

# Przepływ dymu i ciepła w wielkokubaturowym obiekcie budowlanym w warunkach pożaru

Wojciech Węgrzyński<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zakład Badań Ogniowych Instytutu Techniki Budowlanej, e-mail: w.wegrzynski@itb.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wybrane nowoczesne metody szacowania ilości dymu wpływającego do zbiornika dymu w określonym układzie przegród budowlanych składającym się z pomieszczenia, w którym wybuchł pożar, ściany z otworem i nadprożem oraz balkonem, wewnątrz wielkokubaturowego obiektu budowlanego. Wyniki obliczeń analitycznych porównano z wynikami obliczeń numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) i na ich podstawie przedstawiono wnioski dotyczące praktycznego wykorzystania przedstawionych metod.

**Słowa kluczowe:** pożar, dym, wentylacja pożarowa, wentylacja oddymiająca, atria

## 1. Wprowadzenie

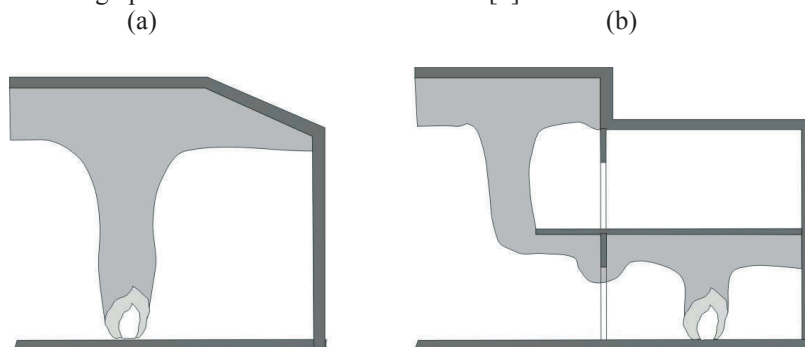
Fundamentem nowoczesnego budownictwa są wymagania podstawowe stawiane budynkom przez przepisy techniczno-budowlane, wśród których znajduje się także wymóg zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego. Bezpieczeństwo to może być rozumiane, jako zapewnienie w budynku warunków środowiska w czasie pożaru, które umożliwią ewakuację wszystkim jego użytkownikom oraz umożliwią rozpoczęcie akcji ratowniczo – gaśniczej. Aby spełnić ten cel budynki wyposażane są w liczne pasywne i aktywne systemy zabezpieczeń przeciwpożarowych. W budynkach wielkokubaturowych, w których formę architektoniczną stanowi duża, niepodzielona przestrzeń szczególnego znaczenia dla bezpieczeństwa pożarowego nabierają systemy wentylacji oddymiającej pozwalające utrzymać wymagane warunki środowiska w obszarze, w którym przebywają ludzie, w trakcie pożaru poprzez usuwanie dymu i ciepła w nim powstałego.

System wentylacji oddymiającej ma na celu usuwanie gorącego dymu i ciepła z obszaru pod stropem budynku z intensywnością pozwalającą na utrzymanie warstwy gorącego dymu we wcześniej zdefiniowanym i ściśle opisanym zbiorniku dymu. Ścianami zbiornika dymu są przegrody architektoniczne a jego podstawę stanowi wirtualna powierzchnia na stałej wysokości określonej od poziomu podłogi budynku, poniżej której możliwa jest ewakuacja, nazywana warstwą wolną od dymu. Ponadto usuwanie gorącego dymu i gazów pożarowych przez system wentylacji oddymiającej wpływa również na obniżenie temperatury dymu, a więc na zmniejszenie strumienia ciepła przekazywanego na drodze promieniowania w kierunku dróg ewakuacji, przyczyniając się do ograniczenia rozprzestrzeniania się ognia i wpływając korzystnie na warunki prowadzenia akcji ratowniczo - gaśniczej. Spełnienie powyższych założeń jest możliwe, jeżeli na etapie projektowania systemu poprawnie oszacowana została minimalna ilość dymu, którą należy usunąć ze zbiornika. W tym celu wykorzystywane są metody analityczne określania ilości dymu wpływającego do zbiornika, a skuteczność zaprojektowanego systemu weryfikuje się z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics*, CFD).

