

**SCIENTIFIC
STUDIES**
Monographs

**PRACE
NAUKOWE**
Monografie

Wojciech Węgrzyński

Wpływ układu przegród
w budynku na przepływ dymu
w warunkach pożaru

Impact of building partitions
on the flow of smoke in fire



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2021

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor naczelny
Z-cy redaktora naczelnego

Sekretarz
Członkowie

prof. dr hab. inż. LECH CZARNECKI
prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI
dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT, prof. ITB
dr MICHAŁ GAJOWNIK
dr hab. inż. PAWEŁ LEWIŃSKI, prof. ITB
dr inż. TERESA MOŻARYN
mgr inż. JAN SIECZKOWSKI
dr inż. EWA SZEWCZAK
dr inż. SEBASTIAN WALL

Recenzenci

dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT, prof. ITB
dr hab. inż. TOMASZ LIPECKI, prof. PL
prof. zw. dr hab. inż. BOGDAN MIZIELIŃSKI

Redakcja
dr MICHAŁ GAJOWNIK

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa 2021

Czterysta siedemdziesiąta pozycja
„Prac Naukowych ITB”

ISBN 978-83-249-8583-8; 978-83-249-8594-4 (PDF)

Wydawca i Autorzy dołożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności, ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.



Instytut Techniki Budowlanej

Dział Wydawnictw Naukowych
02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21, tel.: 22 843 35 19
tel.: 22 56 64 208, e-mail: wydawnictwa@itb.pl www.itb.pl

Spis treści

<i>Streszczenie</i>	5
<i>Summary</i>	7
Od Autora.....	9
1. Wprowadzenie	13
1.1. Przepływ dymu w obiekcie budowlanym	13
1.2. Systemy wentylacji pożarowej	17
1.3. Wentylacja oddymiająca.....	18
1.4. Wymiarowanie systemów wentylacji oddymiającej	21
1.5. Problematyka badań nad przepływem dymu w układach przegród budowlanych	23
2. Zagrożenia związane z dymem a bezpieczeństwo pożarowe w budynku	27
2.1. Zagrożenia związane z dymem.....	27
2.2. Kryteria akceptowalności ryzyka związanego z zadymieniem.....	31
3. Przepływ dymu przez układ przegród budowlanych	35
3.1. Rozwój pożaru a przepływ dymu w układzie pomieszczeń	35
3.2. Wpływ dymu z pomieszczenia objętego pożarem	38
3.3. Określanie masowego strumienia dymu płynącego pod przegradą poziomą	41
3.4. Określanie masowego strumienia dymu wpływającego do zbiornika dymu	46
4. Modelowanie przepływu dymu	51
4.1. Modelowanie fizykalne	51
4.2. Modelowanie strefowe	54
4.3. Metoda obliczeniowej mechaniki płynów (CFD)	56
5. Badania eksperymentalne i poczynione założenia	67
5.1. Podsumowanie autorskich badań eksperymentalnych.....	67
5.2. Wybrany układ przegród budowlanych.....	70
5.3. Założenia do obliczeń numerycznych.....	71
5.4. Określanie masowego strumienia przepływu w wybranej płaszczyźnie	73
5.5. Model fizykalny wykorzystany do walidacji obliczeń.....	75

6. Określenie przepływu dymu w wybranym układzie przegród budowlanych.....	79
6.1. Eksperyment 1 – wpływ wielkości i kształtu lokalu oraz lokalizacji pożaru na masowy strumień dymu.....	79
6.2. Eksperyment 2 – wpływ wielkości otworu w przegrodzie pionowej na masowy strumień dymu	85
6.3. Eksperyment 3 – wpływ głębokości przegrody poziomej na przepływ dymu	99
7. Podsumowanie i wnioski.....	111
Bibliografia	115

OD AUTORA

Monografia została opracowana na podstawie rozprawy doktorskiej [1] pod tym samym tytułem, z uwzględnieniem uwag recenzentów oraz dyskusji w trakcie jej publicznej obrony. Dzięki pracy, która stanowiła podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych, chciałem przygotować praktyczne kompendium wiedzy poświęcone problematyce przepływu dymu w wielkokubaturowych obiektach budowlanych. Wiedza ta jest wykorzystywana przeze mnie w praktyce zawodowej, a dzięki niniejszej monografii będzie mogła służyć innym projektantom, inżynierom lub wykonawcom systemów wentylacji pożarowej w obiektach budowlanych.

