszącego 1,15 dla prętów zbrojeniowych [20]:

- $\beta = 3,8, \alpha_a = 0,8$
- prawo statystyczne: rozkład logarytmiczny,
- wariacyjne współczynniki $\left(= \frac{\sigma}{m} \right)$:
 - $V_R =$ wariacyjny współczynnik dla obliczeniowej wartości $= \sqrt{V_G^2 + V_m^2 + V_f^2} = 0,087$
 - $V_m =$ wariacyjny współczynnik niepewności modelu $= 0,05$
 - $V_G =$ wariacyjny współczynnik dla geometrii elementu $= 0,05$
 - $V_f =$ wariacyjny współczynnik dla mechanicznych właściwości $= 0,05$
- wartość obliczeniowa: $X_d = m_X e^{(-\alpha_R \beta V_R)} = m_X e^{(-0,8 \beta V_R)}$
- wartość charakterystyczna: $X_k = m_X e^{(-k V_f)}$ z $k=1,645$ odpowiadającemu 5% fraktyli
- współczynnik bezpieczeństwa: $\gamma_s = \frac{X_k}{X_d} = e^{(0,8 \beta V_R - k V_f)} = e^{(0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,087 - 1,645 \cdot 0,05)} = 1,198$

5.4.2 Wartość docelowa

Założenie docelowego prawdopodobieństwa zniszczenia na poziomie $p_t = 7,23 \cdot 10^{-5}$ dla całego okresu użytkowania budynku (tj. $1,3 \cdot 10^{-6}$ na rok) jest zdefiniowane w EN 1990 [10]. Wymagania bezpieczeństwa na poziomie $\beta > 3,8$ dla stanów granicznych nośności w normalnych warunkach, przyjęto również dla odporności ogniowej konstrukcji. W rzeczywistości wymagania bezpieczeństwa pożarowego mogą być zróżnicowane. Taka koncepcja została przedstawiona w końcowym raporcie [11] (rozdział 2.8 Aneksu B części WP5), gdzie zaproponowano wykorzystanie docelowego prawdopodobieństwa zniszczenia p_t [1/rok] uzależnionego od ewakuacji ludzi:

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-4}$ dla normalnej ewakuacji

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-5}$ dla utrudnionej ewakuacji (szpitale, itp.)

$p_t = 1,3 \cdot 10^{-6}$ dla braku możliwości ewakuacji (np. budynki wysokościowe).

Prowadzić to może do przyszłych interesujących ulepszeń, jednak zdecydowano się utrzymać wartości podane w EN 1990 [10], przyjęte przez wszystkich. Niemniej jednak, powinna być kontynuowana dyskusja, aby przekonać władze do przyjęcia nowych niższych wartości docelowych.

5.4.3 Projektowanie ogniowe i prawdopodobieństwo warunkowe

Załącznik C normy EN 1990 [10], opisujący pół-probabilistyczną koncepcję prowadzącą do uzyskania obliczeniowych wartości dla oddziaływań i właściwości materiałów, został rozszerzony na odporność ogniową konstrukcji.

W pokojowej temperaturze współczynniki bezpieczeństwa dla oddziaływań $\gamma_{S,i}$ i właściwości materiałów $\gamma_{R,i}$ zostały ustalone przy pomocy podejścia pół-probabilistycznego zakładającego domyślnie, że prawdopodobieństwo zniszczenia konstrukcji p_f jest mniejsze niż docelowe prawdopodobieństwo zniszczenia $p_f = 7,23 \cdot 10^{-5}$ w trakcie użytkowania budynku, które odpowiada współczynnikowi bezpieczeństwa $\beta_t = 3,8$:

$$p_f(\text{prawdopodobieństwo zniszczenia}) \leq p_t(\text{docelowe prawdopodobieństwo}) \quad (5.5)$$

W przypadku pożaru głównym oddziaływaniem jest ogień, który mierzony jest wielkością obciążenia ogniowego wyrażonego w kilogramach drewna lub w MJ. Jednak to obciążenie ogniowe staje się rzeczywistym oddziaływaniem na konstrukcję tylko w razie pożaru.

Obciążenie ogniowe oddziałuje na konstrukcję tylko z określonym prawdopodobieństwem p_{fi} będącym iloczynem p_{start} (prawdopodobieństwo powstania pożaru) i p_{spread} (prawdopodobieństwo, że ten pożar rozgorzeje lub rozprzestrzeni się na całą strefę pożarową).

Jeśli rozpatrujemy pożar jako oddziaływanie przypadkowe, równanie (5.5) uzyskuje następującą postać:

$p_{f,fi}$ (prawdopodobieństwo zniszczenia w razie pożaru) \times p_{fi} (prawdopodobieństwo pożaru) $\leq p_t$ (prawdopodobieństwo docelowe), co można zapisać:

$$p_{f,fi} \leq (p_t / p_{fi})$$

$$p_{f,fi} \leq (p_t / p_{fi}) \quad \Rightarrow \quad \beta_{f,fi} \geq \beta_{fi,t} \quad (5.6)$$

Podczas gdy docelowa wartość $p_f = 7,23 \cdot 10^{-5}$ prowadzi do stałego współczynnika bezpieczeństwa β_t dla temperatury pokojowej, nie ma z góry ustalonej wartości wskaźnika bezpieczeństwa (zwanego $\beta_{fi,t}$ w razie pożaru) w przypadku pożaru, ponieważ wartość docelowa $p_{t,fi}$ zależy poprzez równanie (5.6) od prawdopodobieństwa pożaru p_{fi} . Znając $\beta_{fi,t}$, można określić obliczeniową wartość obciążenia ogniowego jak to wyjaśniono poniżej.

5.4.4 Obliczeniowe obciążenie ogniowe i współczynnik δ

Obliczenia niezawodności (patrz rozdział 7.4 w [11]) pokazują, że wagowy współczynnik dla głównego oddziaływania w pokojowej temperaturze jest znacznie zredukowany w przypadku pożaru i w związku z tym może ono być uznane za oddziaływanie drugorzędne, podczas gdy obciążenie ogniowe staje się głównym oddziaływaniem. Ponadto obliczenia te wykazały, że założona wartość współczynnika wagowego (-0,7) dla oddziaływania głównego powinna zostać zmodyfikowana i że dla α_{qf} należy wybrać wartość (-0,9).

Według gęstości obciążeń ogniowych podanych w brytyjskim dokumencie „The Application of Fire Safety Engineering Principles to the Safety in Buildings” [Zastosowanie zasad projektowania bezpieczeństwa ogniowego do bezpieczeństwa budynków] [14] i w analizie prof. Fontany [15], dane dotyczące obciążeń ogniowych wpasowują się dobrze w rozkład Gumbela pierwszego rzędu. Wybrano współczynnik wariacyjny V_{qf} równy 0,3 [11].

Według [10] obliczeniowa wartość (patrz obciążenia zmienne) dla rozkładu Gumbela jest określona równaniem:

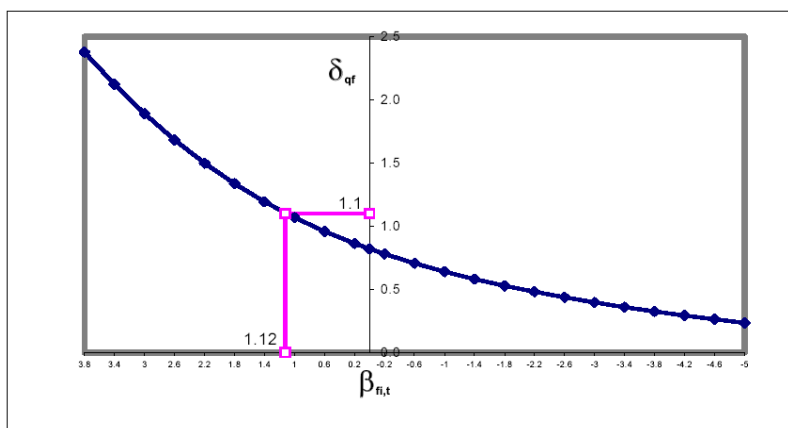
$$q_{f,d} = m_{qf} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} [0,577 + \ln(-\ln \phi(0,9 \beta_{fi,t}))] \right\} \quad (5.7)$$

gdzie: m_{qf} jest średnią wartością obciążenia ogniowego, ϕ jest funkcją rozkładu normalnego.