## 2. Przepływ dymu w obiektach budowlanych

Dym i gorące gazy pożarowe na skutek działania sił wyporu gromadzą się pod stropem pomieszczeń, w których wybuchł pożar tworząc tzw. warstwę gorącego dymu. Dym przemieszczając się pod stropem pomieszczenia oraz opływając przegrody budowlane miesza się z otaczającym powietrzem, obniżając swoją temperaturę i prędkość przepływu

oraz zwiększając swoją objętość. Ilość dymu wpływająca do zbiornika dymu zależy, zatem nie tylko od wielkości, czyli mocy pożaru, ale również od drogi, jaką musi przebyć dym. Ze względu na lokalizację źródła pożaru względem zbiornika dymu wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje przepływu dymu w tzw. kolumnach konwekcyjnych: kolumna osiowo symetryczna (ang. *axisymmetric plume*) powstająca w pożarze zlokalizowanym bezpośrednio pod zbiornikiem dymu oraz kolumna rozplywająca się (ang. *spill plume*) powstająca, gdy płynąca pod balkonem warstwa dymu odrywa się na jego krawędzi wpływając do zbiornika dymu, co przedstawiono na rys. 1. Z uwagi na dłuższą drogę jak i ilość przegród budowlanych, które opływa dym, w większości budynków wielkokubaturowych najbardziej niekorzystnym przypadkiem z uwagi na ilość dymu wpływającego do zbiornika, jest przypadek pożaru w pomieszczeniu na najniższej kondygnacji budynku, którego wyjście znajduje się w największej odległości od krawędzi balkonu. W związku z powyższym, w niniejszej pracy rozważano tylko metodykę obliczeń przewidywanej ilości dymu płynącego w kolumnie rozplywającej się, dla układu architektonicznego pomieszczenie – balkon – atrium [1].



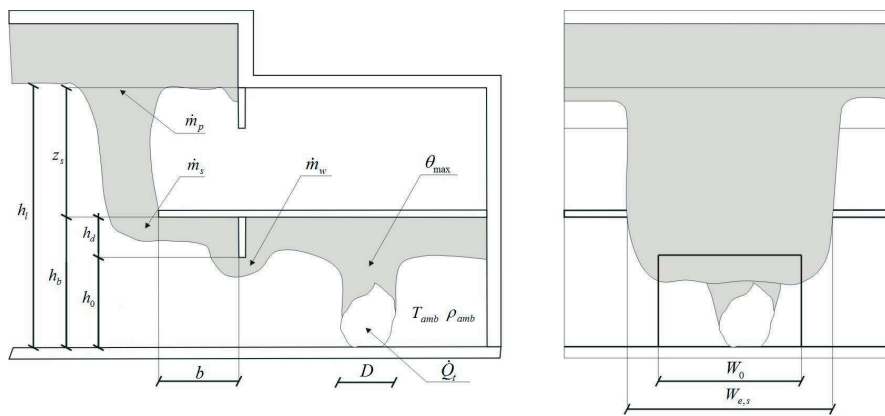
Rys. 1. Schematycznie przedstawiona osiowa kolumna konwekcyjna dymu (a) oraz przepływ dymu z pomieszczenia do atrium wraz z rozplywającą się kolumną dymu (b).

### 3. Obliczanie masowego i objętościowego strumienia dymu w kolumnie konwekcyjnej rozplywającej się

#### 3.1. Wprowadzenie do analitycznych metod obliczeniowych

Dym i gorące gazy pożarowe powstałe na skutek pożaru mogą być usuwane z pomieszczenia poprzez jego witrynę, do przestrzeni atrium budynku. Ponieważ dym opływa przegrody budowlane i nieustannie zwiększa swoją objętość, aby poprawnie oszacować ilość dymu docierającą do zbiornika dymu niezbędnym jest określenie nie tylko ilości dymu powstającej w pożarze, ale także jego przyrostu powstającego podczas wypływu z pomieszczenia pod balkon, drogi przebytej pod balkonem jak i wypływu z pod krawędzi balkonu do przestrzeni atrium w formie rozplywającej się kolumny konwekcyjnej dymu, co zilustrowano na rys. 2.