Pragnę wyrazić podziękowania Dyrekcji Instytutu Techniki Budowlanej za pomoc, jaką otrzymałem w trakcie realizowania badań przedstawionych w niniejszej pracy oraz w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej. Wielkie wyrazy wdzięczności kieruję w stronę Promotora pracy – Prof. dr. hab. Marka Koneckiego, który wiele lat temu wprowadził mnie w niezwykle świat modelowania zjawisk fizycznych związanych z bezpieczeństwem pożarowym. Rady Prof. M. Koneckiego okazały się bezcenne, szczególnie w zakresie opisu modelowania strefowego oraz modelowania przepływu turbulentnego. Pragnę także podziękować recenzentom – Prof. dr. hab. inż. Bogdanowi Mizielińskiemu oraz Dr. hab. inż. Tomaszowi Lipeckiemu za analizę pracy oraz ukierunkowanie moich przyszłych badań.

Wojciech Węgrzyński

Oznaczenia i symbole

Litery greckie

- α – współczynnik szybkości przyrostu strumienia ciepła w pożarze, [kW/s²]
- γ – stosunek ciepła właściwego (c_p / c_v) płynu
- Γ – zmienna modelu transportu promieniowania P1
- ε – dyssypacja kinetycznej energii turbulencji, [m³/s²]
- Θ – przyrost temperatury dymu, [K]
- $\Theta_{\max,w}$ – maksymalny przyrost temperatury dymu wpływającego przez otwór, [K]
- κ – współczynnik związany z wypływem dymu z pomieszczenia przy założeniu niejednorodnego rozkładu temperatury wpływającego dymu, [-]
- μ – dynamiczny współczynnik lepkości płynu, [kg/(ms)]
- μ_t – współczynnik dynamicznej lepkości turbulentnej płynu, [kg/ms]
- Π_i – bezwymiarowa grupa i , [-]
- ρ – gęstość gazu [kg/m³] w ciśnieniu odniesienia
- ρ_{amb} – gęstość gazu w temperaturze otoczenia, [kg/m³]
- ρ_i – gęstość gazu w pomieszczeniu objętym pożarem [kg/m³] w ciśnieniu odniesienia
- ρ_0 – gęstość gazu poza pomieszczeniem objętym pożarem [kg/m³] w ciśnieniu odniesienia
- σ – współczynnik korekcyjny (3.8) o wartości 2, [-]
- τ – siły tarcia, [N]
- $-\rho \overline{\mu'_i \mu'_j}$ – naprężenia turbulentne (Reynoldsa), [Pa]

Oznaczenia literowe

- A – powierzchnia pożaru, [m²]
- A_o – powierzchnia otworu, [m²]
- A_v – powierzchnia otworów usuwających dym, [m²]
- A_i – powierzchnia otworów napowietrzających, [m²]
- b – głębokość przegrody poziomej (balkon, antresola), [m]
- C_d – współczynnik wypływu przez otwór wejściowy do lokalu (nazywany także współczynnikiem „nadproża”), [-]

