

st. kpt. mgr inż. Paweł WRÓBEL
Zakład Podstaw Budownictwa i Materiałów Budowlanych, SGSP
mgr inż. Łukasz OSTAPIUK
inżynier bezpieczeństwa pożarowego
mgr inż. Łukasz BAŁAGA
inżynier bezpieczeństwa pożarowego

Wytyczne projektowania systemów oddymiania mechanicznego w obiektach wielkokubaturowych z atrium wg normy NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition

część 2

1. Procedury obliczeniowe systemu oddymiania wg standardu NFPA 92. Standard for Smoke Control Systems, 2012 Edition

1.1. Zakres obowiązywania standardu NFPA 92

NFPA 92 2012 Edition [4] prezentuje metody szacowania lokalizacji dymu spowodowanego pożarem wewnątrz dużych wielkokubaturowych przestrzeni (np. atrium) lub pożarem w przestrzeniach przyległych do przestrzeni wielkokubaturowej.

Opisana w normie metodologia dotycząca systemów oddymiania oraz algorytmy obliczeniowe dostarczają fachowych podstaw, pomocnych przy projektowaniu, testowaniu, użytkowaniu i konserwacji nowych i przebudowywanych systemów usuwania dymu i ciepła wykorzystywanych do zarządzania dymem wewnątrz przestrzeni, w której może powstać pożar lub pomiędzy przestrzeniami oddzielonymi za pomocą kurtyn dymowych.

Normę zaleca się stosować do obliczeń systemów oddymiania dla budynków z atrium, hal oraz dużych przestrzeni wielkokubaturowych. Standardu nie należy stosować przy projektowaniu systemów oddymiania dla magazynów, obiektów przemysłowych lub innych podobnych przestrzeni. Standard ten nie opisuje również sposobów oszacowania oddziaływania dymu na ludzi i mienie.

1.2. Ogólne założenia projektowe

Cele projektowe NFPA 92 2012 Edition obejmują zarządzanie dymem wewnątrz przestrzeni wielkokubaturowych i w każdych niewydzielonych przestrzeniach połączonych z przestrzeniami wielkokubaturowymi. Jako przestrzeń

wielkokubaturową traktuje się atrium przebiegające od posadzki do poziomu zadaszania, które połączone są z pasażami komunikacyjnymi i obszarami spełniającymi różne funkcje usługowe.

Celem zaprojektowanego, zgodnie z omawianym standardem, systemu powinno być zapewnienie możliwości sterowania przepływem dymu w przestrzeniach komunikacyjnych analizowanego obiektu (na drogach ewakuacji).

Cele projektowe zostaną osiągnięte, jeżeli w zakładanym czasie projektowym system sterowania przepływem dymu zapewni utrzymanie podstawy warstwy dymu na zakładanej wysokości.

Efektom działania zaprojektowanej instalacji, do którego dąży się poprzez obliczenia, analizę i zabudowę systemu oddymiania, powinna być możliwość praktycznej realizacji co najmniej jednego z poniższych założeń:

- utrzymanie bezpiecznych warunków w przestrzeni obiektu w zasięgu wyjść ewakuacyjnych i przestrzeni ochronnych oraz dróg dojścia przez czas niezbędny użytkownikom do przejścia na zewnątrz bądź do przestrzeni ochronnych (wymagany czas bezpiecznej ewakuacji);
- utrzymanie warstwy dymu na zaprojektowanym/założonym poziomie.

1.3. Obliczenie ilości dymu wpływającego do warstwy dymu. Kolumna konwekcyjna dymu o symetrii osiowej

Kolumna konwekcyjna dymu jest kolumną symetryczną (rys. 18 w części pierwszej artykułu i rys. 20) masowe natężenie przepływu dymu należy obliczyć z wykorzystaniem równań (1), (2), (3)

$$z_1 = 0,166 \cdot Q_c^{2/5} \quad (1)$$

$$\text{kiedy } z > z_1, \quad \dot{m} = (0,071 Q_c^{1/3} z^{5/3}) + 0,0018 Q_c \quad (2)$$

$$\text{kiedy } z \leq z_1, \quad \dot{m} = 0,032 Q_c^{3/5} z \quad (3)$$

gdzie:

z_1 – wysokość płomienia [m],

Q_c – konwekcyjna część mocy pożaru [kW], $(0,7 \cdot Q)$,

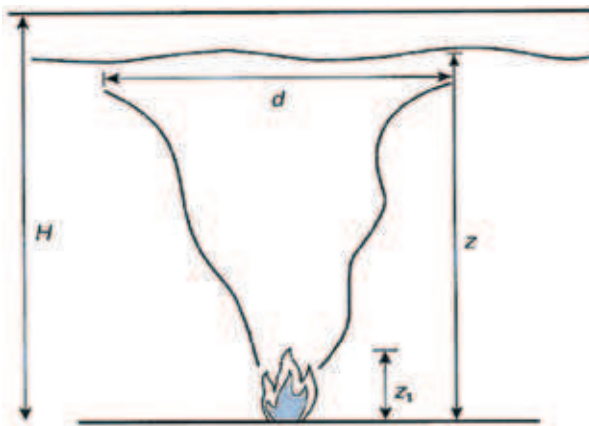
z – odległość od podstawy pożaru do podstawy warstwy dymu [m],

\dot{m} – masowy przepływ dymu w kolumnie konwekcyjnej dymu na wysokości z [kg/s].

Należy zaznaczyć, że wzory (1), (2), (3) nie uwzględniają rodzaju spalnego materiału, których szybkość wydzielania ciepła jest zależna od właściwości danego materiału palnego. Jest to spowodowane tym, że masa zasysanego powietrza do kolumny konwekcyjnej jest większa, niż masowa szybkość produkcji materiałów spalania i jej wartość jest tylko i wyłącznie funkcją mocy pożaru. Oczywiście na ilość generowanego dymu ma wpływ również lokalizacja pożaru, który może mieć miejsce na środku (powietrze zasysane jest do kolumny z każdej stro-

ny, większa ilość generowanego dymu) lub w narożniku (mniej powietrza zassanego) pomieszczenia/atrium. Konstrukcja wzoru zakłada, że powietrze zasysane jest ze wszystkich stron kolumny konwekcyjnej, na całej wysokości kolumny, licząc od poziomu pożaru do dolnego poziomu warstwy dymu.

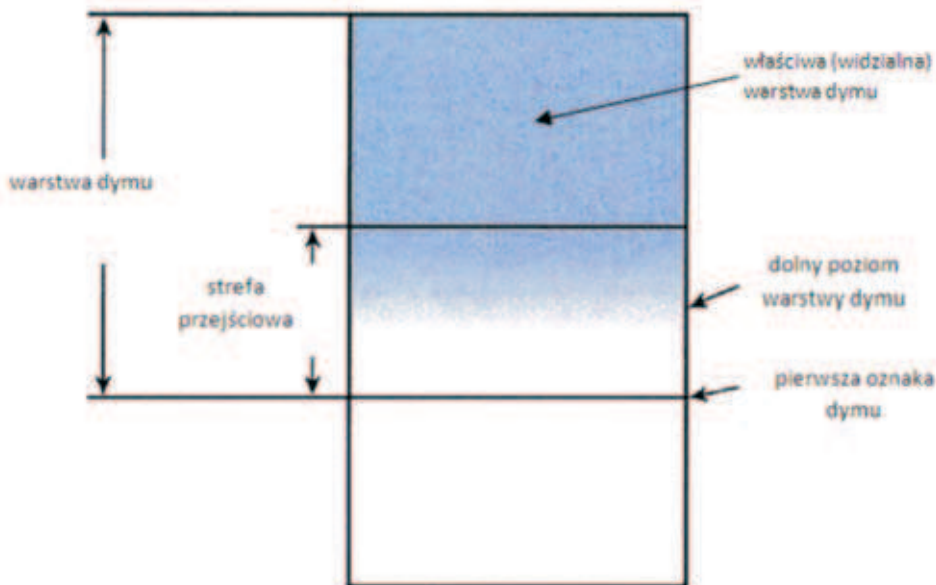
We wzorach (1), (2), (3) parametr (z) oznacza dolny poziom warstwy dymu (tak naprawdę pierwszej oznaki dymu, czyli niżej niż właściwy poziom warstwy dymu).



Rys. 20. Kolumna konwekcyjna dymu o symetrii osiowej. Opis oznaczeń przyjmowanych w obliczeniach

Źródło: NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition.

