

Grzegorz Kubicki^{a)*}, Izabela Tekielak-Skałka^{b)}, Marcin Cisek^{c)}

^{a)} *Warsaw University of Technology / Politechnika Warszawska*

^{b)} *SMAY Sp. z o.o.*

^{c)} *PROTECT s.j.*

* *Corresponding author / Autor korespondencyjny: grzegorz.kubicki@pw.edu.pl*

How to Protect Staircases in Case of Fire in Mid-Rise Buildings. Real Scale Fire Tests

Jak zabezpieczyć klatki schodowe w budynkach średniowysokich na wypadek pożaru. Wyniki badań rzeczywistych

ABSTRACT

Purpose: The aim of the analysis was to investigate how smoke would spread in the building in the case of fire, and how to protect staircases without a pressure differential system (PDS). It was assumed that a ventilation system should:

- prevent the staircase against complete smokiness. The part of the staircase located below the level covered by the fire should be smoke-free to the extent allowing the evacuation of people from the fire compartments;
- remove smoke from the staircase as fast as possible to prevent a significant increase in the level of pressure in the staircase.

Project and methods: Research was conducted in a full-scale 9-storey building. Three real fires were simulated. Typical apartment furnishings were used in the fires. A smoke ventilation system was installed in the staircase with variable make-up air supply. Tests were carried out for the following configurations of smoke ventilation systems:

- natural smoke exhaust with natural/gravitational make-up air;
- natural smoke exhaust with a mechanical (fixed volume of 14000 m³/h) make-up air inlet;
- natural smoke exhaust with a variable mechanical make-up air inlet.

The position of the door between the staircase and the apartment was used as an additional variable.

The measurements included temperature, light transmittance in the staircase, pressure difference between the staircase and the external environment, and the flow of the air and smoke through the smoke damper.

Results: The results of the research show that the system of gravitational smoke ventilation is susceptible to ambient conditions such as temperature. In some tests, it was observed that smoke could descend below the storey covered by the fire. The conducted research helped determine the best way to reduce the amount of smoke in the staircase. The use of mechanical air supply in the smoke ventilation system facilitated fast smoke removal from the staircase, and the proper air and smoke flow direction (from the test room to smoke exhaust devices).

The use of mechanical make-up air supply in the smoke ventilation system prevented the smoke from descending below the storey covered by the fire, so that the staircase on the floor covered by the fire could remain free from smoke in the lower part, providing a way of escape from the level covered by the fire.

Conclusions: The conducted tests have revealed that the best solution to protect staircases without PDSs is to use a smoke ventilation system comprising a smoke vent mounted at the top and mechanically adjusted make-up air supply on the ground level.

Keywords: smoke management, fire tests, fire ventilation of a staircase

Type of article: original scientific article

Received: 28.08.2019; **Reviewed:** 02.10.2019; **Accepted:** 02.10.2019;

Authors' ORCID IDs: G. Kubicki – 0000-0001-9782-4468; I. Tekielak-Skałka – 0000-0001-7152-8601; M. Cisek – 0000-0003-3828-2691;

Percentage contribution: G. Kubicki – 35%; I. Tekielak-Skałka – 35%; M. Cisek – 30%;

Please cite as: SFT Vol. 54 Issue 2, 2019, pp. 6–20, <https://doi.org/10.12845/sft.54.2.2019.1>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRAKT

Cel: Celem badań była analiza rozprzestrzenia się dymu pod kątem oceny skuteczności różnych systemów oddymiania klatki schodowej. Założono, że działanie takiej instalacji powinno:

- zapobiegać zadymieniu części klatki schodowej, znajdującej się poniżej kondygnacji, na której zlokalizowany jest pożar,
- po odcięciu napływu dymu na klatkę schodową, oczyszczać tę przestrzeń z dymu w krótkim czasie – realizacja oddymiania klatki schodowej nie może prowadzić do znacznego wzrostu nadciśnienia w klatce schodowej.

Projekt i metody: Badania przeprowadzone zostały w 9-kondygnacyjnym budynku rzeczywistym. W ramach badań wykonano m.in. trzy prawdziwe pożary w pełnej skali. Każdy z pożarów inicjowany był w zaadaptowanym pomieszczeniu wyposażonym każdorazowo w identyczny zestaw mebli i elementów wyposażenia. Na klatce schodowej zainstalowano system oddymiania ze zmiennym dopływem powietrza uzupełniającego. Testy przeprowadzono dla następujących konfiguracji systemów oddymiania:

- naturalny układ oddymiania z naturalnym / grawitacyjnym powietrzem uzupełniającym;
- naturalny układ oddymiania z mechanicznym (stała wartość objętości 14000 m³/h) wlotem powietrza uzupełniającego;
- naturalny układ oddymiania ze zmiennym mechanicznym wlotem powietrza uzupełniającego.

Dodatkową zmienną było położenie drzwi między klatką schodową a mieszkaniem. Podczas testów rejestrowano: temperaturę (72 punkty pomiarowe), transmitancję światła (poziom zadymienia), różnicę ciśnień między klatką schodową a otoczeniem zewnętrznym oraz przepływ powietrza i dymu przez klapę dymu. Dodatkowo stale monitorowane były podstawowe parametry atmosferyczne (siła i kierunek wiatru, temperatura i wilgotność powietrza).