Zgodnie z sugestią wysuniętą w [16] uwzględniono współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_{SD} = 1,05$ dla modelu do obliczania skutków oddziaływania. Wybierając charakterystyczną wartość q_{fk} 80% fraktyla (patrz załącznik E z EN 1991-1-2 [1] i [11]) współczynnik δ_{qf} wynosi:

$$q_{f,d} = 1,05 \frac{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} [0,577 + \ln(-\ln \phi(0,9 \beta_{fi,t}))] \right\}}{\left\{ 1 - \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{qf} [0,577 + \ln(-\ln 0,8)] \right\}} = \begin{matrix} 2,38 & \text{dla } \beta = 3,8 \\ 0,82 & \text{dla } \beta = 0,0 \end{matrix} \quad (5.8)$$

Rozwinięcie δ_{qf} w funkcji $\beta_{fi,t}$ pokazano na rys. 5.3.



Rysunek 5.3 Współczynnik bezpieczeństwa δ_{qf} w funkcji $\beta_{fi,t}$

Indeks bezpieczeństwa $\beta_{fi,t}$ może być obliczony z prawdopodobieństwa wystąpienia poważnego pożaru p_{fi} przy pomocy następującego wzoru:

$$\beta_{fi,t} = \phi^{-1} \left(\frac{p_t}{p_{fi}} \right) = \phi^{-1} \left(\frac{7,23 \cdot 10^{-5}}{p_{fi}} \right)$$

gdzie ϕ^{-1} jest to odwrotność dystrybuanty rozkładu normalnego.

Rysunek 5.3 umożliwia więc określenie współczynnika δ_{qf} dla obciążenia ogniowego. Ta ogólna procedura wymaga:

- określenia prawdopodobieństwa wystąpienia poważnego pożaru p_{fi} ,
- obliczenia stosunku (p_t / p_{fi}) ,
- określenia indeksu docelowej niezawodności $\beta_{fi,t}$,
- określenia współczynnika δ_{qf} .

Podejście to zostało zróżnicowane poprzez rozbięcie współczynnika δ_{qf} na trzy współczynniki δ_{q1} , δ_{q2} , i δ_{qn} . Pozwala to nam uwzględnić przy określaniu p_{fi} wpływ odpowiednio wielkości strefy, ryzyka wzniesienia pożaru i środków czynnej walki z pożarem (patrz tablica 5.6).

Tablica 5.6 Zestawienie współczynników δ [1]											
Powierzchnia podłogi strefy A_f [m ²]			Niebezpieczeństwo pojawienia się pożaru δ_{q1}		Niebezpieczeństwo pojawienia się pożaru δ_{q2}		Przykłady sposobów użytkowania				
25			1,10		0,78		galeria sztuki, muzeum, basen				
250			1,50		1,00		biura, mieszkanie, hotel, przemysł papierniczy				
2500			1,90		1,22		fabryki maszyn i silników				
5000			2,00		1,44		laboratorium chemiczne, warsztat malarski				
10000			2,13		1,66		fabryki sztucznych ogni lub farb				
δ_{ni} - wartości charakteryzujące czynne środki ochrony przeciwpożarowej											
Stałe automatyczne urządzenia gaśnicze			Samoczynne wykrywanie pożaru			Gaszenie pożaru siłami ludzkimi					
Samoczynne urządzenia gaśnicze wodne	Niezależne zaopatrzenie w wodę			Samoczynna detekcja pożaru i alarm pożarowy		Samoczynna transmisja alarmu pożarowego do straży pożarnej	Zakładowa zawodowa straż pożarna	Zewnętrzna publiczna straż pożarna	Bezpieczne pożarowe drogi dostępu	Urządzenia przeciwpożarowe	System oddymiania
	0	1	2	poprzez detekcję ciepła	poprzez detekcję dymu						
δ_{n1}	δ_{n2}			δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 lub 0,73		0,87	0,61 lub 0,78		0,9 lub 1,0 lub 1,5	1,0 lub 1,5	1,0 lub 1,5

*przy normalnych środkach ochrony ppoż., w odniesieniu do których zalecane jest, by niemal zawsze były obecne, takich jak bezpieczne pożarowe drogi dostępu, urządzenia przeciwpożarowe i systemy odprowadzania dymu na klatkach schodowych, zaleca się, aby wartości δ_{ni} przyjmowano jako równe 1,0. Jednak jeżeli te środki ochrony przeciwpożarowej nie zostały przewidziane, zaleca się, aby odpowiednią wartość δ_{ni} przyjmowano jako równą 1,5.

Kiedy współczynniki δ_{q1} , δ_{q2} i δ_{ni} zostaną określone, obliczeniową wartość gęstości obciążenia ogniowego $q_{f,d}$ można wyliczyć z wzoru:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_{ni} \cdot q_{f,k}$$

Obliczeniowa gęstość obciążenia ogniowego jest wykorzystana przez narzędzia zaprezentowane w rozdziale 6.

6. OBLICZENIA ROZWOJU POŻARU

Wstęp

W ramach symulacji numerycznych rozwoju pożaru można wprowadzać różne uproszczenia. Niniejszy rozdział objaśnia modele odnoszące się do sytuacji przed rozgorzeniem (modele pożaru lokalnego i dwustrefowego) i po rozgorzeniu (całkowicie rozwinięty pożar). Modele obszarowe (CFD: Numeryczne modele mechaniki płynów) są wyłączone z tego rozdziału ze względu na to, że są zbyt skomplikowane i czasochłonne aby można było je stosować jako proste narzędzie.

6.1 Lokalny pożar

W przypadku lokalnego pożaru występuje nagromadzenie produktów spalania w warstwie poniżej sufitu (górną warstwę), oraz pozioma strefa styku pomiędzy gorącą górną warstwą a warstwą dolną, w której temperatura gazów pozostaje znacznie niższa.

Taką sytuację dobrze opisuje model dwustrefowy, użyteczny dla wszystkich sytuacji przed rozgorzeniem. Oprócz obliczeń rozwoju temperatury gazu, modele te są wykorzystywane do poznania rozprzestrzeniania się dymu w budynkach i do oszacowania poziomu bezpieczeństwa ludzi będącego funkcją wysokości warstwy dymu, koncentracji toksycznych gazów, strumienia radiacyjnego i optycznej gęstości. Termiczne oddziaływanie na poziome elementy zlokalizowane powyżej pożaru jest uzależnione także od ich odległości od pożaru. Można je oszacować przy pomocy specjalnych modeli do oceny lokalnego oddziaływania na sąsiadujące elementy, takich jak metody Heskestada lub Hasemiego [17].

6.1.1 Modele dwustrefowe

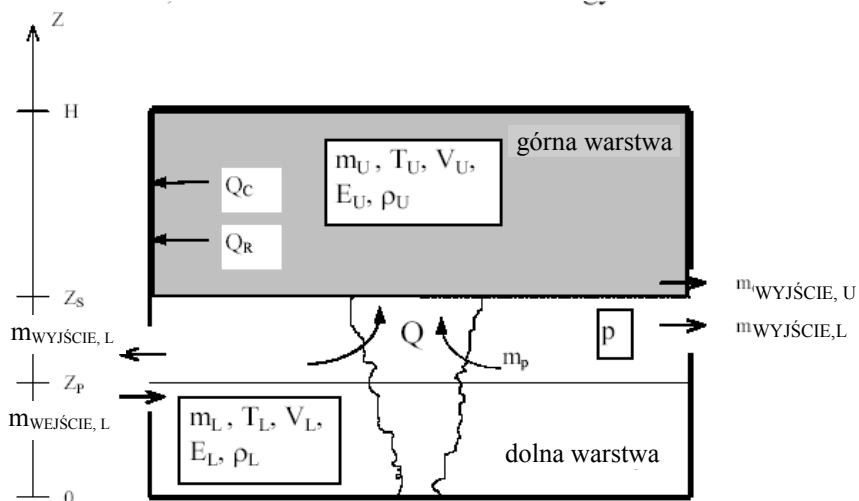
Strefowy model to nazwa nadana programom numerycznym, które obliczają rozwój temperatury gazów w funkcji czasu, wykorzystując zwykle równania różniczkowe wyrażające zachowanie masy i energii dla każdej strefy przedziału. Opierają się one na fundamentalnej hipotezie, że temperatura jest jednakowa w każdej strefie.