Należy zaznaczyć, że granica między warstwą dymu, a otoczeniem nie jest jednoznaczna i posiada obszar przejściowy (rys. 21). Projektując system oddymiania w przestrzeniach o dużych wysokościach, należy wziąć pod uwagę fakt, że strefa przejściowa może wynosić nawet 10% wysokości danej przestrzeni, a temperatura spada liniowo wraz wysokością, liczoną między dolnym poziomem warstwy, a najniższym poziomem strefy przejściowej.



Rys. 21. Struktura warstwy dymu

Źródło: NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że wraz ze wzrostem wysokości, kolumna konwekcyjna poszerza się i w wysokich atriach o małej powierzchni podłogi może dojść do sytuacji, w których dym zanim dotrze do projektowej warstwy dymu, stykać się będzie ze ścianami otaczającymi atrium lub, co gorsza, będzie wpływać do przestrzeni przyległych. Średnica kolumny konwekcyjnej liczona jest wg wzoru (4).

$$d_p = K_d \cdot z \quad (4)$$

gdzie:

d_p – średnica kolumny [m],

K_d – stała ($K_d=0,5$).

Jeżeli średnica wznoszącej się kolumny będzie większa niż wymiary w rzucie poziomym atrium, należy zapobiec rozprzestrzenianiu się dymu na przestrzenie przyległe, np. poprzez zastosowanie kurtyń dymowych wydzielających szczelnie kondygnacje (rys. 17, część pierwsza artykułu).

1.4. Balkonowa kolumna konwekcyjna dymu

Kiedy kolumnę konwekcyjną dymu stanowi kolumna balkonowa dymu (dym wydostaje się spod balkonu i wpływa do zbiornika dymu (rys. 22) i jeżeli parametr (z_b) jest mniejszy niż 15 m masowy przepływ dymu powinien być obliczony z wykorzystaniem równania (5).

$$\dot{m} = 0,36(QW^2)^{1/3}(z_b + 0,25H) \quad (5)$$

gdzie:

W – szerokość słupa dymu wypływającego spod balkonu [m],

z_b – wysokość kolumny konwekcyjnej dymu, liczona od spodu balkonu do podstawy warstwy dymu [m],

H – wysokość balkonu powyżej podstawy pożaru [m].

Równanie (5) nie powinno być stosowane, kiedy różnica temperatur pomiędzy warstwą dymu a otoczeniem jest mniejsza niż $2,2^\circ\text{C}$.

Szerokość kolumny dymu W powinna być określona z uwzględnieniem obecności zabudowanych pod balkonem fizycznych barier, takich jak zabudowane, w celu uniemożliwienia rozprzestrzeniania się dymu w poziomie pod balkonem, w poprzek balkonu kurtyny dymowe (kurtyny kierunkowe) (rys. 23). Jeżeli zastosowane zostaną kurtyny dymowe (kanały kierunkujące) w poprzek balkonu powinny mieć wysokość równą co najmniej 10% wysokości liczonej od posadzki do zadaszenia balkonu. W przypadku braku tych barier ekwiwalent szerokości słupa dymu powinien być obliczony z wykorzystaniem równania (6)

$$W = w + b \quad (6)$$

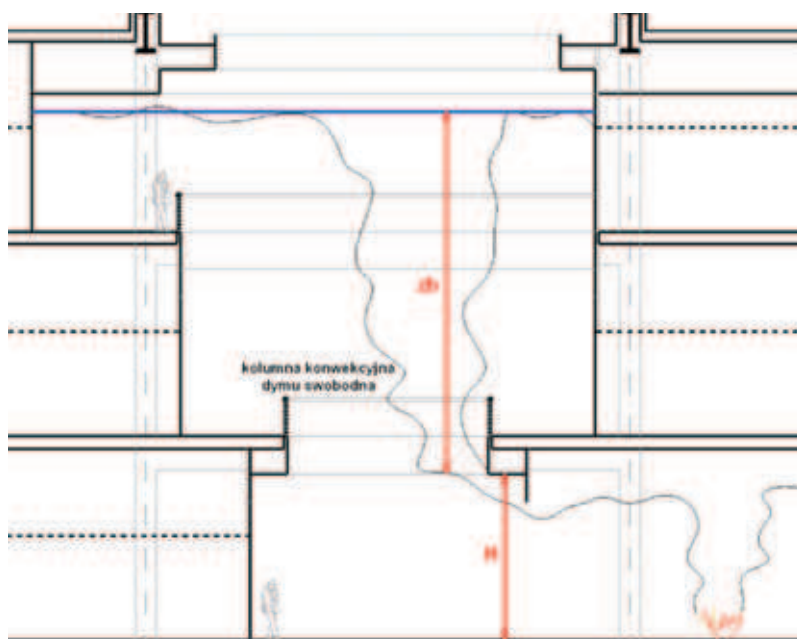
gdzie:

W – szerokość kolumny konwekcyjnej dymu [m],

w – szerokość otworu z pomieszczenia objętego pożarem, z którego wypływa dym [m],

b – odległość od otworu do krawędzi balkonu [m].

Obserwacje podczas badań w dużej skali wskazują, że równanie (6) jest poprawne dla kolumn, które wypływają z pomieszczenia o szerokości 5–14 m i ich rozprzestrzenianie w poziomie pod balkonem nie jest ograniczone za pomocą kurtyn dymowych.



Rys. 22. Balkonowa kolumna konwekcyjna dymu. Opis oznaczeń przyjmowanych w obliczeniach
Źródło: opracowanie własne na podstawie [10].

Kiedy kolumnę konwekcyjną dymu stanowi kolumna balkonowa dymu (dym wydostaje się spod balkonu i wpływa do zbiornika dymu) oraz z_b jest mniejsze niż 15 m i szerokość kolumny dymu pod balkonem W jest mniejsza niż 10 m, masowy przepływ dymu powinien być obliczony z wykorzystaniem równania (7).

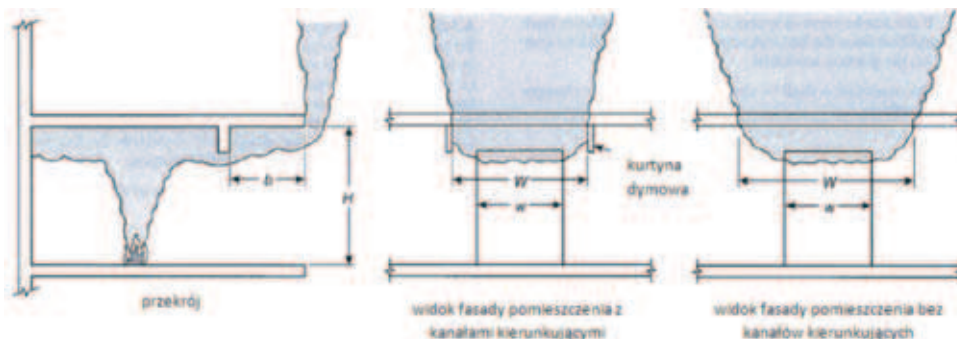
$$\dot{m}_b = 0,59\dot{Q}_c^{1/3} \cdot W^{1/5} (z_b + 0,17 \cdot W^{7/15} \cdot H + 10,35 \cdot W^{7/15} - 15) \quad (7)$$

gdzie:

\dot{m}_b – masowy przepływ dymu w kolumnie wpływającej do zbiornika dymu na wysokości z_b [kg/s],

\dot{Q}_c – konwekcyjna moc pożaru [kW],

W – szerokość słupa dymu wpływającego spod balkonu [m].



Rys. 23. Opis parametrów uwzględnianych w obliczeniach

Źródło: NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition.

Wzór (7) bazuje na podstawie przeprowadzonych analiz za pomocą programu CFD i najlepiej pasuje dla oszacowania powstającego dymu w wysokich atriach. Równanie (7) pozwala tak samo oszacować masowe natężenie przepływu dymu, jak równanie (5) dla wysokości podstawy warstwy dymu na poziomie 15 m od posadzki.