Wyniki: Wyniki badań wykazały wysoką wrażliwość grawitacyjnego systemu oddymiania na warunki otoczenia (zaobserwowano, że w niekorzystnych warunkach dym może opaść poniżej kondygnacji objętej pożarem). Najskuteczniejszą i najbardziej odporną na zakłócenia metodą oddymiania był mechaniczny dopływ powietrza. Pozwolił on na szybkie usunięcie dymu ze schodów oraz prawidłowe, stałe i właściwe ukierunkowanie przepływu. System ten nie dopuszczał do opadania dymu poniżej kondygnacji objętej pożarem, zaś regulacja wydajności w zależności od przepływu na klapie zabezpieczała przestrzeń klatki schodowej przed wzrostem nadciśnienia.

Wnioski: Najlepszą metodą oddymiania klatki schodowej jest zastosowanie klapy dymowej oraz mechanicznie regulowanego dopływu powietrza uzupełniającego na poziomie wyjścia z budynku.

Słowa kluczowe: kontrola rozprzestrzeniania się dymu, próby ogniowe, wentylacja pożarowa schodów

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 28.08.2019; **Zrecenzowany:** 02.10.2019; **Zatwierdzony:** 02.10.2019;

Identyfikatory ORCID autorów: G. Kubicki – 0000-0001-9782-4468; I. Tekielak-Skałka – 0000-0001-7152-8601; M. Cisek – 0000-0003-3828-2691;

Procentowy wkład merytoryczny: G. Kubicki – 35%; I. Tekielak-Skałka – 35%; M. Cisek – 30%;

Proszę cytować: SFT Vol. 54 Issue 2, 2019, pp. 6–20, <https://doi.org/10.12845/sft.54.2.2019.1>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Introduction

A fire is a serious threat to human health and life. Both fire, posing an immediate threat, as well as smoke are dangerous. Fire is a local threat and its spread can be limited by using appropriate construction barriers. Smoke can spread much further as a result of buoyancy. To reduce its spread, fire ventilation systems can be used.

Pressure differential systems (PDSs) are the best solutions for fire ventilation. They can be designed in accordance with the adequate standards [1] or [2]. There are many factors that influence PDS performance, like the stack effect, wind and the expansion of fire gases. Information about these factors is provided in [3]. Many articles show research and computational fluid dynamics (CFD) analyses of various pressure differential systems [4–5]. Most of them concern research in high-rise buildings where this solution is required. However, PDSs are not always required by local regulations, and if they are not required, they are not used.

In many countries, PDSs are not required for low- and mid-rise buildings (with a height not exceeding 25–30 m). In such buildings, local regulations allow for other solutions to be used, such as smoke ventilation systems. These are used in many countries, including Poland, Germany and Great Britain, and can be designed based on relevant documents [6–7], [9]. Smoke ventilation systems are simple in terms of their construction and can be used in buildings without corridors or vestibules,

Wstęp

Pożar stwarza duże zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka. Niebezpieczeństwo stanowić może bezpośrednio ogień, jak również dym. Ogień jest zagrożeniem lokalnym, którego rozprzestrzenianie można ograniczyć odpowiednimi barierami konstrukcyjnymi. Dym – z uwagi na lotność – rozprzestrzenia się znacznie szybciej niż ogień. Można jednak temu zapobiec poprzez zastosowanie odpowiednich systemów wentylacji pożarowej.

Do najlepszych rozwiązań wentylacji pożarowej zaliczają się systemy różnicowania ciśnienia, projektowane zgodnie z właściwymi normami [1] lub [2]. Na ich skuteczność wpływa szereg istotnych czynników, takich jak ciąg kominowy, oddziaływanie wiatru czy rozprzestrzenianie gazów pożarowych. Czynniki te opisano szerzej w publikacji pt. *Principles of Smoke Management* [3]. Wyniki badań nad systemami różnicowania ciśnienia i analiz obliczeniowej dynamiki płynów przedstawiono w licznych artykułach [4–5]. Większość z nich dotyczy badań prowadzonych w wysokich budynkach, gdzie omawiane rozwiązanie jest nieodzowne. Lokalne przepisy prawne nie zawsze nakładają jednak obowiązek zastosowania systemu różnicowania ciśnienia, w związku z czym tam, gdzie nie ma takiego wymogu, rozwiązanie to nie jest wdrażane.

W wielu krajach systemy różnicowania ciśnienia nie są wymagane w odniesieniu do niskich i średnich budynków (o maksymalnej wysokości 25–30 m). Dopuszcza się dla nich zastosowanie innych rozwiązań, w tym systemów oddymiania. Są one wykorzy-

where entrances to apartments are located directly in the staircase. Such an architectural building layout is often used in Europe.

The basic element of this solution is one hole in the upper part of the staircase and another at the bottom. A staircase equipped with a smoke ventilation system may be partially filled with smoke during a fire. There are no requirements as to its functionality.

The smoke inside the staircase may not allow people staying in higher parts of the building to evacuate. Therefore, it is important to remove smoke from the staircase as fast as possible or to protect people on higher levels against smoke penetration into compartments. This action facilitates evacuation and rescue operations based on other strategies.

Natural smoke ventilation is the most common way of applying smoke ventilation in staircases. However, this solution is sensitive to exterior environmental factors. The most important factors which can influence the flow of smoke along vertical shafts include the buoyancy effect, the chimney effect and wind [3].

Although smoke ventilations systems are commonly used, they have not been well researched. Additionally, the majority of research results are based on small-scale or CFD research and the fire is frequently assumed to have occurred in the staircase [9], which should not happen in reality. Considering the above, full-scale research has been carried out to check the effectiveness of different smoke ventilation variants.

Theory

Fire development depends on many factors. The fire appears on one of the floors in a multi-storey building and its development should be limited to that level. Because the size of the affected space is limited, the course of the fire depends on the availability of both combustible materials and oxygen. Providing both factors leads to the development of a fire whereas a shortage of either of them is likely to lead to the fire being extinguished.