Modele strefowe dają nie tylko informację o rozwoju temperatury gazów w strefie, ale także informacje dodatkowe takie jak temperatura w ścianach czy prędkość wymiany gazów przez otwory.

Dane, które muszą być wprowadzone do modelu strefowego, są następujące:

- dane geometryczne, takie jak wymiary strefy, otworów i przegród,
- właściwości materiałów ścian,
- dane pożarowe, jak krzywa RHR, tempo rozkładu termicznego [pirolizy] i ciepło spalania paliwa.

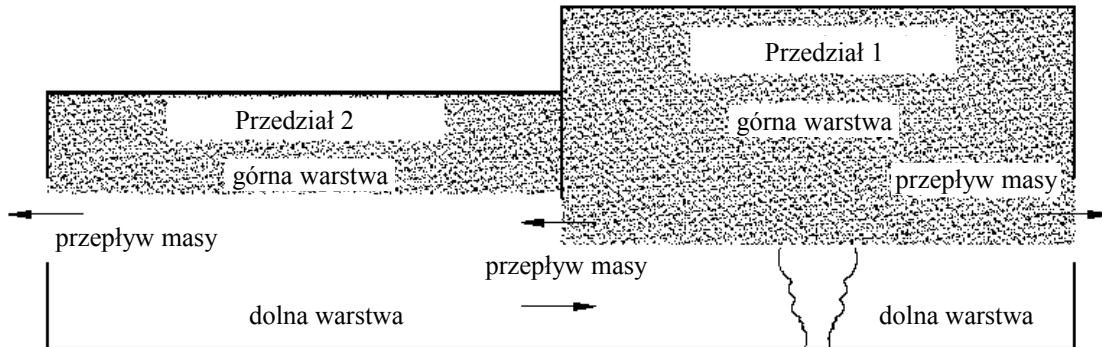
W dwustrefowym modelu równania wyrażające równowagę masy i energii są zapisane dla każdej z dwóch warstw, a wymiany pomiędzy dwiema warstwami uwzględniane są poprzez modele porywania powietrza. W wyniku symulacji otrzymujemy temperaturę gazów w każdej z dwóch warstw oraz informacje o temperaturze ścian i przepływie przez otwory. Ważnym rezultatem jest ewolucja grubości każdej z warstw w funkcji czasu. Grubość dolnej warstwy, która pozostaje w chłodniejszej temperaturze i która nie zawiera produktów spalania, jest bardzo istotna do oceny możliwości pozostawiania użytkowników w przedziale. rys. 6.1 pokazuje jak przedział jest modelowany przez dwustrefowy model, z pokazaniem różnych składników równowagi energii i masy.



Rysunek 6.1 Przedział w modelu dwustrefowym

Rysunek 6.1 jest typowy dla prostych sytuacji gdzie wymiana masy i energii w przedziale możliwa jest tylko ze środowiskiem zewnętrznym. Ten rodzaj modeli może być wykorzystywany do analizy bardziej

złożonych budynków, gdzie wymiana energii i masy z przedziału następuje ze środowiskiem zewnętrznym ale i z innymi przedziałami w budynku. Szczególne znaczenie ma analiza rozchodzenia się dymu z przedziału, z którego pochodzi, w kierunku przyległych przedziałów. Taka sytuacja, analizowana przez wielopredziałowe modele dwustrefowe, przedstawiona jest na rys. 6.2.



Rysunek 6.2 Przedział w wielopredziałowym modelu dwustrefowym

6.1.2 Metoda Heskestada

Oddziaływanie termiczne lokalnego pożaru można oszacować metodą Heskestada [1]. Należy wprowadzić różnice z uwagi na względną wysokość płomienia w stosunku do sufitu. Długość płomienia L_f lokalnego pożaru (rys. 6.3) jest określona wzorem:

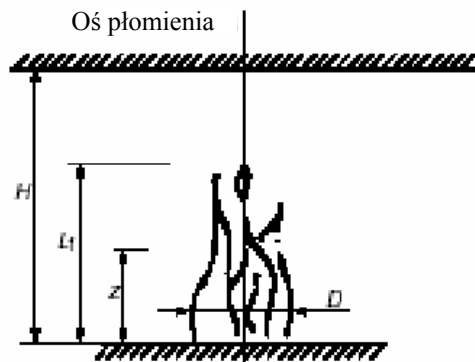
$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

Jeśli płomień nie sięga sufitu strefy ($L_f < H$; patrz rys. 6.3) lub w przypadku pożaru na otwartym powietrzu, temperatura $\Theta_{(z)}$ płomienia wzdłuż jego pionowej osi symetrii jest określona wzorem:

$$\Theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \leq 900$$

gdzie:

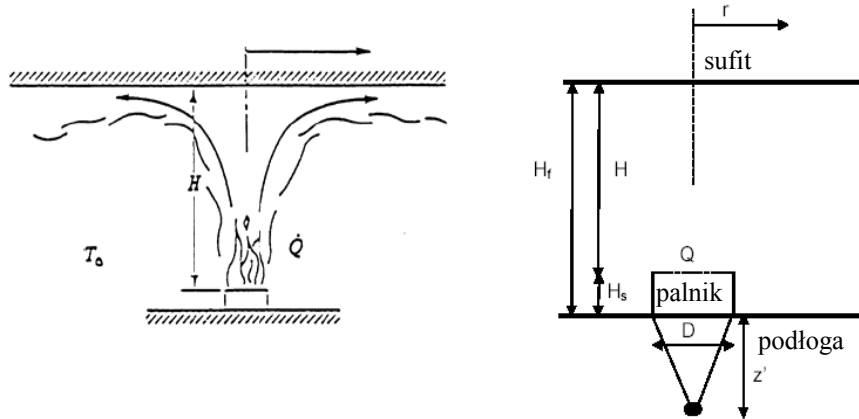
- D - jest średnicą pożaru [m], patrz rys. 6.3
- Q - jest szybkością wydzielania ciepła [W] przez pożar
- Q_c - jest częścią konwekcyjną szybkości wydzielania ciepła [W], domyślnie $Q_c = 0,8 Q$
- z - jest wysokością wzdłuż osi płomienia [m], (rys. 6.3)
- H - jest odległością [m] pomiędzy źródłem ognia i sufitem, patrz rys. 6.3



Rysunek 6.3 Model pożaru lokalnego, przypadek gdy płomień nie dotyka sufitu

6.1.3 Metoda Hasemiego [1, 17]

Metoda Hasemiego [1, 17] jest prostym narzędziem pozwalającym ocenić lokalny wpływ pożaru na poziome elementy usytuowane powyżej niego. Metoda bazuje na wynikach testów przeprowadzonych w Building Research Institute [Instytucie Badań Budowlanych] w mieście Tsukuba w Japonii.



Rysunek 6.4 Schemat pożaru lokalnego i opis pożaru wg Hasemi

Dane wykorzystywane w tej metodzie:

- Q - jest szybkością wydzielania ciepła [W] przez pożar,
- H_f - odległością pomiędzy podłogą i sufitem [m],
- D - jest średnicą (lub długością charakterystyczną) pożaru [m],
- H_s - odległość pionową pomiędzy podłogą a miejscem źródła pożaru [m].