Opis pożaru na potrzeby obliczeń dokonywany jest poprzez parametry całkowitej mocy pożaru i jego obwodu. Parametry te są podstawą w dalszych obliczeniach, przy czym należy zauważyć, że w poszczególnych metodach obliczeniowych zamiennie wykorzystuje się parametry całkowitej mocy pożaru ( $Q_t$ ) oraz konwekcyjnej mocy pożaru ( $Q_c$ ) uwzględniającej ilość ciepła wydzielonego w pożarze na drodze promieniowania i wynosząca około 70% mocy całkowitej [1].



Rys. 2. Masowe strumienie przepływu dymu oraz oznaczenia wymiarów przegród budowlanych, wykorzystywane w obliczeniach analitycznych

### 3.2. Masowy strumień dymu wypływający z pomieszczenia

Jednym z pierwszych równań pozwalających określić masowy strumień dymu wypływający z pomieszczenia było równanie (1) wyprowadzone przez Thomasa, oparte na równaniu Bernoulliego oraz założeniu zerowej prędkości początkowej gazów w pomieszczeniu z pożarem [2].

$$\dot{m}_w = \frac{2}{3} C_d (2g\theta_{max,w}T_{amb})^{1/2} \frac{W_0 \rho_{amb}}{T_{max,w}} d_w^{3/2} \quad (1)$$

gdzie:  $\dot{m}_w$  – masowy strumień dymu wypływający z pomieszczenia,  $C_d$  – wsp. nadproża,  $g$  – stała przyciągania ziemskiego,  $\theta_{max,w}$  – przyrost temperatury dymu,  $T_{amb}$  – temperatura otoczenia,  $W_0$  – szerokość witryny,  $\rho_{amb}$  – gęstość powietrza w otoczeniu,  $T_{max,w}$  – temperatura wypływającego dymu,  $d_w$  – głębokość warstwy dymu.

Wartość współczynnika  $C_d$  opisującego wpływ nadproża wyznaczono eksperymentalnie, jako równą 0,65. W powyższej zależności zakłada się także, że rozkład temperatury dymu wypływającego z pomieszczenia może być opisany funkcją „top-hat”.

Przyjmując, że gazy w pomieszczeniu posiadają początkową prędkość, a rozkład temperatury w kolumnie konwekcyjnej nie jest równomierny Morgan wyprowadził równanie (2), wprowadzając do równania (1) współczynnik  $\kappa_m$  uwzględniający nierównomierny rozkład temperatury dymu wypływającego z pomieszczenia [3]. Dla celów projektowania systemów wentylacji pożarowej, na podstawie badań eksperymentalnych Morgan zalecił wykorzystywanie współczynnika  $\kappa_w = 1,3$ .

$$\dot{m}_w = \frac{2}{3} C_d^{3/2} (2g\theta_{max,w}T_{amb})^{1/2} \frac{W_0 \rho_{amb}}{T_{max,w}} d_w^{3/2} \kappa_w \quad (2)$$

gdzie:  $\dot{m}_w$  – masowy strumień dymu wypływający z pomieszczenia,  $C_d$  – wsp. nadproża,  $g$  – stała przyciągania ziemskiego,  $\theta_{max,w}$  – przyrost temperatury dymu,  $T_{amb}$  – temperatura otoczenia,  $W_0$  – szerokość witryny,  $\rho_{amb}$  – gęstość powietrza w otoczeniu,  $T_{max,w}$  – temperatura wypływającego dymu,  $d_w$  – głębokość warstwy dymu,  $\kappa_w$  – wsp. korekcyjny.