The fire generates high-temperature smoke and changes pressure inside the fire space. The phenomena that take place during a fire are well described in [3], with related equations presented below.

The change in pressure inside the room covered by the fire can be described by the equation:

$$\Delta p_{fo} = 3460 \cdot \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_f} \right) \cdot h \quad (1)$$

where:

h – distance from the neutral plane, m;

stywane w wielu krajach, w tym w Polsce, Niemczech i Wielkiej Brytanii. Mogą być one projektowane na podstawie odpowiednich dokumentów (zob. [6–7], [9]). System oddymiania jest prosty w budowie i znajduje zastosowanie w budynkach bez korytarzy i przedsionków, tam gdzie wejścia do mieszkań są zlokalizowane bezpośrednio na klatkach schodowych. Tego rodzaju układ architektoniczny jest dość powszechny w Europie.

Podstawowym elementem instalacji oddymiania są otwory w górnej i dolnej części klatki schodowej. Klatka schodowa wyposażona w taką instalację może być podczas pożaru częściowo wypełniona dymem. Dla systemu oddymiania nie określono w tym względzie konkretnych wymogów funkcjonalnych.

Dym wewnątrz klatki schodowej może przeszkodzić w ewakuacji osób znajdujących się w wyższych partiach budynku. Ważne jest zatem, aby proces oddymiania klatki schodowej przebiegał jak najszybciej. Alternatywnie, mieszkania znajdujące się na wyższych piętrach, należy zabezpieczyć przed wlotem dymu. Ułatwi to ewakuację osób lub zapewnienie im bezpieczeństwa w ramach innych strategii.

W odniesieniu do oddymiania klatek schodowych najczęstsze rozwiązanie stanowi oddymianie grawitacyjne. Jest ono jednak podatne na działanie zewnętrznych czynników środowiskowych. Najistotniejsze z nich, mogące rzutować na przepływ dymu w szybach wentylacyjnych, to: wypór powietrza (tzw. efekt kominowy) i oddziaływanie wiatru [3].

Chociaż systemy oddymiania stosuje się powszechnie, nie przeprowadzono na ich temat dokładnych badań. Większość dostępnych wyników uzyskano w badaniach realizowanych na małą skalę lub w badaniach dotyczących systemów różnicowania ciśnienia. Najczęściej przyjmowano założenie, że rozgorzenie pożaru następowało na klatce schodowej [9], co w rzeczywistości nie powinno mieć miejsca. W związku z tym przeprowadzono pełne badanie mające na celu zweryfikowanie skuteczności instalacji oddymiania w różnych wariantach.

Teoria

Rozwój pożaru zależy od wielu czynników. Pożar inicjowany jest na jednym z pięter budynku wielopiętrowego i należy ograniczyć jego zasięg do tego piętra. Ponieważ powierzchnia jest zamknięta, przebieg pożaru zależy od dostępności zarówno materiałów łatwopalnych, jak i tlenu. Jeżeli ogień będzie mieć do nich dostęp, pożar będzie się rozwijać. Z kolei niedobór któregoś z nich sprawi, że ogień stopniowo wygaśnie.

W wyniku pożaru powstają opary dymu o wysokiej temperaturze, zmienia się również ciśnienie wewnątrz zajętego ogniem pomieszczenia. Zjawiska zachodzące w trakcie pożaru zostały szerzej opisane w przywołanym wcześniej opracowaniu J. H. Kłote'a i J. A. Milke'a [3] oraz wyrażone za pomocą równań poniżej.

Zmianę ciśnienia w pomieszczeniu zajęтым ogniem można opisać za pomocą wzoru:

$$\Delta p_{fo} = 3460 \cdot \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_f} \right) \cdot h \quad (1)$$

gdzie:

h – odległość od neutralnej płaszczyzny, m;

T_o – external temperature, K;

T_f – temperature inside the room covered by the fire, K.

Additionally, the temperature rise is related to an increase in the volume of fire gases, which can be described by the equation:

$$\frac{V_{out}}{V_{inn}} = \frac{T_{out}}{T_{inn}} \quad (2)$$

where:

V_{out} – volume flow out of the space covered by the fire, m³/s;

V_{inn} – volume flow into the space covered by the fire, m³/s;

T_{out} – temperature of the smoke flow out of the space covered by the fire, K;

T_{inn} – temperature of the air flow into the space covered by the fire, K.

Due to the above factors, smoke obtains buoyancy causing it to spread across the building. In the case of multi-storey buildings, one of the basic directions of the smoke flow is its outflow from the room covered by the fire towards the staircase, especially once the door to the space covered by fire is opened by evacuees.

Additionally, the stack effect may affect smoke in the staircase:

$$\Delta p = p_s - p_0 = (\rho_o - \rho_s) \cdot g \cdot h \quad (3)$$

where:

ρ_o – density of the outdoor air, kg/m³;

ρ_s – density of the indoor air/smoke, kg/m³;

g – acceleration of gravity, m/s²;

h – height, m.

If there are holes in the façade in the staircase or a room covered by the fire, such as an open window, the wind will also have an impact on the spread of smoke in the building. This impact can be determined using the equation:

$$\Delta p_w = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho_o \cdot U_H^2 \quad (4)$$

where:

Δp_w – wind pressure on the facade of the building, Pa;

C_w – dimensionless coefficient, -;

ρ_o – density of the outside air, kg/m³;

U_H – wind speed at the height of H, m/s.

The above-described factors will affect the direction of smoke movement in the building.