Zmiennymi są:

- H - jest odległością [m] pomiędzy źródłem ognia i sufitem,
- Q^* - jest bezwymiarową szybkością wydzielania ciepła [-],
- Q_H^* - jest bezwymiarową szybkością wydzielania ciepła [-],
- z' - jest pionową pozycją wirtualnego źródła ciepła względem miejsca źródła pożaru [m],
- L_H - jest poziomą długością płomieni pod sufitem [m],
- r - jest poziomą odległością [na suficie, od środka pożaru] pomiędzy pionową osią ognia a punktem wzdłuż sufitu gdzie obliczany jest strumień termiczny [m].

Procedura jest następująca:

- obliczanie H $H = H_f - H_s$ (6.1)

- obliczanie Q^* $Q^* = \frac{Q}{1,11 \cdot 10^6 \cdot D^{2,5}}$ (6.2)

- obliczanie Q_H^* $Q_H^* = \frac{Q}{1,11 \cdot 10^6 H^{2,5}}$ (6.3)

- obliczanie z' $z' = 2,4 \cdot D \cdot (Q^{*2/5} - Q^{*2/3}) \quad Q^* < 1,00$ (6.4)

- $z' = 2,4 \cdot D \cdot (1,00 - Q^{*2/5}) \quad Q^* \geq 1,00$ (6.5)

- obliczanie $(L_H + H) / H$ $\frac{L_H + H}{H} = 2,90 \cdot Q^{*0,33}$ (6.6)

- obliczanie L_H na podstawie wartości obliczonej w poprzednim równaniu i z wartości H

- obliczanie wartości strumienia q'' [kW/m²] w odległości r zgodnie z :

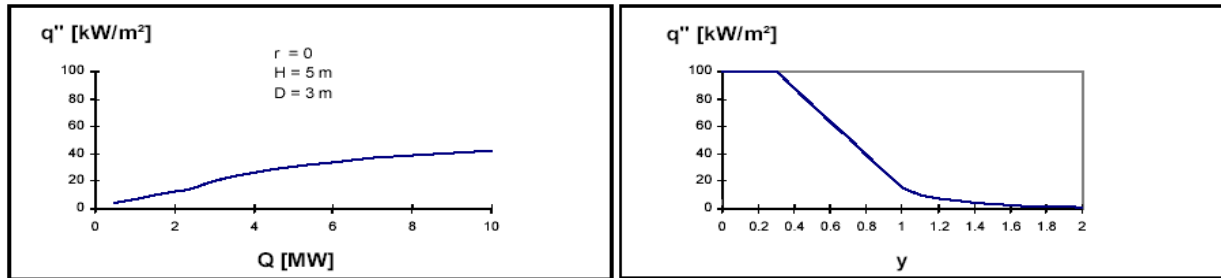
- $q'' = 100 \quad y < 0,30$ (6.7)

$$q'' = 136,30 - 121,00 \cdot y \quad y < 0,30 \quad (6.8)$$

$$q'' = 15 \cdot y^{-3,7} \quad y > 1,0 \quad (6.9)$$

-gdzie
$$y = \frac{r + H + z'}{L_H + H + z'} \quad (6.10)$$

Strumień q'' dochodzący do sufitu zmniejsza się jako funkcja y , a zwiększa się jako funkcja Q . Na rys. 6.5 jest to zobrazowane dla przypadku: $r = 0,0$ m, $H = 5,0$ m, $D = 3,0$ m.

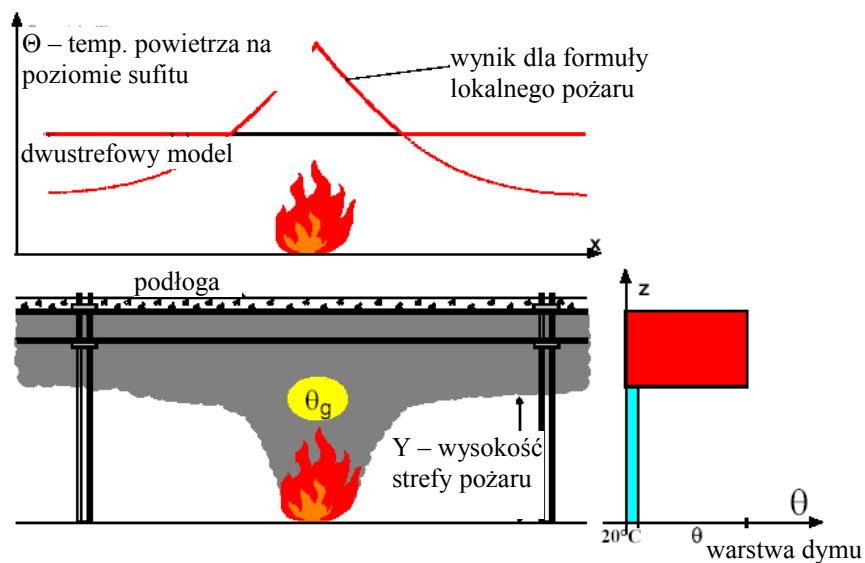


Rysunek 6.5 q'' jako funkcja parametru y i wielkości Q

6.1.4 Kombinacja dwustrefowego modelu z modelem pożaru lokalnego

W lokalnym pożarze rozkład temperatury gazów w strefie może być oszacowany przy pomocy modelu dwustrefowego. W modelu tym temperatura gazów w każdej warstwie jest wyznaczana wg hipotezy, że temperatura w obrębie każdej warstwy jest jednakowa. Taka średnia temperatura w strefie gorącej jest zazwyczaj wystarczająco dokładna dla rozpatrywanych zjawisk ogólnych: ilość dymu, którą trzeba usunąć ze strefy, prawdopodobieństwo rozgorzenia, całkowite zawalenie się dachu lub stropu, itp.

W przypadku oszacowywania lokalnego zachowania się elementów konstrukcyjnych umiejscowionych bezpośrednio nad miejscem pożaru, hipoteza jednakowej temperatury może nie być bezpieczna i dlatego dwustrefowe modele muszą być łączone z modelem pożaru lokalnego podanym w paragrafie 6.1.3. Temperatury w sąsiedztwie belek są uzyskiwane – dla każdego punktu wzdłuż belki – przyjmując najwyższą temperaturę przewidzianą dla każdego z modeli.



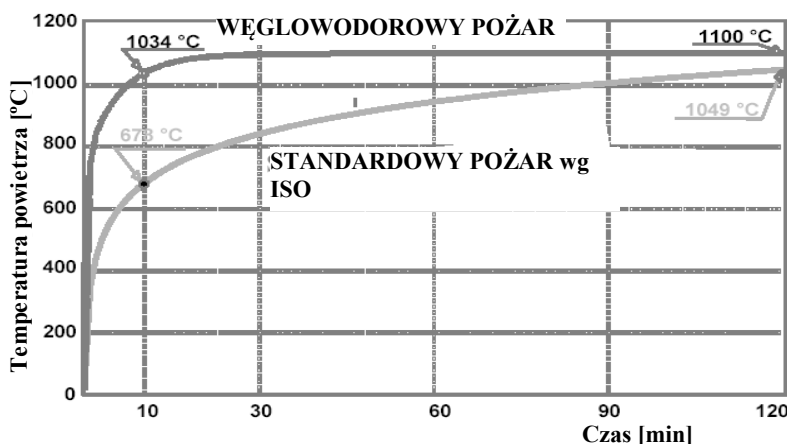
Rysunek 6.6 Kombinacja dwustrefowego modelu z modelem pożaru lokalnego

Wysokość strefy dymu i temperatury gorących gazów na poziomie konstrukcji stalowej w różnych odległościach od pożaru mogą być obliczane wg modelu TEFINAF [8]. Ten model łączy w sobie model dwustrefowy, który określa wysokość i średnią temperaturę strefy gorącej – z formułą pożaru lokalnego, która daje maksymalną temperaturę nad pożarem oraz w różnych odległościach od pożaru.

6.2 Całkowicie rozwinięty pożar

W celu zamodelowania pożaru całkowicie ogarniającego wnętrze budynku stosowane są różne modele. W tym rozdziale opisano kilka spośród najczęściej używanych.

Naturalna koncepcja pożaru jest alternatywą dla nominalnych pożarów zdefiniowanych w tradycyjnych kodach (ISO, krzywe węglowodorowe).