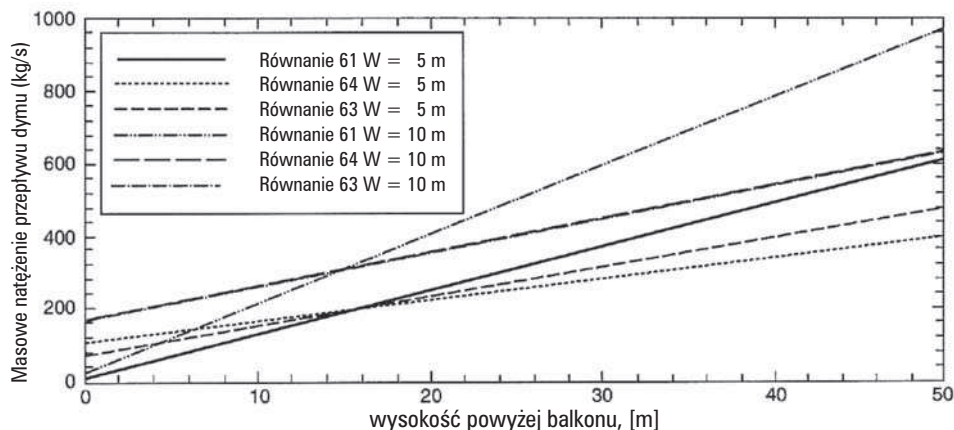
Kiedy kolumnę konwekcyjną dymu stanowi kolumna balkonowa dymu (dym wydostaje się spod balkonu i wpływa do zbiornika dymu) oraz z_b jest większe niż 15 m i szerokość kolumny dymu pod balkonem W jest większa niż 10 m, ale mniejsza niż 14 m, masowy przepływ dymu powinien być obliczony z wykorzystaniem równania (8)

$$\dot{m}_b = 0,2(\dot{Q}_c \cdot W^2)^{1/3}(z_b + 0,51 \cdot H + 15,75) \quad (8)$$

Dla kolumny wypływającej z wąskiego otworu, która wraz ze wzrostem wysokości przekształca się w kolumnę symetryczną wzór (7) w rezultacie daje większą wartość niż wzór (8). Jeżeli dolny poziom projektowej warstwy dymu dla kolumny balkonowej i kolumny symetrycznej zaprojektowany jest tak, że z_b jest większe niż 15 m, należy policzyć i porównać wartość masowego przepływu w kolumnie powstałej dla obu scenariuszy (kolumna balkonowa lub kolumna symetryczna). Do dalszych obliczeń systemu oddymiania należy wybrać wartość większą, spośród rozpatrywanych scenariuszy.

Na rysunku 24 zamieszczono wykres, w którym zestawiono wyniki obliczeń masowego natężenia przepływu dymu obliczone za pomocą równania (5) – linia 61, równania (7) – linie 63, równania (8) – linie 64. Konwekcyjna moc pożaru wynosiła 1000 kW, wysokość balkonu 5 m, a szerokość wypływu 5 lub 10 m.

Jak widać, intensywność masowego natężenia przepływu dymu zależy od wielu czynników, między innymi od wybranego wzoru i rodzaju przestrzeni, którą analizujemy. W przypadku niskich atriów norma NFPA 92 zaleca analizę ostatecznego projektu systemu oddymiania za pomocą programu klasy CFD.



Rys. 24. Masowe natężenie przepływu dymu w zależności od wysokości unoszenia i szerokości wypływu

Źródło: NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition.

1.5. Obliczenie średniej temperatury kolumny konwekcyjnej dymu

Średnia temperatura kolumny konwekcyjnej dymu powyżej wysokości płomienia powinna być określona z wykorzystaniem równania (9).

$$T_p(z) = T_o + \frac{Q_c}{mC_p} \quad (9)$$

gdzie:

T_p – średnia temperatura kolumny konwekcyjnej dymu na wysokości z [°C],

T_o – temperatura otoczenia [°C],

m – masowy przepływ dymu na wysokości z [kg/s],

C_p – ciepło właściwe gazów w słupie dymu (1,0 kJ/kg°C).

Uwaga: Dla obliczenia maksymalnej wydajności pojedynczego punktu wyciągu dymu bez wywołania zjawiska zasysania czystego powietrza spod warstwy dymu, należy w równaniu (8) zastosować dodatkowy współczynnik K opisujący udział energii przenoszonej drogą konwekcji i zawartej w warstwie dymu, w stosunku do całkowitej energii przenoszonej drogą konwekcji. W takim przypadku równanie (8) przyjmie postać równania (10)

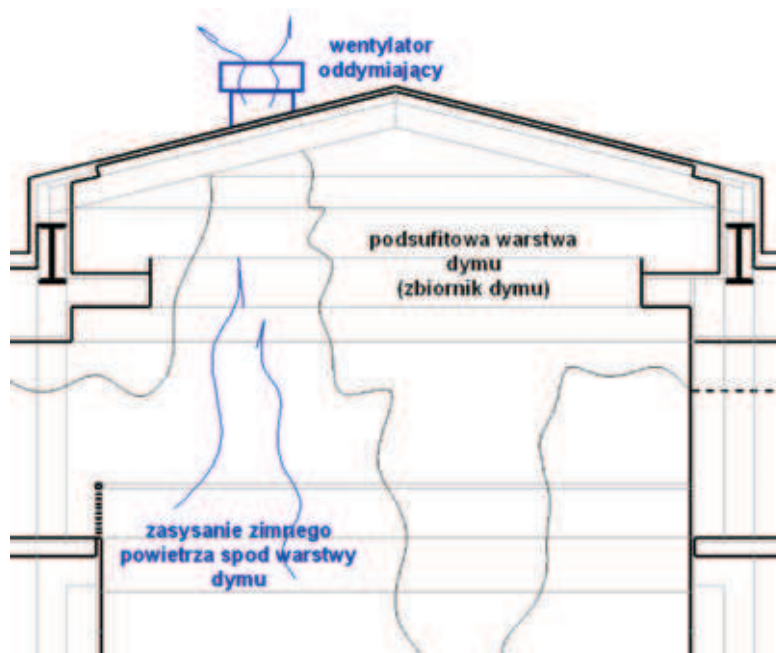
$$T_p = T_o + \frac{KQ_c}{mC_p} \quad (10)$$

gdzie:

K – część energii konwekcyjnej zawartej w warstwie dymu (przyjmuje się wartość K równe 0,5).

1.6. Obliczenie minimalnej liczby punktów wyciągu dymu

Minimalna liczba punktów wyciągu dymu powinna być określona w taki sposób, aby maksymalny przepływ dymu przez pojedynczy punkt wyciągu dymu następował bez występowania zjawiska zasysania czystego powietrza spod warstwy dymu (ang. plugholing). Zjawisko zasysania czystego powietrza spod warstwy dymu powstaje, gdy warstwa dymu jest zbyt małej grubości lub gdy wydajność wentylatorów jest zbyt wysoka. Jego wystąpienie zakłóca efektywność pracy systemu (rys. 25 i 26).



Rys. 25. Zjawisko zasysania zimnego powietrza spod warstwy dymu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4].

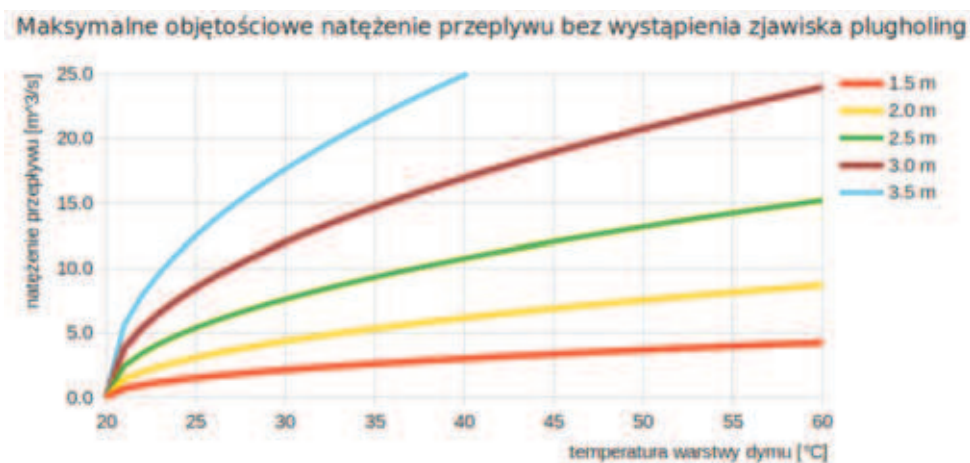
Należy zapewnić taką liczbę punktów wyciągu dymu, która wyeliminuje to zjawisko. Maksymalny objętościowy wyciąg dymu przez pojedynczy punkt wyciągu dymu, bez wystąpienia zjawiska zasysania powietrza spod warstwy dymu, powinna być określona z wykorzystaniem równania (11)

$$\dot{V}_{max} = 4,16\gamma d^{5/2} \left(\frac{T_s - T_o}{T_o} \right)^{1/2} \quad (11)$$

gdzie:

\dot{V}_{max} – maksymalne objętościowe natężenia przepływu bez wystąpienia zjawiska zasysania powietrza spod warstwy dymu w temperaturze T_s [m^3/s],
 γ – współczynnik lokalizacji punktu wyciągu dymu (bezwymiarowy),

Dla punktów wyciągu dymu, których środek znajduje się nie bliżej niż podwójna ich średnica od najbliższej ściany, należy przyjmować współczynnik $\gamma = 1,0$. Dla punktów wyciągu dymu, których środek znajduje się bliżej niż podwójna ich średnica od najbliższej ściany, należy przyjmować współczynnik $\gamma = 0,5$, d – głębokość warstwy dymu poniżej najniższego punktu wyciągu dymu [m]. T_s – temperatura absolutna warstwy dymu [K].