Aim of the research

The major aim of the research was to investigate how smoke would spread in the building in the case of a fire and how to protect staircases without PDSs. It was assumed that the ventilation system should:

1. Prevent the staircase from complete smokiness. The part of the staircase located below the level covered by the fire

T_o – temperatura na zewnątrz, K;

T_f – temperatura w pomieszczeniu zajęтым ogniem, K.

Ponadto wzrost temperatury wiąże się ze wzrostem objętości gazów pożarowych, którą można opisać za pomocą równania:

$$\frac{V_{out}}{V_{inn}} = \frac{T_{out}}{T_{inn}} \quad (2)$$

gdzie:

V_{out} – strumień objętościowy powietrza wywiewanego z pomieszczenia zajętego ogniem, m³/s;

V_{inn} – strumień objętościowy powietrza nawiewanego do pomieszczenia zajętego ogniem, m³/s;

T_{out} – temperatura strumienia dymu wywiewanego z pomieszczenia zajętego ogniem, K;

T_{inn} – temperatura strumienia powietrza nawiewanego do pomieszczenia zajętego ogniem, K.

Powyższe czynniki wpływają na lotność dymu i mogą sprawić, że rozprzestrzeni się on wewnątrz budynku. W przypadku budynków wielopiętrowych jednym z podstawowych kierunków strumienia dymu jest jego przepływ z pomieszczenia zajętego ogniem na klatkę schodową, szczególnie gdy drzwi do pomieszczenia zostały otwarte przez ewakuujące się z niego osoby.

Na przepływ dymu w obrębie klatki schodowej może dodatkowo wpływać ciąg kominowy:

$$\Delta p = p_s - p_0 = (\rho_o - \rho_s) \cdot g \cdot h \quad (3)$$

gdzie:

ρ_o – gęstość powietrza na zewnątrz, kg/m³;

ρ_s – gęstość powietrza wewnątrz, kg/m³;

g – przyspieszenie grawitacyjne, m/s²;

h – wysokość, m.

Jeżeli w elewacji klatki schodowej lub pomieszczenia zajętego ogniem występują otwory (np. otwarte okno), wiatr będzie również przyczyniać się do rozprzestrzeniania się ognia wewnątrz budynku. Oddziaływanie tego czynnika można opisać za pomocą równania:

$$\Delta p_w = \frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho_o \cdot U_H^2 \quad (4)$$

gdzie:

Δp_w – napór wiatru na elewację budynku, Pa;

C_w – współczynnik bezwymiarowy, -;

ρ_o – gęstość powietrza na zewnątrz, kg/m³;

U_H – prędkość wiatru na wysokości H, m/s;

Wyżej opisane czynniki będą wpływać na kierunek strumienia dymu wewnątrz budynku.

Cel badań

Głównym celem badań była analiza rozprzestrzeniania się dymu w budynku zajęтым ogniem pod kątem skuteczności oddymiania klatki schodowej, której nie wyposażono w system różnicowania ciśnienia. Założono, że instalacja oddymiania powinna:

1. Zapobiegać całkowitemu zadymieniu klatki schodowej. Część klatki schodowej zlokalizowana poniżej piętra zajęte-

should be smoke-free so as to allow the evacuation of people from fire compartments. This parameter was assessed on the basis of transmittance on the floor below the fire level (T1) where it should always be equal to 100%.

- Remove smoke from the staircase as fast as possible without causing a rise in the level of pressure in the staircase, which could lead to smoke being “pushed” from the staircase into adjacent spaces. The time required to remove smoke was measured from the moment of closing the door of the staircase on the fire level or from the moment the fire was extinguished. It was assumed that smoke should be removed from the staircase in time shorter than the product of 60 seconds and the number of floors above the fire level. It can be assessed by comparing the time required to increase transmittance on sensors T2 and T3. The distance between the two sensors was 1 storey, so the difference between the time needed to achieve the level of transmittance above 60% on each sensor should be shorter than 60 seconds. Additionally, it was assumed that the maximum level of pressure in the staircase should not exceed 5 Pa.

Tests were carried out for the smoke ventilation systems shown in Table 1. Real fires were carried out in order to compare the above system.

go ogniem powinna być na tyle wolna od dymu, aby możliwa była ewakuacja osób znajdujących się w strefach pożarowych. Parametr ten oceniono na podstawie obserwacji transmitancji na piętrach poniżej poziomu zajętego ogniem (T1) przy założeniu, że powinna ona zawsze wynosić 100%.

- Umożliwić jak najszybsze usunięcie dymu z klatki schodowej, zapobiegając przy tym wzrostowi poziomu ciśnienia, co mogłoby skutkować „wypchnięciem” dymu z klatki schodowej na sąsiednie pomieszczenia. Czas oddymiania mierzony był od chwili zamknięcia drzwi na klatce schodowej na piętrze zajęтым ogniem lub od chwili zgaszenia pożaru. Przyjęto, że proces oddymiania klatki schodowej powinien zakończyć się w czasie krótszym niż 60 s pomnożonym przez liczbę pięter powyżej poziomu zajętego ogniem. Zakłada się, że czas ten będzie porównywalny do czasu wymaganego do zwiększenia transmitancji w obrębie czujników T2 i T3. Odległość pomiędzy czujnikami wynosiła 1 piętro, a zatem różnica pomiędzy czasem potrzebnym na osiągnięcie transmitancji na poziomie 60% w obrębie każdego z czujników powinna być mniejsza niż 60 s. Ponadto założono, że ciśnienie na klatce schodowej nie powinno przekraczać 5 Pa.

Badania przeprowadzono dla instalacji oddymiania wymienionych w tabeli 1. W celu porównania powyższych instalacji przeprowadzono trzy pożary eksperymentalne.