Rysunek 6.7 Standardowa i węglowodorowa krzywa pożarowa

W tym rozdziale nie uwzględniono modeli obszarowych (CFD). Są one zbyt złożone i wymagają zbyt wiele czasu i danych, aby można było je stosować jako proste narzędzie do projektowania technicznego.

6.2.1 Pożary parametryczne

Parametryczne pożary pozwalają w prosty sposób uwzględnić najbardziej istotne fizyczne zjawiska, które mają wpływ na rozwój pożaru w konkretnym budynku. Tak jak nominalne pożary, zawierają związki między czasem a temperaturą. Jednakże te zależności zawierają pewne parametry mające reprezentować konkretne aspekty rzeczywistości.

Niemal w każdym pożarze parametrycznym opisanym w literaturze wykorzystuje się w taki czy inny sposób następujące parametry:

- geometria strefy,
- obciążenie ogniowe wewnątrz przedziału,
- otwory w ścianach i dachu,
- typ i charakter różnych elementów konstrukcyjnych tworzących granice strefy.

Parametryczne pożary bazują na hipotezie, wg której temperatura jest jednakowa w strefie, co ogranicza pole ich stosowania tylko do pożarów po rozgorzeniu w przedziałach o niewielkich rozmiarach. Niemniej jednak stanowią one znaczący krok naprzód w kierunku uwzględnienia prawdziwej natury konkretnego pożaru w porównaniu z pożarami nominalnymi, a przy tym zachowują prostotę pewnych wyrażeń analitycznych, tzn. do ich stosowania nie są potrzebne żadne skomplikowane narzędzia komputerowe.

W załączniku informacyjnym A normy EN 1991-1-2 [1] przedstawiono propozycję dotyczącą takich parametrycznych pożarów. Odnosi się ona do stref o powierzchni podłogi do 500 m², bez otworów w dachu i o maksymalnej wysokości strefy wynoszącej 4 m. Wartość b musi zawierać się w przedziale 1.000 – 2.200 J/m² s^{1/2} K a O w przedziale 0,02 – 0,20. (O i b zostały zdefiniowane poniżej).

Wprowadzone zostały pewne poprawki w celu ulepszenia propozycji z normy ENV 1991-2-2 [23]. Są to:

- bardziej prawidłowy sposób obliczania absorpcyjności termicznej (współczynnik b) w ścianach warstwowych,
- wprowadzenie minimalnego czasu trwania pożaru biorąc pod uwagę paliwową kontrolę kiedy obciążenie jest małe a otwory duże,
- współczynnik korekcyjny, który uwzględnia przepływ dużej masy przez otwory w przypadku paliwowo kontrolowanych pożarów.

Ta nowa formuła pożarów parametrycznych będzie przedstawiona poniżej. Jest ona prawdziwa dla dowolnego b . Krzywe temperatura-czas w fazie nagrzewania są określone przez:

$$\Theta_g = 1,325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) + 20^\circ C \quad (6.11)$$

gdzie:

$$t^* = \Gamma t \quad (6.12)$$

$$\Gamma = \frac{(O / 0,04)^2}{(b / 1,160)^2} \quad (6.13)$$

$$O = A_V \sqrt{h} / A_t \quad (6.14)$$

oraz

t - jest czasem [h]

A_V - jest całkowitą powierzchnią pionowych otworów [m²]

h - jest średnią ważoną wysokości pionowych otworów [m]

A_t - jest całkowitą powierzchnią elementów ograniczających (ścian, sufitu i podłogi, łącznie z otworami) [m²]

b - jest tzw. współczynnikiem b [absorbcyjnością termiczną dla całkowitej powierzchni elementów ograniczających] [J/m²s^{1/2}K]. Jest on funkcją bezwładności termicznej elementów ograniczających (obliczanie b patrz §3.3).

Czas trwania fazy nagrzewania określa zależność:

$$t_{max} = \max(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O; t_{lim}) \quad (6.15)$$

gdzie:

$q_{t,d}$ - wartość obliczeniowa gęstości obciążenia ogniowego odniesiona do A_t i wyrażona w [MJ/m²]

t_{lim} - 20 minut, podobnie do założenia czasu trwania pożaru swobodnego τ_F jak w aneksie B normy EN 1991-1-2 [1].

Kiedy stosujemy równanie (6.15) istnieją dwie możliwości:

- albo czas trwania ogrzewającej fazy pożaru obliczany w pierwszym członie równania, $0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O$ jest większy niż wybrany czas graniczny t_{lim} i w takim przypadku równania (6.11) – (6.14) i (6.21) – (6.23) są stosowane bez żadnych modyfikacji,
- albo czas trwania ogrzewającej fazy pożaru obliczany w pierwszym członie równania, $0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O$ jest mniejszy niż wybrany czas graniczny t_{lim} i w takim przypadku równania (6.11) – (6.14) są stosowane ze zmodyfikowanym wskaźnikiem otworów O_{lim} obliczanym jako element prowadzący do wybranego limitu czasu równaniem:

$$O_{lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / t_{lim} \quad (6.16)$$

Równania (6.15) i (6.16) zmodyfikowane zostają w następujący sposób:

$$t_{lim} = \Gamma_{lim} \cdot t \quad (6.17)$$

$$\Gamma_{lim} = \frac{(O_{lim} / 0,04)^2}{(b / 1,160)^2} \quad (6.18)$$

a t^* jest użyty w równaniu (6.11) zamiast t^*

Na koniec, żeby uwzględnić efekty wentylacji podczas fazy ogrzewania, w przypadku gdy $t_d = t_{lim}$, należy:

jeśli $O > 0,04$ i $q_{t,d} < 75$ i $b < 1160$
wtedy

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0,04}{0,04} \right) \cdot \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (6.19)$$

$$\Gamma_{lim} = k \frac{(O_{lim} / 0,04)^2}{(b / 1160)^2} \quad (6.20)$$

Krzywa temperatura-czas w fazie chłodzenia jest określona przez:

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625 (t - t_{max}^* \cdot x) \quad dla \quad t_d^* \leq 0,5 \quad (6.21)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250 (3 - t_{max}^*) \cdot (t - t_{max}^* \cdot x) \quad dla \quad 0,5 \leq t_d^* \leq 2,0 \quad (6.22)$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250 (t - t_{max}^* \cdot x) \quad dla \quad 2,0 \leq t_d^* \quad (6.23)$$

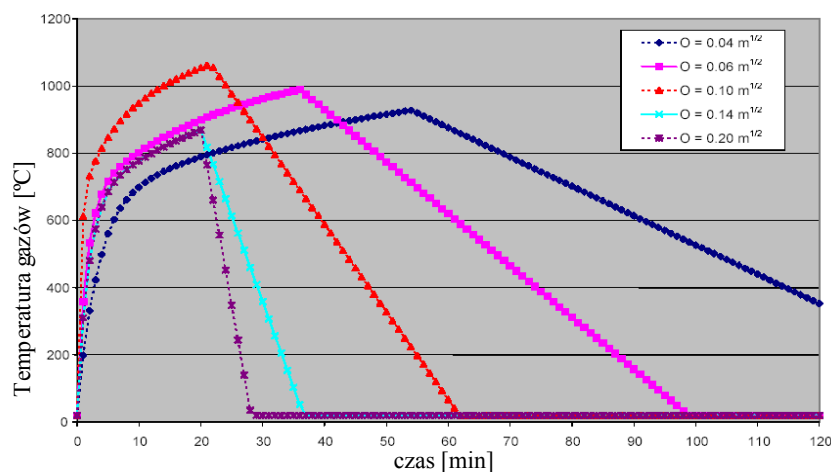
przy czym Θ_{max} jest maksymalną temperaturą na koniec fazy ogrzewania podaną wzorem (6.11) gdzie $t = t_d$ określone wyrażeniem (6.15)

$$t_{max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1 \quad dla \quad t_{max} > t_{lim}$$