Wykorzystanie powyższych równań do celów projektowych jest problematyczne, ze względu na występujące w nich liczne niewiadome takie jak maksymalna temperatura dymu czy głębokość warstwy dymu. Z uwagi na te trudności Hansell w swojej rozprawie doktorskiej opracował metodę szacowania ilości dymu wypływającego z pomieszczenia (3), którą później wykorzystano w metodologii projektowania systemów wentylacji pożarowej opisaną w normach BS [4,5].

$$\dot{m}_w = \frac{C_e p W_0 h_0^{3/2}}{\left( W_0^{2/3} + \frac{1}{C_d} \left( \frac{C_e p}{\sigma} \right)^{2/3} \right)^{3/2}} \quad (3)$$

gdzie:  $\dot{m}_w$  – masowy strumień dymu wypływający z pomieszczenia,  $C_e$  – wsp. konfiguracji pomieszczenia,  $p$  – obwód pożaru,  $W_0$  – szerokość witryny,  $h_0$  – wysokość witryny,  $C_d$  – wsp. nadproża,  $\sigma$  – wsp. korekcyjny.

Współczynnik korekcyjny  $\sigma$  pojawiający się w równaniu przyjmuje wartość równą 2 dla większości przypadków. Współczynnik  $C_e$  przyjmuje wartości 0,19, 0,21 lub 0,34 w zależności od wielkości pomieszczenia, w którym wybuchł pożar.

Alternatywną uproszczoną metodę wyznaczania ilości dymu wypływającej z pomieszczenia na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych podano w wytycznych CIBSE, a jej autorem był Thomas [6].

$$\dot{m}_w = 0,09 \dot{Q}_c^{1/3} W_0^{2/3} h_0 \quad (4)$$

gdzie:  $\dot{m}_w$  – masowy strumień dymu wypływający z pomieszczenia,  $\dot{Q}_c$  – konwekcyjna moc pożaru,  $W_0$  – szerokość witryny,  $h_0$  – wysokość witryny.

### 3.3. Masowy strumień dymu płynący pod balkonem

W przypadku, w którym przepływ dymu pomiędzy pomieszczeniem a krawędzią balkonu nie jest ograniczony ekranami kierunkującymi o znanych wymiarach, oszacowanie przyrostu dymu jest trudne. Z uwagi na brak wystarczającej ilości badań eksperymentalnych nad tym zjawiskiem, do celów inżynierskich przyjmuje się, że ilość dymu na krawędzi balkonu ( $\dot{m}_s$ ) jest dwukrotnie większa, od ilości dymu wypływającej z pomieszczenia [5]. Ponieważ wiele z metod obliczeniowych wykorzystywanych do szacowania ilości dymu płynącego w kolumnie rozplywającej odnosi się do jej szerokości, w wytycznych NFPA przedstawiono uproszczony wzór (5) pozwalający oszacować szerokości kolumny rozplywającej się na krawędzi balkonu [7].

$$W_{e,s} = W_0 + b \quad (5)$$

gdzie:  $W_{e,s}$  – szerokość kolumny dymu,  $W_0$  – szerokość balkonu,  $b$  – szerokość balkonu.

### 3.4. Masowy strumień dymu w kolumnie rozplywającej się

Znając podstawowe parametry pożaru projektowego, wymiary przegród budowlanych, a także szacowaną szerokość warstwy dymu odrywającej się od krawędzi balkonu, ilość dymu wpływającą do zbiornika dymu można oszacować za pomocą zależności wyprowadzonej przez Law'a [8].

$$\dot{m}_p = 0,31 \left( \dot{Q}_t (W_0 + b)^2 \right)^{1/3} (z_s + 0,25h_b) \quad (6)$$

$$\dot{m}_p = 0,36 \dot{Q}_t^{1/3} W_{e,s}^{2/3} (z_s + 0,25h_b) \quad (7)$$

gdzie:  $\dot{m}_p$  – masowy strumień dymu w kolumnie,  $\dot{Q}_t$  – całkowita moc pożaru,  $W_{e,s}$  – szerokość kolumny dymu,  $z_s$  – wysokość od krawędzi balkonu do granicy warstwy wolnej od dymu,  $h_b$  – wysokość balkonu.