Table 1. Smoke ventilation systems under consideration
Tabela 1. Instalacje oddymiania objęte analizą

Nr. Lp.	Smoke vent Kłapa dymowa	Air inlet Wlot powietrza	Door position on the floor covered by the fire Pozycja drzwi na piętrze zajęтым pożarem
1	1.2 x 1.5 m on the roof (A = 1.8 m ²) / 1,2 x 1,5 m na dachu (A = 1,8 m ²)	open door 1.2 x 2.05 m, (natural ventilation) / otwarte drzwi 1,2 x 2,05 m (naturalna wentylacja)	open all the time after evacuation / otwarte przez cały czas po zakończeniu ewakuacji
2	1.2 x 1.5 m on the roof (A = 1.8 m ²) / 1,2 x 1,5 m na dachu (A = 1,8 m ²)	constant inlet of the air 14 000 m ³ /h ciągły wlot powietrza 14 000 m ³ /h	open all the time after evacuation / otwarte przez cały czas po zakończeniu ewakuacji
3	2 x smoke vent in wall (A = 2.32 m ²) / 2 x kłapa dymowa w ścianie (A = 2,32 m ²)	mechanically adjusted* make up air supply / mechaniczny* wlot powietrza uzupełniającego	door with an automatic door closer, closed after evacuation / drzwi z układem automatycznego zamykania, zamknięte po zakończeniu ewakuacji

* The volume flow rate was variable, depending on the flow through the smoke vent. The goal was to maintain a constant flow through the smoke vent on the roof, equal to 14 000 m³/h.

* Zmienna wartość objętościowego strumienia powietrza zależna od przepływu powietrza przez klapę dymową. Dążono do utrzymania stałego przepływu powietrza przez klapę na dachu na poziomie 14 000 m³/h.

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

Experimental Set-Up

Research was conducted in a full-scale, 9-storey building made of reinforced concrete. The tested staircase had two internal and two external walls. The staircase width was 3.6 m and its length was 5.4 m. A single storey (from one floor to the next floor) had a height of 3.35 m. The full height of the staircase was about 33 m. There were two windows on each floor of the

Warunki eksperymentu

Badania przeprowadzono w rzeczywistym, 9-kondygnacyjnym budynku żelbetonowym. Klatka schodowa o szerokości 3,6 m i długości 5,4 m posiadała dwie wewnętrzne i dwie zewnętrzne ściany. Wysokość jednego piętra wynosiła 3,35 m, zaś wysokość całej klatki schodowej ok. 33 m. Na każdym poziomie klatki schodowej znajdowały się dwa okna od stro-

staircase, directed to the east. There was one door located on each floor of the staircase. The door on the 4th floor had a width of 1.0 m and a height of 2.05 m. The test room was located on the 4th floor and its dimensions were as follows: 5.7 m (width), 5.8 m (length) and 2.55 m (the main height). The height of the test room was greater near the external wall with windows. Specifically, at a distance of 1.1 m from the windows, the height of the room was 2.77 m. There was a corridor between the test room and the staircase. The corridor was 2.0 m wide and approx. 10 m long. On the ground floor, there was another short corridor placed between the staircase and the exit from the building. On the ground floor, both the door from the staircase to the corridor and the exit door from the building had a width of 1.2 m and a height of 2.05 m.

ny wschodniej, a także jedna para drzwi. Drzwi na IV piętrze, na którym zlokalizowane było pomieszczenie zajęte ogniem, miały 1,0 m szerokości i 2,05 m wysokości. Wymiary pomieszczenia testowego wynosiły: 5,7 m szerokości, 5,8 m długości i 2,55 m wysokości głównej. Pomieszczenie to było wyższe przy zewnętrznej ścianie z oknami. W odległości 1,1 m od okien wysokość pomieszczenia wynosiła 2,77 m. Od klatki schodowej pomieszczenie oddzielał korytarz o szerokości 2,0 m i długości ok. 10 m. Na parterze znajdował się kolejny, krótki korytarz, oddzielający klatkę schodową od wyjścia z budynku. Zarówno drzwi prowadzące z klatki schodowej na korytarz na parterze, jak i drzwi wyjściowe z budynku miały szerokość 1,2 m i wysokość 2,05 m.



Figure 1. The test building

Rycina 1. Budynek, w którym przeprowadzono badania

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

The following parameters were measured during the tests (locations of the measurement points were shown in Figure 2):

- (TP, TD) – smoke temperature. The temperature was measured in the middle of the test room at a height of 2.4 m. The temperature at the door opening was measured at a height of 1.8 at half of the width of the door;
- external air temperature;
- (T1, T2, T3, T4) the light transmittance of the air and smoke in the staircase – four light transmittance measurement points were located in the staircase on floors 3, 4, 5, and 7.

Podczas badań rejestrowano następujące parametry (lokacje punktów pomiarowych przedstawiono na rycinie 2):

- (TP, TD) – temperatura dymu. Pomiar temperatury prowadzono w środkowej części pomieszczenia testowego na wysokości 2,4 m. Pomiar temperatury w otworze drzwiowym odbywał się na wysokości 1,8 m w połowie szerokości drzwi;
- temperatura powietrza na zewnątrz;
- (T1, T2, T3, T4) transmittancja światła dla powietrza i dymu na klatce schodowej – cztery punkty pomiaru transmittancji

The measurements were performed at a height of 1.8 m, and at a distance of 1.1 m from the exterior wall (the wall with windows). Light transmittance was measured using laser photometers;

- (V sv) – air and smoke flow through the smoke vent (in the wall or on the roof);
- (V fan) – air flow through the fan;
- (Δp) – pressure difference between the staircase and the outside, in the higher part of the staircase.

cji zlokalizowano na klatce schodowej na poziomach 3, 4, 5 i 7. Pomiarzy prowadzono na wysokości 1,8 m w odległości 1,1 m od ściany zewnętrznej (ściany z oknami). W pomiarach transmitancji światła użyto fotometrów laserowych;

- (V sv) – przepływ powietrza i dymu przez klapę dymową (w ścianie lub na dachu);
- (V fan) – przepływ powietrza przez wentylator;
- (Δp) – różnica pomiędzy ciśnieniem na klatce schodowej a ciśnieniem na zewnątrz w wyższej części klatki schodowej.