- C_e – współczynnik wielkości pomieszczenia, [-]
 C_o – współczynnik przepływu z lokalu, [-]
 C_i – współczynnik przepływu do lokalu, [-]
 C_{μ} – stała modelu turbulencji k - ϵ , [-]
 C_{LR} – współczynnik w równaniu Veritera, [-]
 c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, [J/g]
 c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości, [J/g]
 $C_{v,i}$ – współczynnik wypływu otworów napowietrzających, [-]
 $C_{v,o}$ – współczynnik wypływu otworów usuwających dym, [-]
 D – średnica pożaru, [m]
 D_i – współczynnik dyfuzji filtra, [m²/s]
 d, d_w – grubość warstwy dymu (także w odniesieniu do zbiornika dymu), [m]
 F – siły zewnętrzne, [N]
 Fr – liczba podobieństwa Froude'a, [-]
 g – stała przyciągania ziemskiego, [N/kg]
 $\Delta H_{c,eff}$ – efektywne ciepło spalania paliwa, [kJ/kg]
 H_w – współczynnik równania Veritera
 h_b – wysokość od podłogi do poziomu przegrody poziomej (balkon, antresola), [m]
 h_c – współczynnik przejmowania ciepła, [W/(m²K)]
 \dot{h}_L, \dot{h}_U – strumienie entalpii i ciepła wpływające do warstwy dolnej i górnej dymu
 h_o – wysokość otworu, [m]
 I, I_b – strumień promieniowania cieplnego, [kW/m²]
 K – bezwymiarowy współczynnik strat ciepła w warstwie dymu, [-]
 k – kinetyczna energia turbulencji, [m²/s²]
 k_{pc} – współczynnik przewodnictwa cieplnego przegrody; gęstość i ciepło właściwe przegrody
 l – wymiar charakterystyczny, [m]
 \dot{m} – masowy strumień dymu, [kg/s]
 \dot{m}_L, \dot{m}_U – strumienie masy gazów wpływających do warstwy dolnej i górnej dymu, [kg/s]
 \dot{m}_p – masowy strumień dymu w kolumnie konwekcyjnej, [kg/s]
 \dot{m}_s, \dot{m}_b – masowy strumień dymu na krawędzi przegrody poziomej (balkon, antresola), [kg/s]
 \dot{m}_w, \dot{m}_o – masowy strumień dymu wpływającego z lokalu, [kg/s]
 \dot{m}_v – masowy strumień gazu usuwany ze zbiornika dymu, [kg/s]

$\dot{m}_{p,3D}$	} – masowy strumień gazu w kolumnie trójwymiarowej, liniowej oraz na końcach kolumny, [kg/s]
$\dot{m}_{p,2D}$	
$\dot{m}_{p,ends}$	
N	– wysokość, na jakiej znajduje się tzw. płaszczyzna neutralna ciśnienia, [m]
P	– obwód źródła pożaru, [m]
p_i	– ciśnienie powietrza w pomieszczeniu objętym pożarem, [Pa]
p_0	– ciśnienie powietrza poza pomieszczeniem objętym pożarem (również rozumiane jako ciśnienie odniesienia), [Pa]
q	– strumień ciepła, [kW]
\dot{Q}_c	– konwekcyjny strumień ciepła wydzielanego w pożarze (konwekcyjna moc pożaru), [kW]
\dot{Q}_t	– całkowity strumień ciepła wydzielanego w pożarze (moc pożaru), [kW]
r	– odległość od osi kolumny konwekcyjnej dymu, mierzona w rzucie poziomym, [m]
\mathfrak{R}	– uniwersalna stała gazowa, [J/(mol·K)]
Re	– liczba podobieństwa Reynoldsa, [-]
s_{ji}	– składowe tensora odkształcenia kąтового (deformacji), [s ⁻¹]
T_a	– temperatura otoczenia, [K]
$T_{max,w}$	– maksymalna temperatura dymu wypływającego przez otwór, [K]
T_s	– temperatura dymu, [K]
\dot{V}	– objętościowy strumień gazu, [m ³ /s]
V_u	– prędkość przepływu, [m/s]
V_y	– prędkość przepływu powietrza – składowa w osi Y, [m/s]
W_{CH}	– odległość pomiędzy kurtynami kierunkującymi, [m]
$W_{e,s}$	– efektywna szerokość strumienia dymu na krawędzi rozplywu, [m]
W_o	– szerokość otworu łączącego pomieszczenie z pasażem, [m]
W_R, W_W	– szerokość zastępcza w równaniu Veritera, [m]
Y	– wysokość do podstawy warstwy dymu w pomieszczeniu, [m]
Y_i	– i -ty składnik mieszaniny
Y_{soot}	– współczynnik produkcji sadzy z masy paliwa, [g/g]
Z	– wysokość, [m]
Z_s	– wysokość od krawędzi balkonu do granicy warstwy wolnej od dymu, [m]