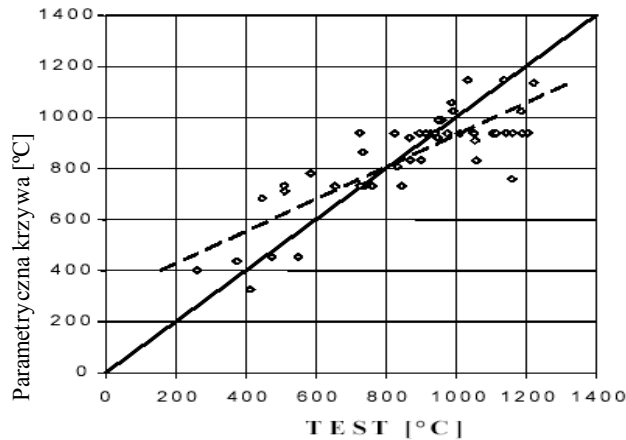
$$x = \frac{t_{lim} \cdot \Gamma}{t_{max}^*} \quad dla \quad t_{max} = t_{lim}$$

Przykładowe wyniki (obciążenie ogniowe $q_{t,d} = 180$ [MJ/m²], $b = 1160$ [J/m²s^{1/2}K], współczynnik otworów O w przedziale $0,04$ m^{1/2} – $0,20$ m^{1/2}) przedstawione są na rys. 6.8



Rysunek 6.8 Przykładowe pożary parametryczne [1]

W odniesieniu do pożarów parametrycznych przeprowadzono porównanie pomiędzy wynikami testów [12] a wynikami ulepszonych prognoz. Rysunek 6.9 pokazuje maksymalną temperaturę gazu. Współczynnik korelacji wynoszący 0,19 zgodnie z wzorami normy ENV 1991-2-2 [23], ma teraz wartość 0,83.



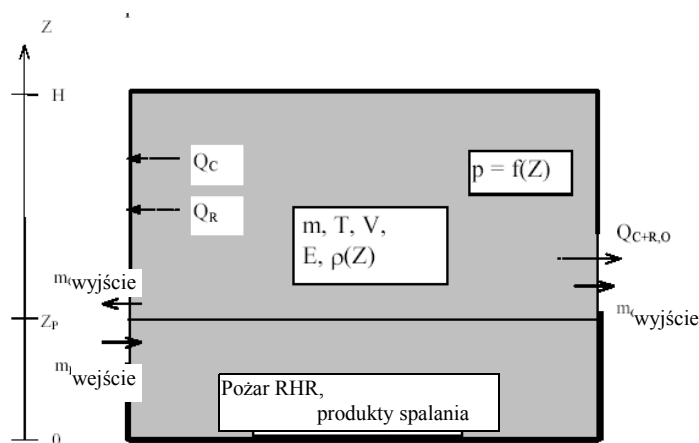
Rysunek 6.9 Maksymalna temperatura gazów w przedziale

6.2.2 Modele strefowe

Modele strefowe zostały już przedstawione w podpunkcie 6.1.1, gdzie zamieszczono krótki opis modelu dwustrefowego. Pole zastosowania modelu dwustrefowego odnosi się do fazy przedrozgorzeniowej pożaru. Dla przypadku całkowicie rozwiniętego pożaru powinien być stosowany model jednostrefowy.

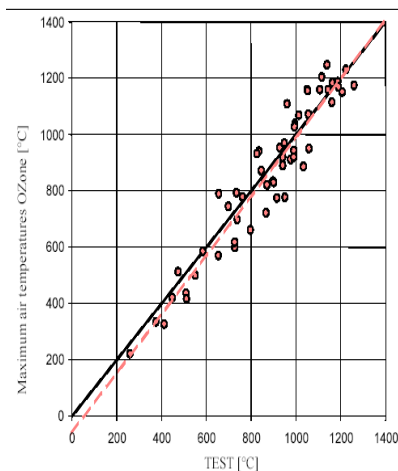
6.2.3 Model jednostrefowy

Model jednostrefowy oparty jest na fundamentalnej hipotezie głoszącej, że podczas pożaru temperatura w strefie jest jednakowa. Modele strefowe odnoszą się do warunków po fazie rozgorzenia. Dostarczane dane muszą być bardziej szczegółowe niż to ma miejsce przy krzywych parametrycznych - są to te same dane, które potrzebne są w modelu dwustrefowym. Rysunek 6.10 pokazuje jak modelowany jest pożar przedziału, z przedstawionymi różnymi warunkami równowagi energii i masy.



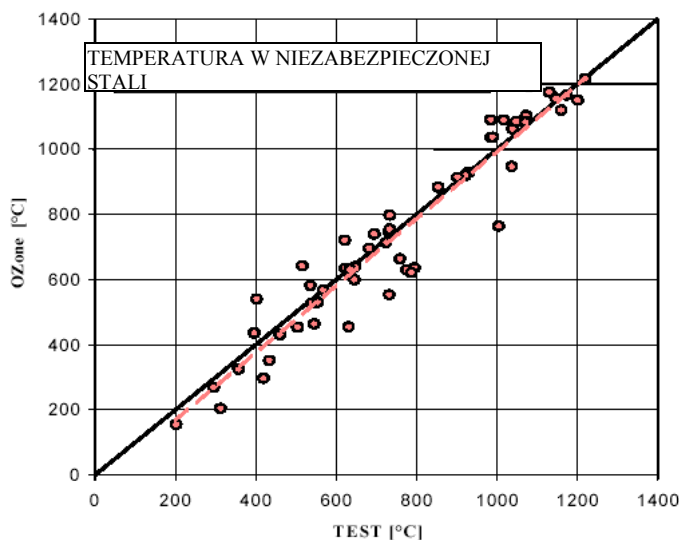
Rysunek 6.10 Przedział w modelu jednostrefowym

W zakresie projektów ECSC, NFSC 1 i 2 [11, 12], na Uniwersytecie Liege, we współpracy z grupą badawczą PROFILARBED, został opracowany dwustrefowy model Ozone. Model ten został także poddany walidacji w odniesieniu do wyników 54 badań eksperymentalnych. Rysunek 6.11 pokazuje porównanie maksymalnej temperatury zmierzonej w badaniu eksperymentalnym z temperaturą obliczoną tym modelem. Każdy punkt reprezentuje doświadczenie eksperymentalne, a ukośna linia zawiera punkty idealnie pasujące. Przerywana linia jest liniową regresją dla wszystkich punktów.



Rysunek 6.11 Maksymalna temperatura gazów w przedziale

Inne porównanie przedstawiono na rys. 6.12. W każdym teście obliczano rozwój temperatury typowego niezabezpieczonego profilu stalowego – HEB 200, $A_m / V = 147 \text{ m}^{-1}$ – najpierw poddanego działaniu zarejestrowanej temperatury gazów, następnie poddanego działaniu temperatury wynikającej z obliczeń. Pozwoliło to narysować wykres w którym każdy test jest reprezentowany przez maksymalną temperaturę w niezabezpieczonym przekroju stalowym.



Rysunek 6.12 Maksymalna temperatura w niezabezpieczonym kształtowniku stalowym

6.3 Kombinacja modeli jednostrefowego i dwustrefowego. Wybór modelu

Po zdefiniowaniu charakterystyk pożaru (krzywej RHR, geometrii strefy, charakterystyki ścian) konieczne jest wybranie naturalnego modelu pożaru, aby był zgodny z rozważanym scenariuszem. Wyboru tego należy dokonać zgodnie z dziedziną stosowania modeli.