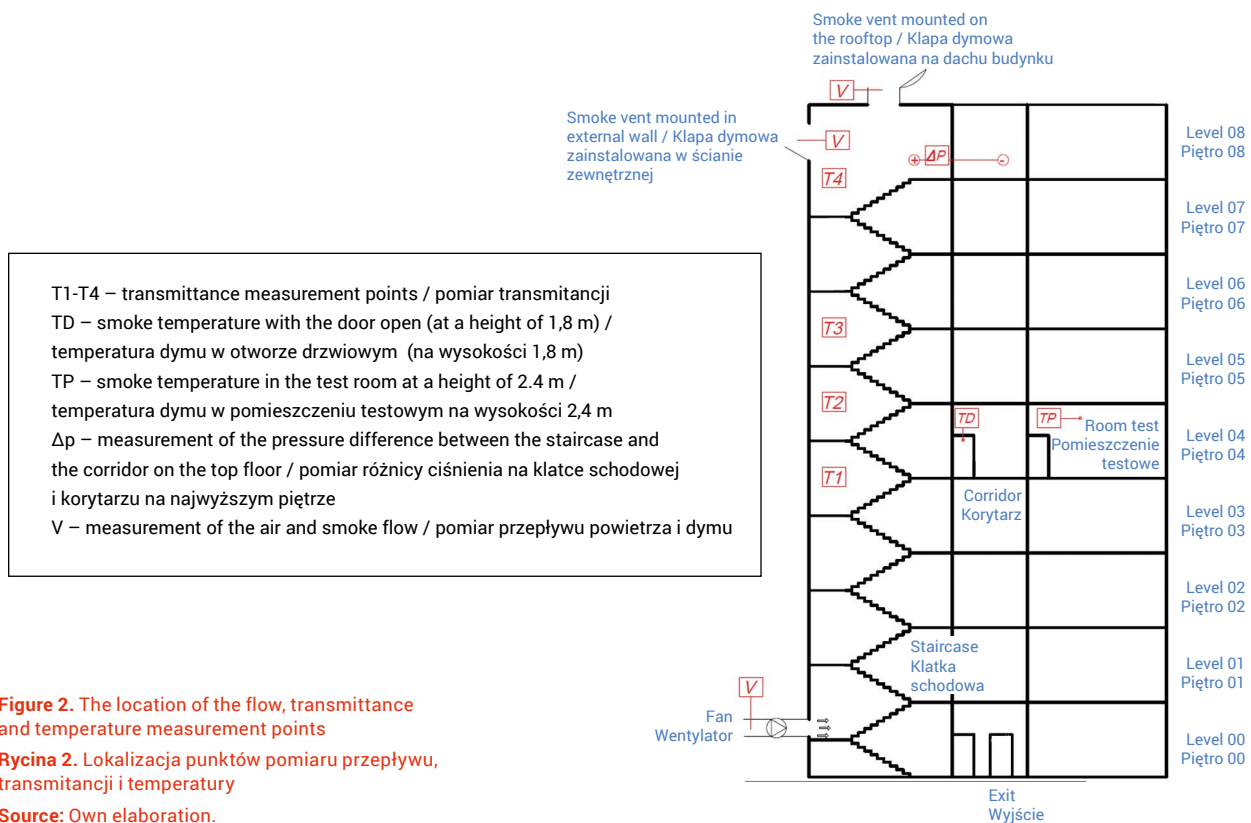


Figure 2. The location of the flow, transmittance and temperature measurement points

Rycina 2. Lokalizacja punktów pomiaru przepływu, transmitancji i temperatury

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

Additionally, a weather station was installed on the roof of the building to measure the speed and direction of wind.

Na dachu budynku zainstalowano stację pogodową, za pośrednictwem której prowadzono pomiar prędkości i kierunku wiatru.

Experimental Procedure

Three real fires were carried out. The typical furniture was used as fuel. The list of materials used for each test is shown in the Table 2.

All doors to the staircase were closed at the beginning of every test. Every device used as part of the smoke management system was turned off before each test. During tests 1 and 2, it was assumed that the staircase door on the 4th floor (the fire area) would remain open till the end of the tests. During test 3, it was assumed that the staircase door on the 4th floor (the fire area) would be opened and closed 5 times. The time of opening

Przebieg eksperymentu

Przeprowadzono trzy pożary w skali rzeczywistej. Pomieszczenia testowe wyposażono w typowe zestawy mebli. Tabela 2 zawiera wykaz materiałów użytych w każdym z testów.