1. WPROWADZENIE

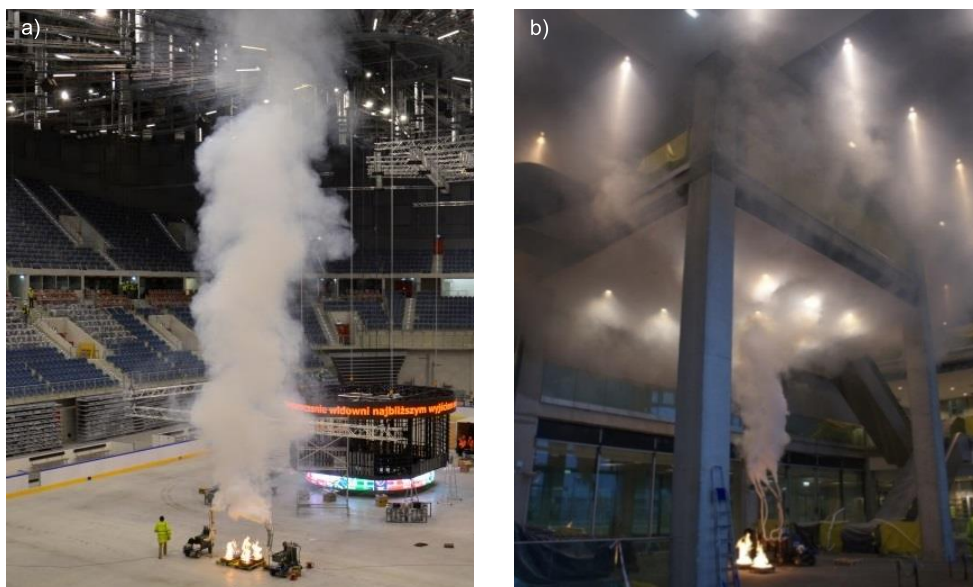
1.1. Przepływ dymu w obiekcie budowlanym

Dym i ciepło powstałe w pożarze stanowią zagrożenie dla użytkowników budynku, jego konstrukcji i instalacji oraz elementów wyposażenia i wykończenia wewnątrz. Zagrożenie to może być ograniczane na wiele sposobów – jednym z nich jest zastosowanie urządzeń usuwających dym i ciepło, nazywanych systemami wentylacji pożarowej. Na skuteczność systemu wentylacji pożarowej wpływają nie tylko jego parametry pracy, ale także kontekst architektoniczny, w jakim system się znajduje. Dym proliferuje w budynku, opływając przegrody budowlane, co prowadzi do powstania lokalnych zawirowań, które wpływają na wzrost masy dymu oraz spadek jego temperatury. Rozpatrywanie układów wentylacji pożarowej w oderwaniu od przestrzeni, którą chronią, jest pozbawione sensu i prowadzi do błędów projektowych. Ich ceną, w najlepszym wypadku, jest nieuzasadniony koszt powstania przewymiarowanej instalacji, a w najgorszym – życie bądź zdrowie ludzi.

Wykorzystanie systemów wentylacji pożarowej jest często niezbędnym krokiem przy dostosowywaniu projektowanego wielkokubaturowego obiektu budowlanego do wymagań podstawowych związanych z bezpieczeństwem pożarowym [2]. Poza podniesieniem poziomu bezpieczeństwa pożarowego, wykorzystanie tych systemów może mieć również skutek formalno-prawny, polegający na złagodzeniu niektórych wymagań przepisów techniczno-budowlanych [3], np. przez powiększenie maksymalnej dopuszczalnej powierzchni strefy pożarowej lub długości dróg ewakuacji. W niektórych budynkach konieczność zastosowania systemów wentylacji pożarowej wynika wprost z wymagań prawa – do tych przestrzeni można zaliczyć pasaż handlowy, przekryty ciąg pieszy, do którego przylegają lokale handlowe i usługowe. Systemy wentylacji pożarowej są tak ważne w ochronie życia, że niespełnienie wymagań przepisów związanych z ich wykorzystaniem może stanowić podstawę do uznania obiektu za zagrażający życiu [4]. Z taką sytuacją wiążą się konsekwencje prawne, obejmujące m.in. natychmiastowe zamknięcie obiektu do czasu usunięcia nieprawidłowości.

W procesie projektowania systemów wentylacji pożarowej wielkokubaturowych obiektów budowlanych wykorzystywane są zależności empi-