Rys. 26. Zależność maksymalnego przepływu w stosunku do temperatury oraz grubości warstwy dymu

Źródło: opracowanie własne.

Stosunek wartości d/D_i powinien być większy, niż 2, gdzie D_i stanowi średnicę punktów wyciągu dymu. Dla punktów wyciągu dymu o przekroju prostokątnym, wielkość D_i należy obliczyć z wykorzystaniem równania (12).

$$D_i = \frac{2ab}{a+b} \quad (12)$$

gdzie:

a – długość boku przekroju punktu wyciągu dymu [m],

b – szerokość boku przekroju punktu wyciągu dymu [m].

Jeżeli w celu wyeliminowania zjawiska zasysania powietrza spod warstwy dymu jest wymagane zastosowanie co najmniej 2 punktów wyciągu dymu, minimalna odległość pomiędzy nimi powinna być określona z wykorzystaniem równania (13)

$$S_{min} = 0,9 \cdot V_e^{1/2} \quad (13)$$

gdzie:

S_{min} – minimalna odległość pomiędzy krawędziami punktów wyciągu dymu [m],

V_e – objętościowe natężenie przepływu przez jeden punkt wyciągu dymu [m³/s].

1.7. Obliczenie objętościowego natężenia przepływu dymu

Objętościowe natężenie przepływu w warstwie dymu o określonej temperaturze powinna być określona z wykorzystaniem równania (14)

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (14)$$

gdzie:

\dot{V} – objętościowe natężenie wyciągu dymu [m^3/s],

\dot{m} – masowy wyciąg dymu [kg/sec],

ρ – gęstość dymu w temperaturze T [kg/m^3].

Gęstość dymu należy określić z wykorzystaniem równania (15)

$$\rho = \frac{p_{atm}}{RT_s} \quad (15)$$

gdzie:

p_{atm} – ciśnienie atmosferyczne (Pa) – należy przyjmować 101325 Pa,

R – masowa stała gazowa równa 287 [$\text{J}/\text{kg K}$],

T_s – temperatura absolutna dymu [K].

W związku z tym minimalną liczbę punktów wyciągowych ze strefy dymowej obliczamy z poniższego wzoru:

$$N = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}} \quad (16)$$

gdzie:

N – liczba punktów wyciągowych,

\dot{V} – objętościowe natężenie wyciągu dymu [m^3/s],

\dot{V}_{max} – maksymalne objętościowe natężenia przepływu bez wystąpienia zjawiska zasysania powietrza spod warstwy dymu w temperaturze T_s [m^3/s].



Rys. 27. Zależność maksymalnego przepływu w stosunku do temperatury oraz grubości warstwy dymu
Źródło: opracowanie własne.

W każdej strefie dymowej należy przewidzieć co najmniej N punktów wyciągu dymu. Zmniejszenie liczby punktów wyciągu dymu jest możliwe pod warunkiem zapewnienia większej grubości warstwy dymu pod kratką wyciągową.

1.8. Maksymalne wymiary zbiorników dymu

Przy projektowaniu systemu oddymiania bardzo ważne jest przestrzeganie zasad dotyczących zachowania maksymalnych powierzchni stref dymowych oraz ich maksymalnych wymiarów. Ich przekroczenie może doprowadzić do nadmiernego wychłodzenia dymów i gazów pożarowych, a co za tym idzie – do znacznego ograniczenia efektywności systemu.

Z uwagi na to, że w standardzie NFPA 92 nie określono wymagań odnośnie maksymalnych (dopuszczalnych) powierzchni stref dymowych, punktem wyjścia w tej kwestii jest norma brytyjska BS 7346-4: 2003, która stanowi, iż w przypadku pożaru znajdującego się bezpośrednio pod zbiornikiem dymu, maksymalna powierzchnia dowolnego zbiornika powinna wynosić 2000 m^2 , jeżeli zamontowano klapy dymowe lub 2600 m^2 , jeżeli zamontowano wentylatory oddymiające. W przypadku gdy pożar występuje w pomieszczeniu sąsiadującym z przestrzenią zawierającą zbiornik dymu bądź znajduje się poniżej antresoli w tej samej przestrzeni (np. w jedno- i wielokondygnacyjnych centrach handlowych czy w atriach), maksymalna dopuszczalna powierzchnia pomieszczenia pożarowego (lub antresoli), z którego gazy dymowe mogą przepływać do zbiornika, powinna wynosić 1000 m^2 , jeżeli zamontowano klapy dymowe lub 1300 m^2 , jeżeli zamontowano wentylatory oddymiające. Maksymalna powierzchnia zbiornika dymu powinna wynosić 1000 m^2 , jeżeli montowane są klapy dymowe lub 1300 m^2 , jeżeli montowane są wentylatory oddymiające.

1.9. Zapewnienie powietrza kompensacyjnego

Aby system oddymiania funkcjonował poprawnie, należy zapewnić napływ powietrza kompensacyjnego. Dostarczanie powietrza winno następować w sposób automatyczny. Niezależnie od miejsca usytuowania otworów, przez które będzie dostarczone do budynków powietrze kompensacyjne, musi być ono zawsze podawane poniżej warstwy dymu do strefy, w której powstał pożar.

Dla systemów, w których przewiduje się dostarczanie powietrza kompensacyjnego za pomocą wentylatorów nawiewnych, ich uruchomienie powinno nastąpić po uruchomieniu wentylatorów wywiewnych. Wcześniejsze uruchomienie (otworzenie) otworów napowietrzających mogłoby spowodować nadciśnienie w strefie, w której powstał pożar, a co za tym idzie przepływ dymu („wpychanie” dymu) do sąsiednich niezadymionych stref.

Nadmierna prędkość przepływu powietrza kompensacyjnego, poniżej warstwy gorących gazów i dymów pożarowych, może powodować mieszanie się dymu z powietrzem i lokalne powiększanie grubości warstwy dymu, a co za tym idzie przenikanie (przepływ dymu do sąsiedniej strefy dymowej) poniżej dolnej kra-

wędzi kurtyn dymowych, które zostały zamontowane na założonym poziomie. Z uwagi na możliwość pojawienia się zjawiska pogrubienia warstwy dymu na skutek turbulencji spowodowanej zbyt szybkim napływem, zaleca się, aby szybkość powietrza uzupełniającego w miejscu kontaktu z warstwą gorących gazów i dymów była mniejsza niż 1 m/s.

W przypadku usuwania dymu drogą wentylacji mechanicznej, należy dążyć do tego, aby w przypadku, kiedy powietrze kompensacyjne będzie dostarczane przez automatycznie otwierane drzwi ewakuacyjne, szybkość powietrza napływającego tą drogą ze względów psychologicznych, nie przekraczała 5 m/s. Przepływ powietrza w większych prędkościach powoduje dyskomfort i niepokój u ewakuujących się osób, co może doprowadzić do powstania paniki. Po przeprowadzeniu testów sprawdzających skuteczność działania systemów oddymiania (m.in. testy z wykorzystaniem ciepłego dymu przeprowadzane wg standardu AS 4391-1999 Smoke management systems – Hot smoke test przeprowadzone na kilku obiektach użyteczności publicznej) stwierdzono, że napływ powietrza kompensacyjnego, zlokalizowany w bliskiej odległości od miejsca potencjalnego pożaru, powoduje silne turbulencje, pociąganie dymu w kierunku przyływu strumienia powietrza kompensacyjnego oraz ochłodzenie dymu (zmniejszenie sił wyporu). Efektem może być lokalne obniżenie dymu ku podłodze, co może być niekorzystne w przypadku odprowadzania dymu i ciepła za pomocą grawitacyjnego systemu oddymiania (rys. 28). W praktyce zaleca się, aby prędkość napływu powietrza nie przekraczała 3 m/s.