W momencie rozpoczęcia każdego testu wszystkie drzwi na klatce schodowej były zamknięte. Przed każdym testem wszystkie urządzenia w obrębie instalacji kontroli rozprzestrzeniania się dymu były wyłączone. W ramach testów nr 1 i 2 założono, że drzwi prowadzące na klatkę schodową na IV piętrze (obszar objęty ogniem) pozostaną otwarte aż do zakończenia badań. W ramach testu nr 3 przyjęto, że drzwi prowadzące na klatkę

and closing of the door on the 4th floor was shown on the figures below. In each tests, the door on the 4th floor (the fire area) was first opened approximately five minutes after the start of the fire. During each test, it was assumed that smoke ventilation of the staircase would be activated after smoke detection by the smoke detection system. Depending on the test, smoke detection took place between 120 and 180 seconds after the start of the fire.

schodową na IV piętrze (obszar objęty ogniem) będą otwierane i zamykane pięciokrotnie. Czas otwarcia i zamknięcia drzwi na IV piętrze został przedstawiony na poniższych rycinach. Podczas każdego z testów drzwi na IV piętrze (obszar objęty ogniem) zostały po raz pierwszy otwarte ok. 5 min po wybuchu pożaru. W ramach każdego z testów założono, że oddymianie klatki schodowej rozpocznie się po wykryciu dymu przez instalację wykrywania dymu. W zależności od testu nastąpiło to pomiędzy 120. a 180. sekundą od wybuchu pożaru.

Table 2. The list of materials used for each fire test

Tabela 2. Wykaz materiałów użytych w każdym z testów pożarowych

No. Lp.	Article Artykuł	Quantity Ilość	Material Materiał
1	small set of kitchen furniture mały zestaw mebli kuchennych	1	MDF board plyta MDF
2	sink / zlew	1	steel / stal
3	faucet / kran	1	brass / mosiądz
4	cooker / kuchenka	1	steel/glass stal/szkło
5	table / stół	1	pine timber / drewno sosnowe
6	chair / krzesło	4	pine timber / drewno sosnowe
7	sofa bed / kanapa	1	fabric / foam / HDF board tkanina / pianka / płyta HDF
8	coffee table / ława	1	MDF board / płyta MDF
9	chest of drawers / komoda	4	MDF board / płyta MDF
10	chest of drawers (with baskets) komoda z koszami	1	wood / cotton / polyester / MDF Board drewno / bawełna / poliester / płyta MDF
11	hassock / puf	2	fabric / polyester / MDF Board tkanina / poliester / płyta MDF
12	pillow / poduszka	4	polyester / poliester
13	blanket / koc	1	polyester / poliester
14	carpet / dywan	1	polypropylene / latex polipropylen / lateks
15	curtain / zasłona	1	polyester / nylon poliester / nylon
16	cornice / karnisz	2	steel / stal
17	rack / wieszak	1	wood / drewno
18	lamp / lampa	1	paper/ steal / glass papier / stal / szkło
19	floor lining (36 m ²) / wykładzina podłogowa (36 m ²)	1	PVC / PCV

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

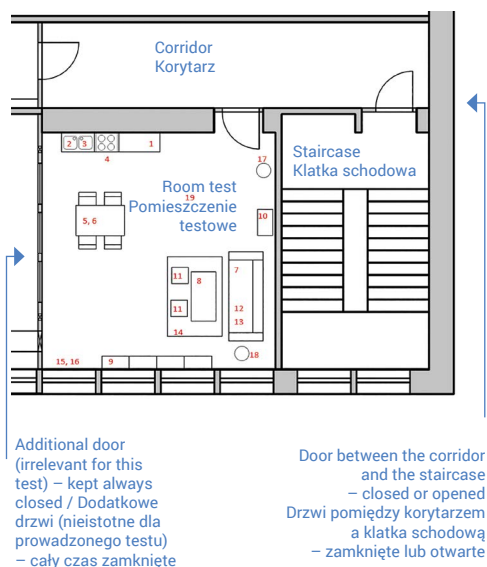


Figure 3. The plan of the 4th floor of the building (including the test room and the corridor)

Rycina 3. Rzut IV piętra budynku (obejmujący pomieszczenie testowe i korytarz)

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

Success Criteria

- The following parameters were assessed during the tests:
- checking if the smoke would fall below the level covered by the fire. It was desirable that smoke would not be below this level;
 - checking the level of pressure in the staircase above the level covered by the fire;
 - determining the time required to remove smoke from the staircase.

The assessment criteria were further described in Aim of the research section.

Results

The results of the tests are presented below. In test 1, the fire was put out after 10 minutes to prevent flashover. In test 2, flashover occurred after about 10 minutes and the fire was put out after about 22 minutes. In test 3, there was no flashover and the fire was put out after about 25 minutes.



Figure 4. A view of the room 2 minutes after starting fire test 1
Rycina 4. Wygląd pomieszczenia 2 min po rozpoczęciu testu pożarowego nr 1

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

Kryteria powodzenia

- Podczas każdego z testów oceniano następujące parametry:
- sprawdzenie, czy dym opada poniżej poziomu zajętego pożarem. Pożądana była sytuacja, w której dym nie znajduje się poniżej tego poziomu;
 - sprawdzenie poziomu ciśnienia na klatce schodowej powyżej poziomu zajętego ogniem;
 - czas potrzebny na oddymienie klatki schodowej.
- Kryteria oceny opisano we wcześniejszej sekcji: Cel badań.

Wyniki

Podczas testu nr 1 ogień zgaszono po 10 min, aby zapobiec przeskokowi płomieni do sąsiednich pomieszczeń. Podczas testu nr 2 po ok. 10 min nastąpił przeskok płomieni do sąsiednich pomieszczeń. Ogień zgaszono po ok. 22 min. Podczas testu nr 3 nie nastąpił przeskok płomieni do sąsiednich pomieszczeń. Ogień zgaszono po ok. 25 min.