ryczne rozwijane od lat 70. XX w. [5–7]. O ile – w przypadku przepływu dymu w kolumnie osiowo-symetrycznej – wyznaczenie ilości dymu powstałego w pożarze jest możliwe z wykorzystaniem prostych zależności empirycznych [8, 9], gdy dym na swojej drodze opływa wiele przegród budowlanych (fot. 1), o tyle wyznaczenie masy dymu w miejscu jego usunięcia jest dość skomplikowane. W latach 80. i 90. XX w. badacze zwracali uwagę na różny charakter przepływu dymu w zależności od konfiguracji opływanych przegród budowlanych. Powstałe modele matematyczne rozplywających się kolumn dymu w swoim opisie zawierały informacje o długości poziomej i pionowej drogi, jaką musi pokonać dym [10–13]. Wykazano także wpływ szerokości otworu na możliwość gwałtownego przyrostu masy dymu w budynku, czego skutkiem może być szybkie i niespodziewane zadymienie wyższych kondygnacji [11]. Do dziś problemy związane z przepływem dymu w kolumnie konwekcyjnej lub zjawiska zachodzące w trakcie tego przepływu stanowią obszar zainteresowania badaczy i przedmiot aktualnych badań [14–18].



*Fot. 1. Przepływ dymu w układzie przegród budowlanych
a) prosty układ przegród, b) skomplikowany układ przegród;
widoczna jest różnica w ilości dymu płynącego w obszarze kolumny konwekcyjnej
(osiowo-symetrycznej) a wypływem z krawędzi przegrody poziomej (fot. Autora)*

Projektant powinien posiadać wiedzę pozwalającą mu zrozumieć wpływ wewnętrznej architektury obiektu na ilość dymu, jaka może

powstać w czasie pożaru. Nie dotyczy to wyłącznie wiedzy na temat określenia masy dymu, jaką należy usunąć z obiektu, ale także o zbudowanie intuicji, która pozwoli ocenić skutki decyzji podejmowanych przez innych uczestników procesu budowlanego na działanie systemu przeciwpożarowego. Należy również pamiętać, że rozpoczęcie użytkowania obiektu nie jest zakończeniem procesu tworzenia skutecznego systemu wentylacji pożarowej – praktyka pokazuje, że obiekty handlowo-usługowe są nieustannie zmieniane i modernizowane. Wprowadzanie zmian w systemie wentylacji istniejącego obiektu jest niezwykle trudne, stąd ważne jest wyczucie, czy zmiany architektoniczne, np. w obrębie witryn nowych lokali, wymagają ingerencji w istniejące rozwiązania.

Zjawiska zachodzące podczas wypływu dymu z pomieszczenia oraz przepływu dymu przez układy przegród budowlanych (fot. 2) są szczególnie ważne w przypadku projektowania wielokubaturowych obiektów budowlanych, jak np. centra handlowe, hale widowiskowe lub terminale pasażerskie. W obiektach tych powszechnie wykorzystuje się systemy wentylacji oddymiającej (mechaniczne i grawitacyjne), wykorzystujące wspólną kubaturę, z której usuwany jest dym (tzw. zbiornik dymu). Przepływ dymu od miejsca powstania pożaru do zbiornika dymu następuje wyłącznie w wyniku działania sił natury: siły wyporu, kształtowania się strumieni podsufitowych lub różnicy ciśnienia pomiędzy przestrzeniami.



*Fot. 2. Dym rozprzestrzeniający się w budynku wielokubaturowym
a) wypływ dymu z lokalu do pasażu,
b) dym opływający poziomą przegrodę budowlaną (fot. Autora)*

Ponieważ system wentylacji nie wpływa bezpośrednio na przepływ dymu, można stwierdzić, że jego ilość, płynąca w układzie przegród, zależy od wielkości pożaru i kontekstu architektonicznego, w jakim pożar ma miejsce. Skuteczny system wentylacji musi odbierać każdy przepływ dymu w budynku, a zatem istnieje bezpośrednie powiązanie pomiędzy parametrami systemu wentylacji, poziomem bezpieczeństwa w obiekcie oraz układem przegród budowlanych, jakie na swojej drodze musi pokonać dym.

W procesie projektowania skomplikowanych obiektów budowlanych widoczny jest niedostatek współpracy pomiędzy osobami odpowiedzialnymi za kształtowanie przestrzeni (architekt, konstruktor) a projektantami instalacji. Skutkiem tego są rozwiązania architektoniczne niekorzystnie wpływające na przepływ dymu w obiekcie, a co za tym idzie na zagrożenia z nim związane. Nieporozumienia pomiędzy branżystami wpływają także na koszt samych prac projektowych. Rozwiązanie problemów związanych z niedostosowaniem kształtu przestrzeni wewnątrz budynku do technicznych możliwości systemów wentylacji pożarowej wymaga czasu, dużego nakładu pracy oraz kosztownych badań numerycznych z wykorzystaniem metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD, ang. *Computational Fluid Dynamics*). Dzięki CFD możliwe jest oszacowanie przepływu dymu w układzie przegród budowlanych.