Rys. 28. Wpływ nadmiernej prędkości napływu powietrza na przepływ dymu

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 29. Zastosowanie przepływu w celu ograniczenia rozprzestrzeniania się dymu z przestrzeni komunikacyjnej do przestrzeni atrium
Źródło: NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition.

atrium (rys. 29). W celu wytworzenia przepływu, przestrzeń korytarza komunikacyjnego musi być oddymiana z taką wydajnością, aby średnia prędkość przepływu ukierunkowanego od przestrzeni wielokubaturowej do przestrzeni korytarza w przekroju poprzecznym wynosiła V_e , gdzie V_e obliczamy wg wzoru (16).

$$V_e = 0,64 \cdot \left(g \cdot H \cdot \frac{T_s - T_o}{T_s} \right)^{1/2} \quad (16)$$

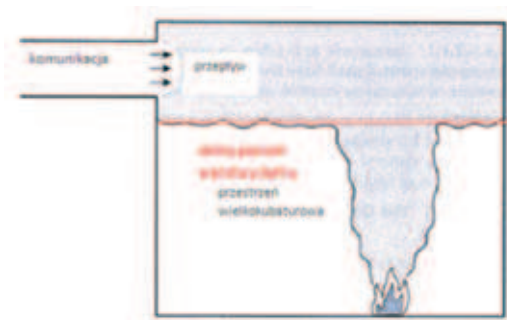
gdzie:

V_e – średnia graniczna wartość prędkości przepływu [m/s],

H – wysokość korytarza [m],

g – przyspieszenie ziemskie ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Jeżeli przepływ powietrza stosowany jest do ograniczenia rozprzestrzeniania się dymu z przestrzeni atrium do przestrzeni korytarza (rys. 30) i korytarz zlokalizowany jest powyżej dolnego poziomu warstwy dymu, to przepływ powietrza w kierunku od korytarza do przestrzeni wielokubaturowej powinien mieć prędkość obliczoną również wg wzoru (17).



Rys. 30. Zastosowanie przepływu w celu ograniczenia rozprzestrzeniania się dymu z przestrzeni atrium do przestrzeni komunikacyjnej
Źródło: NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition.

W odróżnieniu od powszechnie znanych i stosowanych metod usuwania dymu i ciepła, jego rozprzestrzenianie się można również ograniczyć poprzez wytworzenie przepływu powietrza przeciwnie skierowanego do kierunku rozprzestrzeniania się gazów pożarowych.

Przeciwnie ukierunkowany przepływ można zastosować w celu ograniczenia rozprzestrzeniania się do przestrzeni atrium, powstającego podczas pożaru dymu, jeżeli znajduje się on w przestrzeni komunikacyjnej przyległej do przestrzeni

Jeżeli przepływ powietrza stosowany jest do ograniczenia rozprzestrzeniania się dymu z przestrzeni komunikacyjnej do przestrzeni wielokubaturowej (np. atrium, rys. 29) i korytarz leży powyżej dolnego poziomu warstwy dymu, to przepływ powietrza w kierunku od korytarza do przestrzeni wielokubaturowej powinien mieć prędkość obliczoną również wg wzoru (17).

Jeżeli przepływ powietrza stosowany jest do ograniczenia rozprzestrzeniania się dymu z przestrzeni komunikacyjnej do przestrzeni wielokubaturowej (np. atrium, rys. 29) i korytarz leży powyżej dolnego poziomu warstwy dymu, to przepływ powietrza w kierunku od korytarza

do przestrzeni wielkokubaturowej powinien mieć prędkość obliczoną również wg wzoru (17)

$$V_e = 0,057 \cdot \left(\frac{Q}{z} \right)^{1/3} \quad (17)$$

gdzie:

Q – moc pożaru [kW],

z – wysokość od podstawy pożaru do podstawy otwartej przyległej przestrzeni [m].

Należy zaznaczyć, że metody, w których ukierunkowany przepływ powietrza stosuje się do zabezpieczenia przed rozprzestrzenianiem się dymu, nie są powszechnie stosowane w obiektach projektowanych i realizowanych w naszym kraju.

2. Przykład obliczeniowy

W celu przeprowadzenia obliczeń wykorzystano wybraną przestrzeń dwukondygnacyjny obiektu atrialnego.

Do analizy wybrano strefę dymową zaprojektowaną zgodnie z zasadami standardów opisanych w poprzednich rozdziałach. Strefa dymowa nie przekracza 2600 m², odstępów między kurtynami oddzielającymi analizowaną strefę dymową od innych stref dymowych wynoszą 60 m.

Mając na uwadze przedstawioną teorię dotyczącą rozprzestrzeniania się dymu i ciepła, wybrano najbardziej niekorzystny wariant, tj. pożar w pomieszczeniu zlokalizowanym na parterze połączonym z przestrzenią atrium. Pomieszczenie ma wymiary 10 × 10 m.

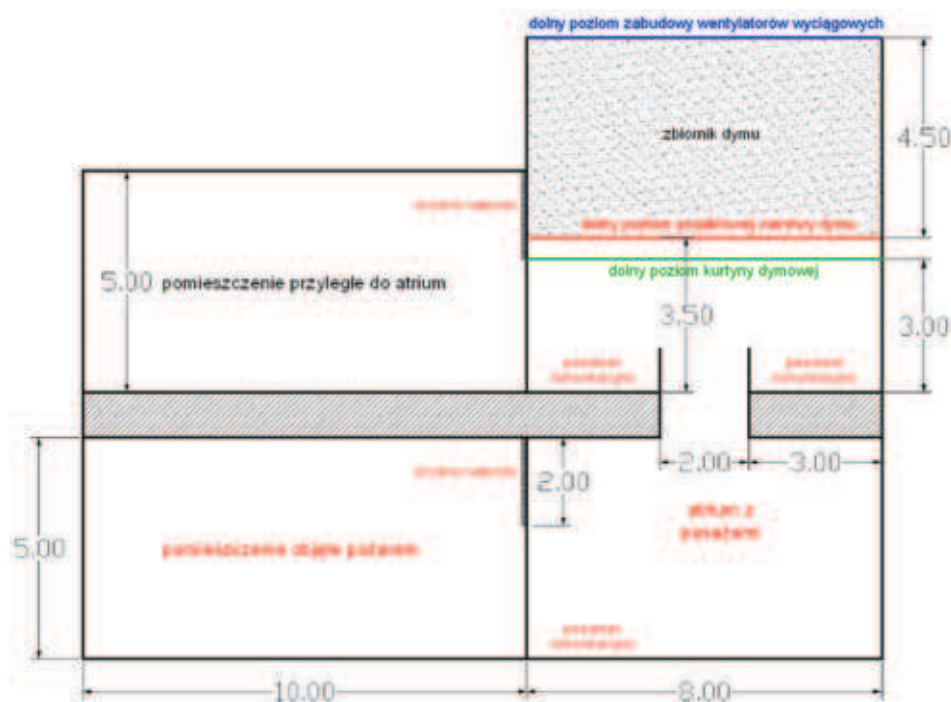
Strefa chroniona jest instalacją tryskaczową standardowego reagowania o temperaturze zadziałania 68°C oraz systemem sygnalizacji pożaru SSP.

Koncepcja oddymiania zakłada bezpośrednie oddymianie przestrzeni pomieszczeń i pasażu poprzez wentylatory oddymiające, zamontowane w konstrukcji dachu nad pasażem komunikacyjnym.

Zakłada się, że powstały w czasie pożaru dym wypłynie z przestrzeni pomieszczenia do przestrzeni atrium. Zbiornik dymu stanowić będzie przestrzeń podsufitową świetlika, zabudowanego nad przestrzenią atrium. Zbiornik dymu ma długość 60 m, szerokość 8 m i wysokość 5 m.