Alternatywną metodę, w której uwzględnia się wartość masowego strumienia gazów wydobywającego się z pomieszczenia opisaną równaniem (3) i jego przyrostu pod balkonem podano w Brytyjskich wytycznych projektowania systemów wentylacji oddymiającej BSI [9].

$$\dot{m}_p = 0,16 \dot{Q}_c^{1/3} W_{e,s}^{2/3} z_s + 1,4 \dot{m}_s + 0,0014 \dot{Q}_c \quad (8)$$

gdzie:  $\dot{m}_p$  – masowy strumień dymu w kolumnie dymu,  $Q_c$  – konwekcyjna moc pożaru  $W_{e,s}$  – szerokość kolumny dymu,  $z_s$  – wysokość od krawędzi balkonu do granicy warstwy wolnej od dymu,  $\dot{m}'_s$  – masowy strumień dymu na krawędzi balkonu.

W latach 2006 – 2009 Harrison i Spearpoint przeprowadzili serię badań w skali modelowej oraz z wykorzystaniem metody CFD, w odniesieniu do których wyprowadzili modyfikację równania (8), która także może być wykorzystywana w procesie projektowania systemów wentylacji oddymiającej budynków wielkokubaturowych [10]

$$\dot{m}_p = 0,22\dot{Q}_c^{1/3}W_{e,s}^{2/3}z_s + 1,92\dot{m}'_s - 0,0042\dot{Q}_c \quad (9)$$

gdzie:  $\dot{m}_p$  – masowy strumień dymu w kolumnie dymu,  $Q_c$  – konwekcyjna moc pożaru  $W_{e,s}$  – szerokość kolumny dymu,  $z_s$  – wysokość od krawędzi balkonu do granicy warstwy wolnej od dymu,  $\dot{m}'_s$  – masowy strumień dymu na krawędzi balkonu.

### 3.5. Obliczenia objętościowego strumienia dymu i ciepła

Ponieważ przedstawione w rozdziale 3.4 zależności matematyczne opisują masowy strumień dymu, ważne jest jego poprawne przeliczenie na wymagany objętościowy strumień gazów usuwanych ze zbiornika dymu. W tym celu strumień masowy gazów wpływających do zbiornika dymu przeliczany jest na strumień objętościowy w odniesieniu do szacowanej średniej temperatury gazów pożarowych wpływających do zbiornika, z wykorzystaniem równania (10) [1].

$$\dot{V}_p = \frac{\dot{m}_p * (T_{amb} + \frac{Q_c}{\dot{m}_p * c_p})}{T_{amb} * \rho_{amb}} \quad (10)$$

gdzie:  $V_p$  – objętościowy strumień dymu,  $\dot{m}_p$  – masowy strumień dymu w kolumnie dymu,  $T_p$  – średnia temperatura dymu w kolumnie dymu,  $Q_c$  – konwekcyjna moc pożaru,  $c_p$  – ciepło właściwe powietrza,  $T_{amb}$  – temperatura otoczenia,  $\rho_{amb}$  – gęstość powietrza w otoczeniu.

## 4. Obliczenia numeryczne rozprzestrzeniania się dymu i ciepła

Obliczenia numeryczne z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) pozwalają oszacować masowy strumień dymu wpływający do zbiornika, jego średnią temperaturę oraz ocenić skuteczność funkcjonowania systemów wentylacji pożarowej dla dowolnego układu architektonicznego w budynku.

W celu porównania wyników obliczeń przewidywanego masowego strumienia dymu wpływającego do zbiornika dymu przeprowadzono 45 analiz numerycznych z wykorzystaniem metody CFD i oprogramowania Ansys Fluent w wersji 13.0.0. Na potrzeby prowadzonych analiz przygotowano modele numeryczne układów pomieszczenia, balkonu i atrium dla kombinacji następujących parametrów:

- szerokość otworu w pomieszczeniu  $W_0$  równa: 4,00 m, 8,00 m, 12,00 m;
- głębokość balkonu  $b$  równa: 2,00 m, 4,00 m, 6,00 m;
- wysokość nadproża  $h_d$  równa 2,00 m;
- wysokość warstwy wolnej od dymu (liczona od krawędzi balkonu): 1,00 m, 2,00 m, 3,00 m, 4,00 m, 5,00 m.