Najważniejszym parametrem opisującym pracę systemu wentylacji pożarowej jest jego wydajność, tj. określona maksymalna ilość dymu, będącego mieszaniną powietrza oraz niewielkich ilości cząstek sadzy, aerozoli i gazowych produktów spalania, jaką jest w stanie usunąć system wentylacji pożarowej (wyrażona zazwyczaj w m^3/h). Produkty spalania stanowią znikomą część usuwanej mieszaniny, co wyraźnie widać w opisywanych w literaturze stężeniach krytycznych poszczególnych składników dymu, wyrażanych w częściach grama na metr sześcienny. Oznacza to, że dopuszczalne jest traktowanie dymu jako gorącego powietrza. W związku z powyższym analityczne metody określania ilości dymu niezbędnej do usunięcia z obiektu budowlanego w większości odnoszą się do wyznaczenia masy unoszącego się, ogrzanego przez pożar powietrza, zależącej m.in. od projektowej wielkości pożaru oraz przegród budowlanych, które na swojej drodze dym musi opłynąć. Znając masę płynącego dymu, ilość energii uwolnionej w trakcie pożaru oraz ciepło właściwe powietrza, możliwe jest przybliżone określenie średniej temperatury dymu, przy czym w obliczeniach wykorzystuje się – w stosunku do całej energii wyzwolonej w pożarze – różnego rodzaju współczynniki ilości energii zgromadzonej w dymie [19].

W ocenie Autora uznane metody projektowania systemów wentylacji pożarowej, oparte na zależnościach analitycznych, znacząco zawyżają ilość dymu powstałą w pożarze. Przewymiarowanie to wpływa na zwiększenie wydajności systemów wentylacji pożarowej, co można błędnie określić jako „bezpieczne”. W wielu przypadkach nadmierne zwiększenie ilości powietrza usuwanego z chronionej kubatury powoduje przyrost prędkości powietrza napływającego do tej kubatury, a to może przyczynić się do wymuszonego mieszania się dymu z napływającym powietrzem kompensacyjnym. Zawyżenie wymaganej ilości powietrza względem rzeczywistej generacji dymu może być tak duże, że powinno być traktowane jako błąd projektowy. Źródła literaturowe [19–21] podają, że błąd znanych analitycznych modeli przepływu dymu wynosi od kilkudziesięciu do ponad stu procent wartości masowego strumienia dymu. Powyższe opinie są zbieżne z wnioskami sformułowanymi na podstawie wcześniejszych badań przeprowadzonych przez Autora [22].

1.2. Systemy wentylacji pożarowej

Systemy wentylacji pożarowej były przedmiotem licznych publikacji, monografii i podręczników akademickich. Za najważniejszą polskojęzyczną publikację w tym zakresie można uznać monografię B. Mizielińskiego i G. Kubickiego [23], poza nią warto wymienić jeszcze monografię D. Brzezińskiej [24] oraz Instrukcje ITB nr 378/2002 [25], 490/2014 [26] i 493/2015 [27]. Spośród publikacji anglojęzycznych za najbardziej wartościowe można uznać podręczniki [28, 29] oraz dwa obszernie rozdziały poświęcone wentylacji pożarowej w *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [30, 31].

Wentylacja pożarowa jest terminem określającym szeroki wachlarz systemów i rozwiązań technicznych. Podział i nazewnictwo poszczególnych podsystemów wentylacji pożarowej nie jest jednoznacznie zdefiniowany i budzi w środowisku wiele kontrowersji. Z uwagi na cel ich stosowania Autor dzieli systemy na [32]:

- wentylację oddymiającą, nazywaną także wentylacją poprzeczną (ang. SHEVS – *Smoke and Heat Exhaust Ventilation System*); zasadą działania systemu jest usuwanie dymu z warstwy pod stropem pomieszczenia i utrzymanie wolnej od dymu przestrzeni, w której będą ewakuowani ludzie oraz działały ekipy ratownicze;

- wentylację wzdłużną, określaną czasem jako system kontroli dymu; zasadą działania systemu jest wzdłużny transport dymu, przez co zadymienienie utrzymuje się jedynie w predefiniowanym obszarze pomiędzy źró-