W celu zapewnienia warunków bezpiecznej ewakuacji osób znajdujących się na drugiej kondygnacji, założono, że najniższy poziom projektowej warstwy dymu utrzymywać się będzie 3,5 m, licząc od poziomu posadzki drugiej kondygnacji. W celu zabezpieczenia przed rozprzestrzenianiem się dymu do stref sąsiednich na krańcach stref dymowych projektuje się kurtyny o wysokości 5 m, zabudowane w poprzek pasażu, na całej jego szerokości. Z uwagi na to, że granica między warstwą dymu, a czystym powietrzem nie jest jednorodna, dolny poziom kurtyny dymowej znajdować się będzie na poziomie 3 m, licząc od poziomu po-

sadzki drugiej kondygnacji (0,5 m niżej niż dolny poziom projektowej warstwy dymu). Grubość warstwy dymu pod kratkami wyciągowymi wyniesie ok. 4,5 m. Przekrój analizowanej strefy dymowej zobrażowano na rys. 31, a rzut na rys. 34.



Rys. 31. Przekrój analizowanej strefy dymowej. Zobrazowanie założeń do koncepcji oddymiania
Źródło: opracowanie własne.

Ponieważ w obiekcie będzie zabudowana instalacja tryskaczowa, należy określić czas jej zadziałania od momentu powstania pożaru. Będzie to miało znaczący wpływ na moc pożaru, przyjętą do dalszych obliczeń.

Do analizy przyjęto, iż instalacja charakteryzuje się następującymi parametrami:

- wysokość zabudowy tryskaczy w pomieszczeniu, w którym założono pożar projektowy – 5 m,
- szybkość zadziałania tryskacza RTI 80 (instalacja standardowego reagowania),
- temperatura zadziałania – 74°C,
- odległość między tryskaczami 3,1 m × 3,1 m (rozstaw siatki tryskaczowej),
- krzywa rozwoju pożaru szybka ($\alpha = 0,04689$).

Do obliczenia szybkości zadziałania tryskaczy posłużono się programem komputerowym DETACT QS, z którego wynika, że pierwszy tryskacz zainstalowany w pomieszczeniu, w którym powstał pożar uruchomi się po czasie 202 s. W tym czasie pożar osiągnie moc 1875,6 kW (rys. 32). W celach porównawczych dokonano obliczeń dla tryskaczy zainstalowanych w strefie podsufitowej atrium

na wysokości 14 m. Z obliczeń wynika, że pierwszy tryskacz, posiadający te same parametry, co tryskacz zamontowany w pomieszczeniu, uruchomi się po czasie 364,8 s przy pożarze o mocy 6189,5 kW (rys. 33).

```

CEILING HEIGHT= 5 m      16.4042 ft
RADIUS= 3.1 m           10.1706 ft
DET ACT TEMP= 74 C      165.2 F
RTI= 80 (m*s)^(1/2)    144.9048 (ft*s)^(1/2)

```

TIME	FIRE	GAS TEMP	DET TEMP	GAS TEMP	DET TEMP
sec	kW	C	C	F	F
0.0	0.0	20.0	20.0	68.0	68.0
10.0	46.9	26.1	20.3	79.0	68.5
20.0	93.8	30.1	21.1	86.2	70.0
30.0	140.7	33.4	22.3	92.1	72.1
40.0	187.6	36.3	23.7	97.3	74.7
50.0	234.4	39.0	25.4	102.2	77.7
60.0	281.3	41.5	27.2	106.7	81.0
70.0	328.2	43.9	29.2	110.9	84.5
80.0	375.1	46.1	31.2	115.0	88.2
90.0	422.0	48.3	33.3	118.9	92.0
100.0	468.9	50.3	35.5	122.6	95.9
110.0	609.6	55.8	37.9	132.5	100.2
120.0	750.2	61.3	40.9	142.3	105.6
130.0	890.9	66.4	44.3	151.5	111.7
140.0	1031.6	71.2	48.0	160.2	118.4
150.0	1172.3	75.8	51.9	168.5	125.5
160.0	1312.9	80.2	56.0	176.4	132.9
170.0	1453.6	84.5	60.3	184.1	140.5
180.0	1594.3	88.7	64.5	191.6	148.2
190.0	1734.9	92.7	68.8	198.8	155.9
200.0	1875.6	96.6	73.1	205.9	163.7

***** DETECTOR ACTUATION AT 202.0 SECONDS *****

Rys. 32. Czas zadziałania tryskacza w pomieszczeniu, w którym powstał pożar (zrzut ekranu programu DETACT QS)

Źródło: opracowanie własne.

Mając na uwadze założenia norm, badania dotyczące prędkości rozprzestrzeniania się pożarów w obiektach handlowo-usługowych oraz wyniki zadziałania instalacji tryskaczowej stwierdzono, że optymalnym pożarem projektowym na potrzeby przeprowadzenia obliczeń będzie pożar o mocy całkowitej 3600 kW (3,6 MW) i mocy konwekcyjnej 2500 kW (2,5 MW).

Przeprowadzone obliczenia mają na celu zobrazowanie wpływu zmian szerokości otworu łączącego pomieszczenie z przestrzenią pasażu, z którego wypływa dym oraz wpływu zmian odległości między kanałami kierującymi (kurtyny dymowe) przepływ dymu pod balkonem (pasażem komunikacyjnym) lub ich brak na wartości wydajności systemu oddymiania. Inne parametry wejściowe takie jak moc pożaru, temperatura otoczenia, wymiary geometryczne strefy dymowej pozostają bez zmian.

Obliczenia wymaganych parametrów systemu oddymiania dokonano dla czterech wariantów (scenariuszy) wg normy NFPA 92. Wyniki wymaganej wydajności systemu oddymiania w zależności od przyjętej geometrii otworu i rozstawu kanałów kierunkowych przedstawiono w tabeli 1.


```

CEILING HEIGHT= 14 m      45.93176 ft
RADIUS= 3.1 m             10.1706 ft
DET ACT TEMP= 74 C       165.2 F
RTI = 80 (m*s)^(1/2)     144.9048 (ft*s)^(1/2)

```

TIME	FIRE	GAS TEMP	DET TEMP	GAS TEMP	DET TEMP
sec	kW	C	C	F	F
0.0	0.0	20.0	20.0	68.0	68.0
10.0	46.9	22.2	20.1	71.9	68.2
20.0	93.8	23.6	20.5	74.5	68.9
30.0	140.7	24.8	21.0	76.6	69.8
40.0	187.6	25.8	21.6	78.5	70.9
50.0	234.4	26.8	22.3	80.2	72.2
60.0	281.3	27.7	23.1	81.8	73.6
70.0	328.2	28.5	23.9	83.3	75.0
80.0	375.1	29.3	24.7	84.8	76.5
90.0	422.0	30.1	25.6	86.2	78.0
100.0	468.9	30.8	26.4	87.5	79.5
110.0	509.6	32.8	27.3	91.0	81.2
120.0	550.2	34.7	28.5	94.5	83.3
130.0	590.9	36.6	29.9	97.8	85.7
140.0	631.6	38.5	31.3	100.9	88.4
150.0	672.2	39.9	32.8	103.9	91.1
160.0	712.8	41.4	34.4	106.7	93.9
170.0	753.4	43.0	36.0	109.5	96.8
180.0	794.0	44.5	37.6	112.1	99.7
190.0	834.6	46.0	39.2	114.7	102.5
200.0	875.1	47.4	40.8	117.2	105.4
210.0	915.7	49.5	42.4	121.1	108.3
220.0	956.2	51.7	44.2	125.0	111.1
230.0	996.8	53.8	46.1	128.8	114.9
240.0	1037.3	55.8	48.0	132.5	118.4
250.0	1077.9	57.7	50.0	136.0	122.0
260.0	1118.4	59.7	52.0	139.5	125.6
270.0	1158.9	61.6	54.0	142.9	129.2
280.0	1199.4	63.5	56.0	146.2	132.8
290.0	1239.9	65.3	58.0	149.5	136.4
300.0	1280.4	67.0	59.9	152.6	139.9
310.0	1320.9	69.4	61.9	156.9	143.4
320.0	1361.4	71.7	64.0	161.1	147.2
330.0	1401.9	74.1	66.2	165.3	151.1
340.0	1442.4	76.3	68.4	169.4	155.2
350.0	1482.9	78.5	70.7	173.4	159.2
360.0	1523.4	80.7	72.9	177.3	163.3