W tym względzie zakłada się, że pierwszym zastosowanym modelem powinien być model dwustrefowy. Problem polega na tym jak i kiedy dokonać przejścia z modelu dwustrefowego do jednostrefowego. Wyniki z dwustrefowego modelu są przedstawione w postaci dwóch głównych zmiennych:

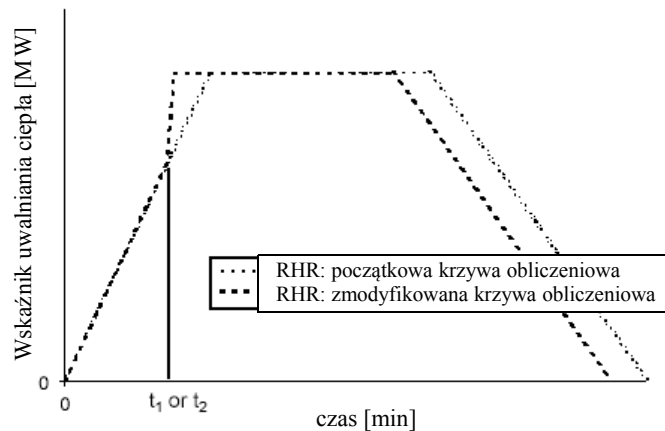
- temperatura w górnej strefie T_u

- wysokość powierzchni styku dwóch stref H_i

Te dwie zmienne warunkują symulację w modelu strefowym (rys. 6.15). Cztery poniższe warunki mogą ograniczać zastosowanie modelu dwustrefowego:

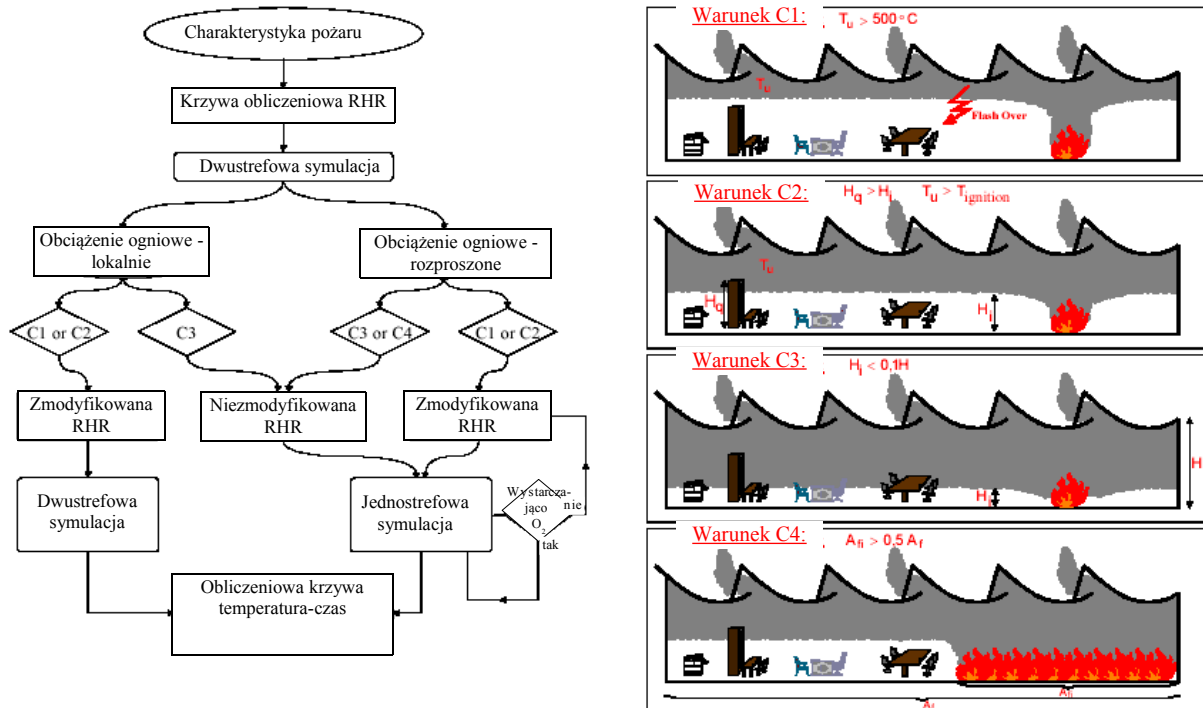
- warunek 1 (C1): $T_u > 500^\circ\text{C}$
wysoka temperatura produktów spalania (wyższa niż 500°C) prowadzi do rozgorzenia poprzez promieniowanie oddziałujące na inne obciążenia ogniowe w strefie;
- warunek 2 (C2): $H_i < H_q$ i $T_u > T_{ignition}$
obniżenie wysokości powierzchni styku (H_i) jest tego rodzaju, że palny materiał znajduje się w warstwie dymu (maksymalna wysokość z palnym materiałem H_q) i jeśli warstwa dymu ma wysoką temperaturę (wyższą niż $T_{ignition}$ którą założono na poziomie 300°C) prowadzi to do rozprzestrzeniania pożaru w całym przedziale poprzez zapłon materiałów łatwopalnych.
- warunek 3 (C3): $H_i < 0,1 H$
wysokość strefy styku maleje, co prowadzi do powstania bardzo cienkiej warstwy dolnej, która nie jest reprezentatywna dla dwustrefowego zjawiska;
 - warunek 4 (C4): $A_{fi} > 0,5 A_f$
powierzchnia pożaru jest zbyt wysoka w stosunku do powierzchni podłogi strefy aby traktować pożar jako pożar lokalny.

W rzeczywistości warunki 1 i 2 prowadzą do modyfikacji w początkowej szybkości uwalniania ciepła (symulacje w dwustrefowym modelu) do symulacji jednostrefowego modelu. Modyfikacja ta jest dokonywana tak, jak pokazano na rys. 6.13.



Rysunek 6.13 Krzywe obliczeniowe dla szybkości uwalniania ciepła pożaru

Powyższe podejście przedstawiono na schemacie na rys. 6.14. Na tym schemacie pokazano, dla jakich warunków (dwu- lub jednostrefowego modelowania) należy określać obliczeniowe krzywe temperatury.



Rysunek 6.14 Kombinacja modeli jedno- i dwustrefowego

7. MECHANICZNE ODDZIAŁYWANIA WEDŁUG EUROKODÓW

Obciążenia oddziałujące na konstrukcję w sytuacji pożaru można określić zgodnie z poniższym wzorem (patrz związek 6.11b w normie EN1990):

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ lub } \Psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

gdzie:

- $G_{k,j}$ - jest charakterystyczną wartością stałego działania
- $Q_{k,1}$ - jest charakterystycznym głównym obciążeniem zmiennym
- $Q_{k,i}$ - są charakterystycznymi wartościami towarzyszących obciążeń zmiennych
- $\Psi_{1,1}$ - jest współczynnikiem dla krótkotrwałych wartości zmiennych obciążeń
- $\Psi_{2,i}$ - jest współczynnikiem długotrwałych wartości zmiennego obciążenia

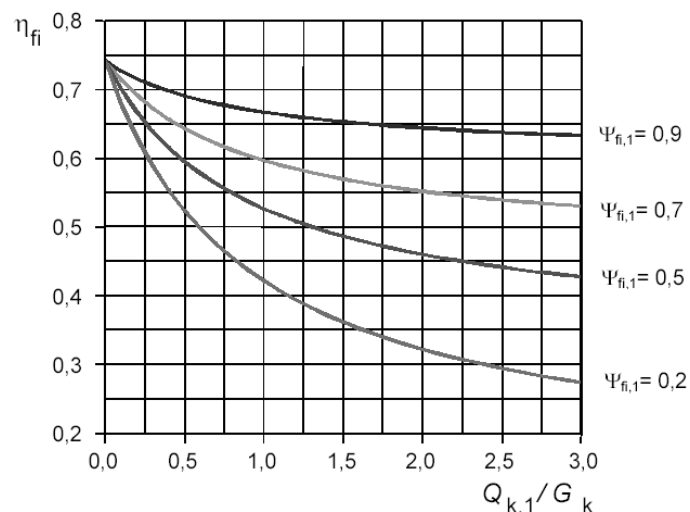
Zalecane wartości Ψ_1 i Ψ_2 podane są w tabelicy A1.1 normy EN 1990 ale mogą być zmodyfikowane według krajowych załączników.