W każdej z prowadzonych analiz numerycznych pożar modelowano, jako objętościowe źródło ciepła i dymu, o maksymalnej całkowitej mocy pożaru równej 2,50 MW osiąganey w 225 sekundzie analizy, co w odniesieniu do wytycznych BS oraz NFPA odpowiada szybko rozwijającemu się pożarowi o obwodzie około 9 m w pomieszczeniu zabezpieczonym tryskaczami szybkiego reagowania. Obliczenia prowadzono, jako zmienne w czasie, a masowy strumień gazów płynących w kolumnie rozprzestrzeniającej się szacowano w odniesieniu do 10 minuty obliczeń. Przyjęto, że dym powstaje w wyniku niepełnego spalania mieszaniny materiałów palnych o uśrednionym efektywnym cieple spalania wynoszącym 20,00 MJ/kg. Dym modelowano jako gaz doskonały o właściwościach identycznych z właściwościami powietrza, za wyjątkiem ciepła właściwego które było stałe i wynosiło 1,00 kJ/kg. W obliczeniach wykorzystano następujące modele matematyczne

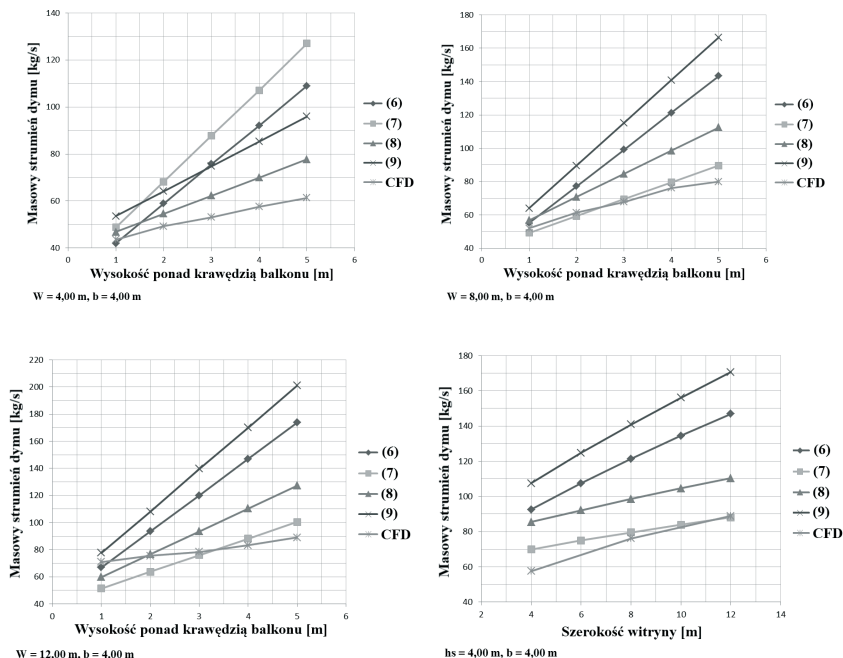
zachodzących zjawisk:

- model turbulencji - standard k- $\epsilon$ ,
- model pożaru - objętościowe źródło ciepła i dymu uwzględniające zmienność mocy pożaru w czasie,
- model promieniowania - P1,
- model wymiany ciepła.