***** DETECTOR ACTUATION AT 364.8 SECONDS *****

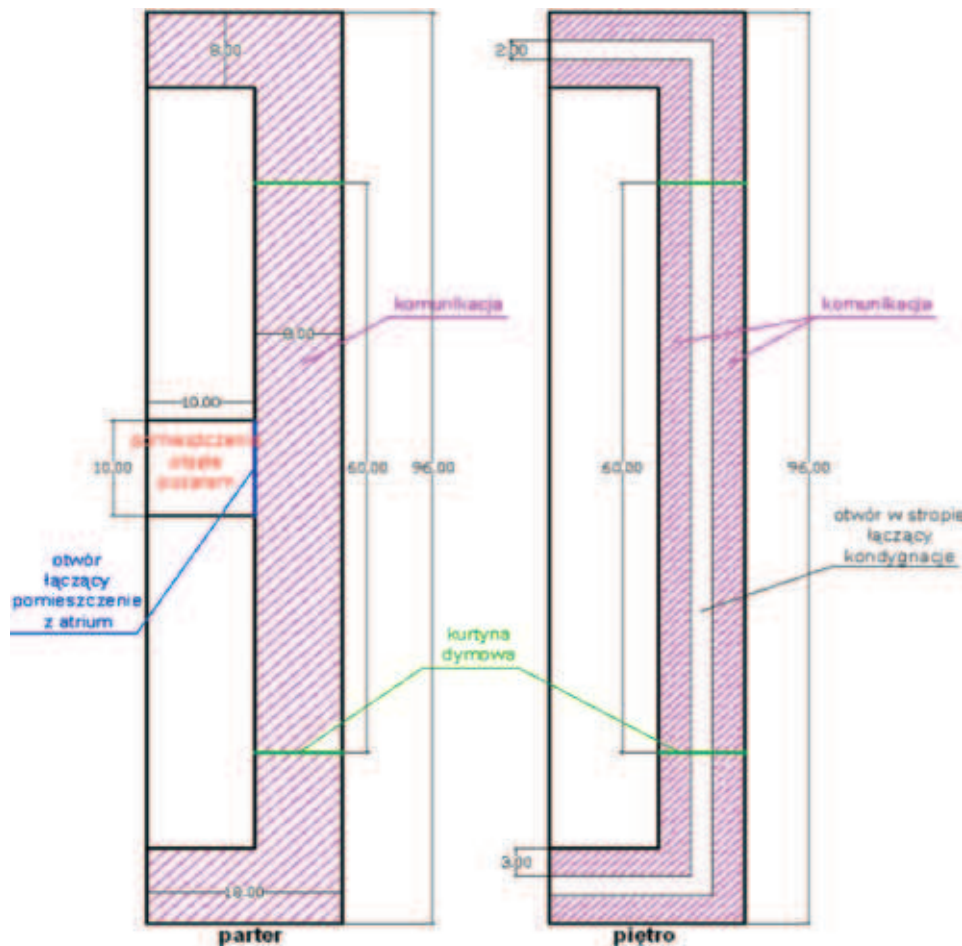
Rys. 33. Czas zadziałania tryskacza w przestrzeni podsufitowej atrium na wysokości ok. 14 m (zrzut ekranu programu DETACT QS)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Wyniki obliczonych wydajności systemu oddymiania dla poszczególnych założonych wariantów

Norma		Scenariusz 1	Scenariusz 2	Scenariusz 3	Scenariusz 4
NIFPA 92	założenia dla przyjętych scenariuszy	otwór w=10 m (bez kanałów kanalizujących przepływ pod balkonem – kurtyny dymowe tylko na granicy strefy dymowej)	otwór w=10,0 m, kanały kanalizujące pod balkonem w odległości W=12,0 m)	otwór w=2,0 m, (bez kanałów kanalizujących przepływ pod balkonem – kurtyny dymowe tylko na granicy strefy dymowej)	otwór w=2,0 m, kanały kanalizujące pod balkonem w odległości W=12,0 m
	wymagana wydajność [m ³ /h]	550 009,74	522 764,80	302 991,27	522 764,80
	z uwzględnieniem założeń do wzoru (5)	W>10 – nie spełnia założeń wzoru	W>10 – nie spełnia założeń wzoru	463 978,88	W>10 – nie spełnia założeń wzoru
	z uwzględnieniem wzoru (6)	1 051 233,81	997 943,75	568 074,97	997 943,75
	z uwzględnieniem wzoru (7)				

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4].



Rys. 34. Rzut parteru i piętra analizowanej strefy dymowej

Źródło: opracowanie własne.

Należy zwrócić uwagę, że założenia dla wzoru (4) standardu NFPA 92 są mało precyzyjne, ponieważ uwzględniają tylko wytyczne z uwzględnieniem parametru z_b . Zgodnie z NFPA 92 parametr z_b określa wysokość unoszenia kolumny konwekcyjnej dymu, liczony od krawędzi wypływu spod balkonu do dolnej podstawy warstwy dymu w zbiorniku (rys. 22).

Z tabeli 1 wynika, że tylko scenariusz 3, tj. wartości $z_b=4,5$ m i $W=5,0$ m spełnia w całości założenia określone dla wzoru (6). W pozostałych scenariuszach jeden z parametrów nie spełnia założeń normy, tj. dla scenariusza 3 i 4 parametr z_b jest mniejszy, a według założeń powinien być większy niż 15 m.

Dla scenariuszy, w których jeden z parametrów z_b lub W jest mniejszy i jednocześnie nie przekracza dla danego wzoru dopuszczalnych przez normę wartości, obliczenia w tabeli zamieszczono w celach porównawczych. Obliczeń nie prze-

prowadzano, gdy jeden z parametrów z_b lub W przekraczał wartości dopuszczalne przez normę dla danego wzoru. Tak dzieje się w przypadku scenariusza 1, 3 i 4, gdzie W przekracza dopuszczalną wartość ($W \leq 10$).

Z uwagi na to, że założenia dla wzoru (4) NFPA 92 nie stawiają wymagań dla parametrów z_b i W , można stwierdzić, że wszystkie scenariusze spełniają te założenia i wzór ten może być użyty do obliczeń wszystkich scenariuszy.

W starszej wersji normy 92 (Edycja 2007) dla obliczenia wymaganych parametrów systemu oddymiania w przypadku kolumn balkonowych obowiązywał tylko wzór (5). Obecnie obowiązująca edycja 2012 normy NFPA 92 spowodowała pewną niedogodność, co w niektórych przypadkach komplikuje określenie wymagań dla systemów oddymiania.

3. Analiza uzyskanych obliczeń i wnioski

W pracy przedstawiono charakterystykę rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w obiektach wielokubarutowych, zawierających przestrzeń typu atrium. Opisano wpływ zmian parametrów geometrycznych analizowanej przestrzeni oraz mocy pożaru na parametry systemu oddymiania, takie jak wymagana wydajność, ilość punktów wyciągowych i ich wzajemne odległości oraz przyrost temperatury, która ma wpływ na wybór klasy wentylatora oraz definiuje klasę odporności ogniowej kanałów wyciągowych.

W pracy przedstawiono obliczenia dla różnych wariantów, uwzględniających zmianę wymiarów geometrycznych otworu łączącego pomieszczenie z przestrzenią atrium oraz rozmieszczenie kurtyn dymowych (ekranów kanalizujących).

Analizując wyniki obliczeń wykonanych wg procedury zawartej w normie NFPA 92, przedstawionych w tabeli 1 zauważono, że wartości wydajności systemu oddymiania różnią się znacząco mimo że przyjmowano takie same parametry związane z mocą pożaru oraz parametry geometryczne analizowanej przestrzeni, m.in. wymiary otworu z jakiego wypływa dym do przestrzeni atrium i odległości między kurtynami dymowymi.