Tablica 7.1 Zalecane wartości współczynników Ψ dla budynków			
Użytkowanie	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Narzucone obciążenia w budynkach, kategorie (patrz EN 1991-1.1)			
Kategoria A: budownictwo mieszkaniowe	0,7	0,5	0,3
Kategoria B: biura	0,7	0,5	0,3
Kategoria C: miejsca zgromadzeń	0,7	0,7	0,6
Kategoria D: sklepy	0,7	0,7	0,6
Kategoria E: magazyny	1,0	0,9	0,8
Kategoria F: obszary ruchu ulicznego (ciężar pojazdu $\leq 30\text{kN}$)	0,7	0,7	0,6
Kategoria G: obszary ruchu ulicznego (ciężar pojazdu $\leq 160\text{kN}$)	0,7	0,7	0,3
Kategoria H: dachy	0,0	0,0	0,0
Obciążenie śniegiem na budynkach (patrz EN 1991-1.3)			
Finlandia, Islandia, Norwegia, Szwecja	0,7	0,5	0,2
Reszta państw członkowskich CEN dla obszarów zlokalizowanych na wysokości $H > 1000\text{m}$ n.p.m.	0,7	0,5	0,2
Reszta państw członkowskich CEN dla obszarów zlokalizowanych na wysokości $H \leq 1000\text{m}$ n.p.m.	0,5	0,2	0
Obciążenie wiatrem na budynki (patrz EN1991-1.4)	0,6	0,2	0
Obciążenie temperaturą (nie pożarowe) w budynkach (patrz EN1991-1.5)	0,6	0,5	0

Innym ważnym szeroko stosowanym zapisem wykorzystywanym w metodach obliczania obciążeń pożarowych w Eurokodach jest poziom obciążenia dla sytuacji pożaru $\eta_{fi,t}$ który zdefiniowany jest

$\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$, gdzie E_d i $E_{d,fi}$ to odpowiednio obliczeniowy efekt działania w pokojowej temperaturze i obliczeniowy efekt działania dla sytuacji pożarowej. Można go określać alternatywnie na podstawie zależności $\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \Psi_{fi,1} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}$ gdzie $\gamma_{Q,1}$ jest cząstkowym współczynnikiem dla głównego zmiennego obciążenia 1.

W rzeczywistości poziom obciążenia $\eta_{fi,t}$ zależy w znacznym stopniu od współczynnika $\Psi_{fi,1}$ który jest zależny od kategorii budynku. W EN 1993-1-2 (pożarowa część dla konstrukcji stalowych) i EN 1994-1-2 (pożarowa część dla konstrukcji zespolonych) zamieszczono rysunek (rysunek 4) pokazujący wyraźnie wpływ stosunku obciążeń $Q_{k,1} / G_k$ i współczynnika $\Psi_{fi,1}$ na poziom obciążenia.



Rysunek 7.1 Zmienność współczynnika redukcyjnego $\eta_{fi,t}$ w odniesieniu do wskaźnika obciążeń $Q_{k,1} / G_k$

8. WNIOSKI

W tej części opracowania przedstawiono różne modele pozwalające obliczać temperaturę wewnątrz strefy w funkcji czasu i inne potrzebne dane. Aby poznać temperaturę elementów konstrukcyjnych w funkcji czasu konieczne jest obliczenie przepływu ciepła do tych elementów.

Konwekcyjny i radiacyjny przepływ ciepła występuje pomiędzy gorącymi gazami, płomieniem, otaczającą konstrukcją stanowiącą granicę przedziału i elementem konstrukcyjnym. O wymianie ciepła decydują współczynniki emisyjne i konwekcyjne.

Ogrzanie elementów konstrukcyjnych zależy od typu elementu (czysta stal lub konstrukcja zespolona stalowo-betonowa), oraz od charakteru i zakresu ochrony ppoż. Jest to tematem części 2.

Znając pole temperatur konstrukcji i wyjątkowe kombinacje obciążeń, można określić jej zachowanie termiczno-mechaniczne. Jest to tematem części 3 (WP3).

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] CEN; EN 1991-1-2, Eurocode 1- Actions on structures, Part 1.2-Actions on structures exposed to fire. CEN Central Secretariat, Brussels, November 2002.
 - [2] BSI 96/540493 "The use of Fire Safety Engineering in Buildings" (Draft 27 march 1996)
 - [3] Initial Fires: Lund University, Sweden. Institute of Fire Safety Engineering. ISSN 1102-8246. ISRN LUTVDG/TVBB--3070--SE. April 1993.
 - [4] ARGOS Theory Manuel (draft 5)-Danish Institute of fire technology - 22/07/92
 - [5] Peacock, Jones, Bukowski and Forney. NIST Handbook 146, Volume II - Technical Reference Guide for the Hazard I Fire Hazard Assessment Method - Version 1 - June 1991
 - [6] Babrauskas Vytenis: "Burning Rates" Section 3/Chapter 1: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering - Second Edition - 13th April 1995
 - [7] NKB Committee and Works reports 1994:07E: "Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation"; Nordic Committee on Building Regulations.
 - [8] "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Large Compartments"; Final report CEC Agreement 7210/ SA210, 317,517,618,832-February 1997.
 - [9] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in Closed Car Parks" ECSC Research 7210-SA/211/318/518/620/933; 1993-1996; Final report 1999 – EUR 18867 EN
 - [10] CEN; EN1990, Eurocode – Basis of structural design, 2001.
 - [11] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Competitive steel buildings through natural fire safety concept." ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98; Final Report 2002 – EUR 20360 EN.
 - [12] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Natural fire safety concept –Full scale tests, implementation in the Eurocodes and development of a user-friendly design tool." ECSC Research 7210-060, 1997-2000; Final Report 2003 - EUR 20580 EN..
 - [13] Schleich J-B., Cajot L-G., et al.: "Valorisation project - Natural Fire Safety Concept." ECSC Research 7215-PA/PB/PC –042-057, D-E-F-I-NL-UK & ECCS, 1999-2001.
 - [14] DD 0000 The Use of Fire Safety Engineering in Buildings. Draft for Approval for Publication; 27. March 96, Technical Committee FSH / 24. 96/540493.
 - [15] Fontana M.: "Required Fire Resistance of Building Elements" - Part A: Fire Load in Buildings, Probability Density Function - , NFSC WG4, Zürich, March 1996
 - [16] Background document Eurocode 1 (ENV 1991) Part 1 : Basis of Design, Working Document N° 94 of ECCS, March 1996.
 - [17] Hasemi Y. and Tokunaga Tazo: "Flame Geometry Effects on the Buoyant Plumes from Turbulent Diffusion Flames". Fire Science and Technology, Vol.4, N°1, 1984.
- Pchelintsev A., Hasemi Y., Nikolaenko M., "Numerical Analysis of Structures exposed to localized Fire", ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.

- Wakamatsu T., Hasemi Y., Yokobayashi Y., Ptchelintsev A.: "Experimental Study on the Heating Mechanism of a Steel Beam under Ceiling exposed to a localized Fire".
- Hasemi Y., Yokobayashi Y., Wakamatsu T., Ptchelintsev A.: "Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire"- Scope and Experiments on Ceiling/Beam System Exposed to a Localized Fire, ASIAFLAM's 95, Hong Kong, 1995.
- [18] Hietaniemi J: " Risk-Based Fire Resistance Requirements" ECSC Research 7210-PR-251, 2000-2003
- [19] Kumar S., Welch S., "Natural Fire Safety Concept – The development of a CFD-Based Engineering methodology for evaluating thermal action on steel and composite structures" 7210-PR184, 1999-2002
- [20] iABSE Colloquium: Basis of Design and Actions on Structures; Background and applications of EC 1; delft 1996
- [21] Evaluation du Risque d'Incendie", Méthode de Calcul, Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, documentation n° 81, 1984.
- [22] Thomas P.H.: "Design Guide Structural Fire Safety", Workshop CIB W14, February 1995.
- [23] CEN; ENV1991-2-2, Eurocode 1– Basis of design and actions on structures- Part 2-2: Actions on structures- Actions on structures exposed to fire, 1995.
- [24] Cajot L-G, Haller M., et al: "Probabilistic Quantification of a Steel Structure highlighting the potential of steel versus other materials" ECSC Research 7210-PA/PB/PC/PD-249, 2000-2003