## 5. Porównanie wyników obliczeń analitycznych oraz numerycznych dla wybranych przypadków

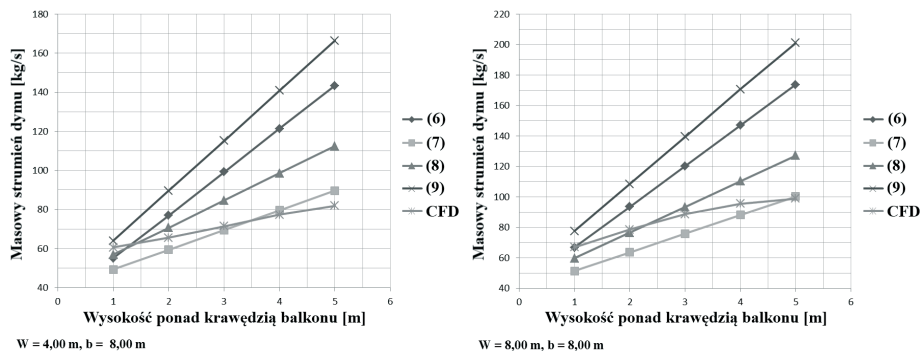
Dla wszystkich rozważanych układów architektonicznych przeprowadzono analizę porównawczą otrzymanych wyników obliczeń analitycznych oraz numerycznych. Wyniki dla wybranych przypadków przedstawiono na rys. 3 ÷ 5.

Analizując wyniki obliczeń w odniesieniu do stałej szerokości otworu wynoszącej odpowiednio 4,00 m, 8,00 m lub 12,00 m, stałej szerokości balkonu wynoszącej 4,00 m i zmiennej wysokości ponad krawędzią balkonu zaobserwowano, że we wszystkich przypadkach dla wysokości co najmniej 2,00 m powyżej krawędzi balkonu wyniki otrzymane z wykorzystaniem wzorów (6) oraz (7) były znacząco wyższe niż wartości strumienia masowego określone z wykorzystaniem metody CFD. W większości przypadków rozwiązanie najbliższe wynikom analiz numerycznych uzyskano z wykorzystaniem wzoru (8), przy czym dla witryny o szerokości 12,00 m oraz niskich wysokościach ponad krawędzią balkonu wyniki bliższe wynikom obliczeń numerycznych otrzymano z wykorzystaniem wzoru (9), rys. 3.



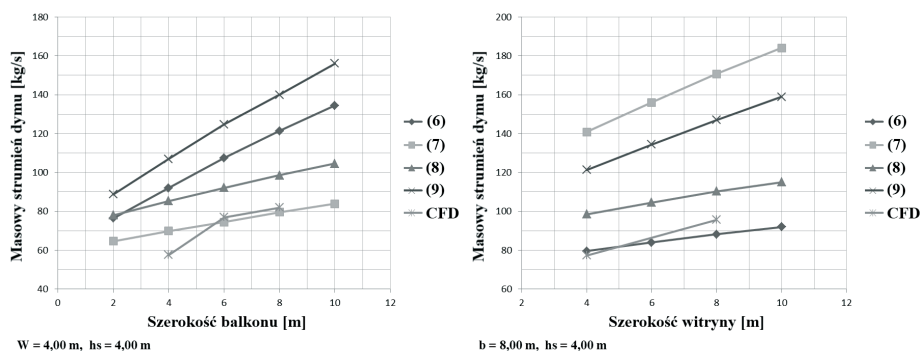
Rys. 3. Wyniki obliczeń analitycznych oraz numerycznych dla stałej szerokości balkonu równej 4,00 m

Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń dla stałej szerokości balkonu wynoszącej 8,00 m oraz zmiennych szerokości witryny oraz wysokości powyżej krawędzi balkonu zaobserwowano, że wyniki uzyskane z wykorzystaniem wzorów (6) i (7) były znacząco wyższe niż wyniki otrzymane z wykorzystaniem metody CFD, bądź wzorów (8) i (9), rys. 4.



Rys. 4. Wyniki obliczeń analitycznych oraz numerycznych dla stałej szerokości balkonu równej 8,00 m

Rozważając zmienną szerokość balkonu przy stałej szerokości witryny, bądź zmienną szerokość witryny przy stałej szerokości balkonu zaobserwowano, że wyniki masowego strumienia dymu otrzymane na drodze obliczeń numerycznych są wyższe niż wyniki otrzymane z wykorzystaniem wzoru (8) dla szerokości witryny pomieszczenia bądź szerokością balkonu większych niż 4,00 m, rys. 5.