Należy zwrócić uwagę, że założenia dla wzoru (5) standardu NFPA 92 są mało precyzyjne, ponieważ uwzględniają tylko wytyczne dla parametru z_b (wysokości unoszenia kolumny konwekcyjnej dymu od krawędzi wypływu do podstawy warstwy dymu), którego wartość nie może przekraczać 15 m. Mimo że wzór ten uwzględnia również parametr W (szerokość słupa dymu wypływającego spod balkonu), to norma nie podaje jakie maksymalne wartości może on przyjmować, jak ma to miejsce w przypadku wzorów (6) i (7). Teoretycznie, jeżeli wartość z_b nie przekroczy 15 m wzór ten można stosować dla wszystkich przypadków atriów, gdzie parametr W może przyjmować dowolną wartość. Należy zaznaczyć, że wartość W jest sumą szerokości otworu, z którego wypływa dym i szerokości balkonu, spod którego dym wypływa do przestrzeni atrium. Patrząc z drugiej strony można również stwierdzić, że jeżeli W jest większe od 15 m należy stosować wzór (7),

ale przestrzeń atrium może mieć również takie wymiary geometryczne, gdzie z_b jest mniejsze niż 15 m, a W większe niż 10 m. Wariantu takiego norma NFPA nie uwzględnia, co ostatecznie powoduje niedogodności w prawidłowym obliczeniu wymaganej wydajności systemu oddymiania. Przykładem potwierdzającym to stwierdzenie jest zestawienie obliczeń dla scenariusza 3 (tabela 1). W scenariuszu tym wartości W równa się 5 m i z_b równa się 4,5 m, co powoduje, że do obliczeń można zastosować również wzór (6). Masowe natężenie przepływu dymu (m_p) obliczone wg wzoru (4) wynosi 92,76 kg/s, a wg wzoru (6) wynosi 146,62 kg/s. W konsekwencji różnica między wymaganą wydajnością systemu oddymiania dla tych przypadków wynosi prawie 161 000 m³/h. W takiej sytuacji projektant może mieć dylemat: czy wyliczona mniejsza wydajność spełni warunki bezpiecznej ewakuacji, mimo że parametry przyjęte do obliczeń spełniają założenia normy? W takim przypadku najbezpieczniej jest przyjąć wartość większą, co jednak spotyka się z krytyką inwestora, ponieważ generuje koszty budowy systemu oddymiania (większa wydajność i ciężar wentylatorów, większa wymagana nośność konstrukcji, na której będą posadowione wentylatory, większe przekroje kanałów, większe przekroje kabli zasilających itp.).

Z analizy wzorów, wg których obliczane jest masowe natężenie przepływu dymu wpływającego do zbiornika dymu wywnioskować można, że kluczowymi wartościami mającymi wpływ na ilość generowanego dymu i w konsekwencji wydajność systemu oddymiania mają parametry związane mocą pożaru, geometrią otworu łączącego pomieszczenie, z którego dym wypływa do przestrzeni atrium, jak również odległość od krawędzi wypływu do dolnej podstawy warstwy dymu.

W przypadku normy NFPA 92 szerokość słupa dymu, który wypływa spod krawędzi balkonu zależna jest od szerokości balkonu i wielkości otworu, z którego dym wypływa spod balkonu. Jeżeli pod balkonem brak jest kurtyn dymowych (ekranów kierunkujących) automatycznie liczony jest ekwiwalent szerokości wypływu (wzór 6, rys. 23).

Z analizy numerycznej CFD [10] przypadków, w których kurtyny dymowe pod balkonami parteru i piętra zlokalizowane są w odległości 60 m od siebie (scenariusz 1 i 3, tabela 1) wynika, że dym powodujący zmniejszenie zasięgu widzialności do wartości mniejszej niż 10 m, rozprzestrzenia się na szerokość większą niż liczony wg normy ekwiwalent. Dla otworu o szerokości w równej 2 m ekwiwalent szerokości wypływu słupa dymu spod balkonu W wynosi 5 m, a dla szerokości w równej 10 m wartość W wynosi 13 m na podstawie przeprowadzonych analiz CFD [10] zaobserwowano, że dym przybierający postać cienkiej warstwy pod balkonem rozprzestrzenia się na znacznej jego długości. Należy zaznaczyć, że rozprzestrzeniająca się warstwa dymu pod balkonem, powodująca pogorszenie warunków bezpiecznej ewakuacji występuje lokalnie w obrębie otworu z pomieszczenia objętego pożarem.

Na podstawie badań własnych autorów, przeprowadzonych na obiektach rzeczywistych (testy z gorącym dymem wg AS 4391-1999 [11]) wynika, że kurtyny

dymowe zlokalizowane pod balkonem bardzo dobrze ograniczają rozprzestrzenianie się dymu w poziomie pod powierzchnią balkonu, niezależnie czy dym wypływa z otworu o szerokości 2 czy 10 m do lokalu objętego pożarem będzie zmniejszone.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz stwierdza się, że każdą koncepcję i projekt systemu oddymiania należy analizować indywidualnie, poprzez porównanie wyników obliczonych na podstawie dostępnych i możliwych do zastosowania w danym przypadku standardów. Integralną częścią koncepcji systemów oddymiania powinny być wyniki symulacji komputerowych rozprzestrzeniania się dymu w obiekcie, potwierdzające skuteczność działania systemu oddymiania, dla każdego z analizowanych scenariuszy pożarowych, mimo że analizowana przestrzeń pod względem geometrycznym nie jest skomplikowana. Analiza poprzez zastosowanie programów komputerowych daje dobre możliwości weryfikacji zaprojektowanego systemu oddymiania szczególnie w przypadku obiektów o skomplikowanym układzie architektury wewnętrznej oraz umożliwia lokalne określenie danego parametru, mającego wpływ na warunki ewakuacji czego normy nie umożliwiają. Brak analizy komputerowej może w skrajnych przypadkach powodować niedoszacowanie lub przewymiarowanie danego systemu oddymiania.

Na podstawie badań własnych autorów stwierdza się, że szczególną uwagę należy zwracać również na proces realizacji (właściwy montaż i wystierowanie) i odbioru systemu oddymiania.

Poprawne obliczenie wymaganych parametrów systemów oddymiania i zastosowanie najlepszej klasy programów komputerowych nie zapewni bezpieczeństwa, jeżeli system oddymiania nie będzie rzetelnie sprawdzony podczas odbiorów i sprawny pod względem technicznym podczas eksploatacji obiektu.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie ministra spraw wewnętrznych i administracji z 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów (DzU nr 109, poz. 719).
- [2] Materiały konferencyjne, Ochrona przeciwpożarowa, Zakopane 2010, wydanie 2010.
- [3] Ustawa Prawo Budowlane z 7 lipca 1994 r. (DzU z 2003, nr 207, poz. 2016 z późn. zm.)
- [4] NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition.
- [5] R. Harrison: Smoke Control In Atrium Buildings: A Study of the Thermal Spill Plume.
- [6] BS 7346-4: 2003 Components for smoke and heat control systems. Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady – state design fires-Code of practice.

- [7] R. Harrison and M.J. Spearpoint: Entrainment of air into a balcony spill plume, *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 16, no. 3, pp 211–245, 2006.
- [8] H.P. Morgan and N.R. Marshall: Smoke hazards in covered multi-level shopping malls: an experimentally-based theory for smoke production, *BRE Current Paper 48/75*, BRE, 1975.
- [9] C. Mayfield, D. Hopkins: *Design fires for use in fire safety engineering*, BRE 2011.
- [10] Ł. Ostapiuk: praca magisterska „Analiza porównawcza wyników uzyskanych z modeli rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w warunkach pożaru wykorzystujących technikę CFD oraz normy NFPA 92 i BS 7346-4: 2003 na przykładzie systemu oddymiania wybranego obiektu atrialnego”.
- [11] AS 4391-1999 Australian Standard™ Smoke management systems-Hot smoke test.
- [12] VDI 6019-2:2009 – Engineering Methods For The Dimensioning Of Systems For The Removal Of Smoke From Buildings – Engineering Methods.
- [13] PD 7974-2:2002 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 (Sub-system 2).
- [14] TR 12101-5 Smoke and heat control systems – Part 5: Guidelines on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems.
- [15] J.A. Milke: Smoke management in covered malls and atria. Chapter 13, Section 4, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, NFPA, Quincy, MA, 2002.

Paweł WRÓBEL
Łukasz OSTAPIUK
Łukasz BAŁAGA

Mechanical Smoke Management Design Guidelines in Large Volume Spaces with Atrium Based on NFPA 92 Standard for Smoke management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces, 2012 Edition

All concept calculations that are made for smoke management system need to be done based on design building shape analysis. Very important is to verify all manual calculations by CFD on a preliminary design stage and by hot smoke tests on as-built stage. CFD simulations are very helpful in verification of assumed hot smoke exhaust efficiency. Hot smoke tests are also very important, especially in verification of smoke control system that detects of fire and controls many important devices like smoke curtain, fire dumpers and shutters or any other in case of fire.

SUMMARY