Rys. 5. Wyniki obliczeń analitycznych oraz numerycznych dla różnych szerokości balkonu oraz witryny

## 6. Wnioski

W przeprowadzonych analizach nie rozważano wpływu wysokości nadproża, obecności nadproża na krawędzi balkonu, znacznych szerokości balkonów lub dużych wysokości powyżej jego krawędzi na przyrost masowego strumienia dymu w rozpylającej się kolumnie konwekcyjnej. W pracy nie rozważano także wpływu działania instalacji tryskaczowej na przepływ dymu, poza ograniczeniem całkowitej mocy pożaru do 2,50 MW.

Najlepszą zgodność wyników przeprowadzonych obliczeń analitycznych i numerycznych uzyskano stosując zależność (8), przy czym wartości otrzymane z wykorzystaniem metody analitycznej były niższe niż te wyznaczone z wykorzystaniem analiz numerycznych dla szerokich balkonów i witryn. Wyniki otrzymywane z wykorzystaniem metodologii opisanej w normie NFPA 92 oraz wzoru (6) były znacząco wyższe niż wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych, w szczególności dla dużych wysokości powyżej krawędzi balkonu. Dla większości analizowanych przypadków wyniki otrzymane

z wykorzystaniem wzoru (9) miały zadowalającą zgodność z wynikami obliczeń numerycznych z zachowaniem wystarczającego marginesu bezpieczeństwa.

Prowadząc obliczenia analityczne masowego strumienia dymu w rozpylającej się kolumnie konwekcyjnej dymu należy pamiętać o granicach stosowania poszczególnych

wzorów, oraz o ograniczonej możliwości ich prawidłowego wykorzystania dla obliczeń w budynkach o skomplikowanej architekturze, lub niewielkich otworach międzykondygnacyjnych. W związku z tym w procesie projektowania systemów wentylacji oddymiającej wielkokubaturowych obiektów budowlanych niezbędnym narzędziem potwierdzającym ich skuteczność są obliczenia numeryczne z wykorzystaniem metody CFD.

## Literatura

- 1 G. Sztarbała, G. Krajewski, P. Głąbski, W. Węgrzyński. Projektowanie systemów wentylacji pożarowej w obiektach budowlanych. Kurs organizowany przez Zakład Badań Ogniwych. Warszawa, 19-21 września 2011 r, s. nlb., Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2011.
- 2 P.H. Thomas, P.L. Hinkley, C.R. Theobald, D.L. Simms. Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No 7, The Stationary Office, Londyn 1963
- 3 H.P. Morgan, The horizontal flow of buoyant gases toward an opening. Fire Safety Journal, vol. 11, no. 3, 1986
- 4 G.O. Hansell, Heat and mass transfer process affecting smoke control in atrium buildings. South Bank University, 1993
- 5 BS 7974 Part 4: Components for smoke and heat control systems. Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires. Code of practice, Londyn 2003
- 6 CIBSE Guide Volume E: Fire Engineering, Chartered Institution of Building Services Engineers, Londyn 2003
- 7 NFPA 92, Standard for Smoke Control Systems, 2012 Edition
- 8 M. Law, Measurements of balcony smoke flow. Fire Safety Journal, vol. 24, no.2, 1995
- 9 PD 7974: Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 2: Spread of smoke and toxic gases within and beyond the enclosure of origin, BSI, Londyn 2002
- 10 R. Harrison, M.J. Spearpoint, Entrainment of air into a balcony spill plume, Journal of Fire Protection Engineering, vol. 16, no. 3, 2006

## Smoke and heat flow in a large volume building in case of fire

Wojciech Węgrzyński<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fire Research Department, Building Research Insititute, e-mail: w.wegrzynski@itb.pl

**Abstract:** In the paper author presents chosen analytic formulas for determining mass flow of heat and smoke into smoke reservoir in prescribed layout of vertical and horizontal wall boundaries, which include room where the fire starts, a wall with an opening and a downstand, and a projecting balcony, all fit inside a large volume building. Results of analytical calculations were compared to the results of performed numerical studies using CFD method, and the final design guidelines are given.

**Keywords:** fire, smoke, smoke and heat ventilation, atria