Figure 5. A view of the room 6 minutes after starting fire test 1 (all the tests looked similar)

Rycina 5. Wygląd pomieszczenia 6 min po rozpoczęciu testu pożarowego nr 1 (wszystkie testy przebiegały podobnie)

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

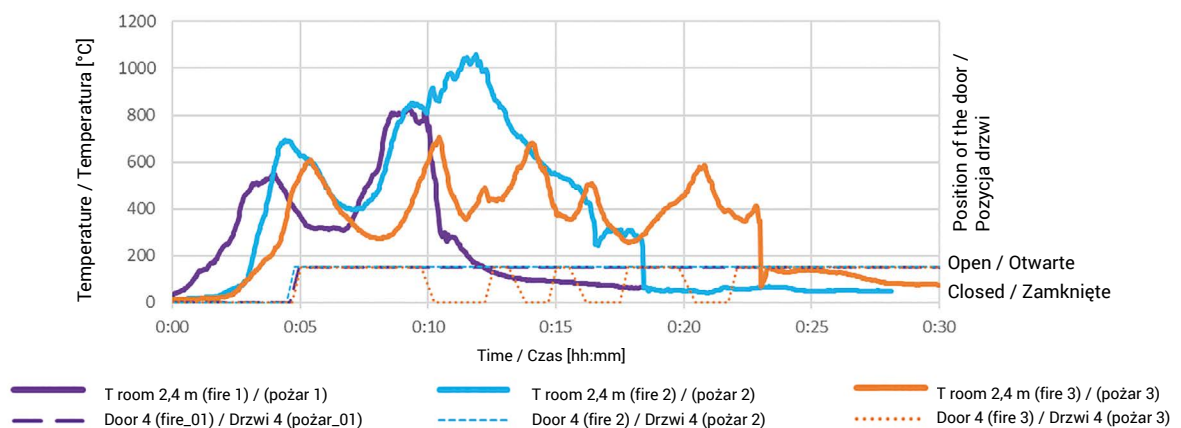


Figure 6. Door position and smoke temperature (T) measured on the measurement point located above the sofa at height of 2.4 m
Rycina 6. Pozycja drzwi i temperatura dymu (T) zarejestrowane w punkcie pomiarowym zlokalizowanym nad kanapą na wysokości 2,4 m
Source: Own elaboration/**Źródło:** Opracowanie własne.

Figures 7 and 8 show that during the initial phase of all fire tests, the increase in smoke temperature had a similar characteristic. It was associated with the combustion process of the backrest and seat of the sofa. The further development of the fire depended on the amount of oxygen in the room. A fast temperature increase, observed during tests 1 and 2 (a continuous air inflow to the room in which the fire was located), can lead to flashover in 10 to 15 minutes. Once this phenomenon occurs, the inflow of large amounts of hot smoke to the staircase is expected. A higher temperature of fire gases is conducive to a higher efficiency of the natural smoke exhaust. In other conditions that occurred during test 3 (a periodical air inflow to the room), the smoke in the staircase may have a much lower temperature, which means worse conditions for the operation of natural smoke ventilation systems.

Ryciny 7 i 8 pokazują, że w pierwszej fazie wszystkich testów pożarowych charakterystyka wzrostu temperatury dymu była podobna, co wynikało z procesu spalania oparcia i siedziska kanapy. Dalszy rozwój pożaru zależał od ilości tlenu dostępnej w pomieszczeniu. Szybki wzrost temperatury obserwowany podczas pożarów nr 1 i 2 (ciągły napływ powietrza do pomieszczenia, w którym zlokalizowany był pożar) może skutkować przeskokiem płomieni do sąsiednich pomieszczeń w ciągu 10–15 min. Kiedy to nastąpi, należy oczekiwać napływu dużej ilości gorącego dymu na klatkę schodową. Wyższa temperatura gazów pożarowych koreluje z wyższą wydajnością naturalnego wyciągu dymu. W odmiennych warunkach, jakie wystąpiły przy pożarze nr 3 (okresowy napływ powietrza do pomieszczenia), dym na klatce schodowej mógł mieć znacznie niższą temperaturę, co oznacza gorsze warunki działania instalacji naturalnego oddymiania.

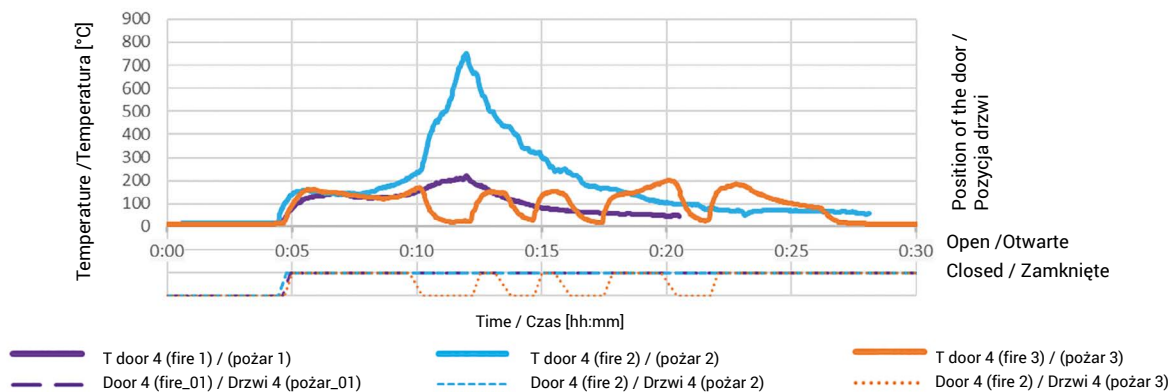


Figure 7. Door position and smoke temperature (T) measured on the measurement point located at the door at a height of 1.8 m
Rycina 7. Pozycja drzwi i temperatura dymu (T) zarejestrowane w punkcie pomiarowym zlokalizowanym w drzwiach na wysokości 1,8 m
Source: Own elaboration/Źródło: Opracowanie własne.

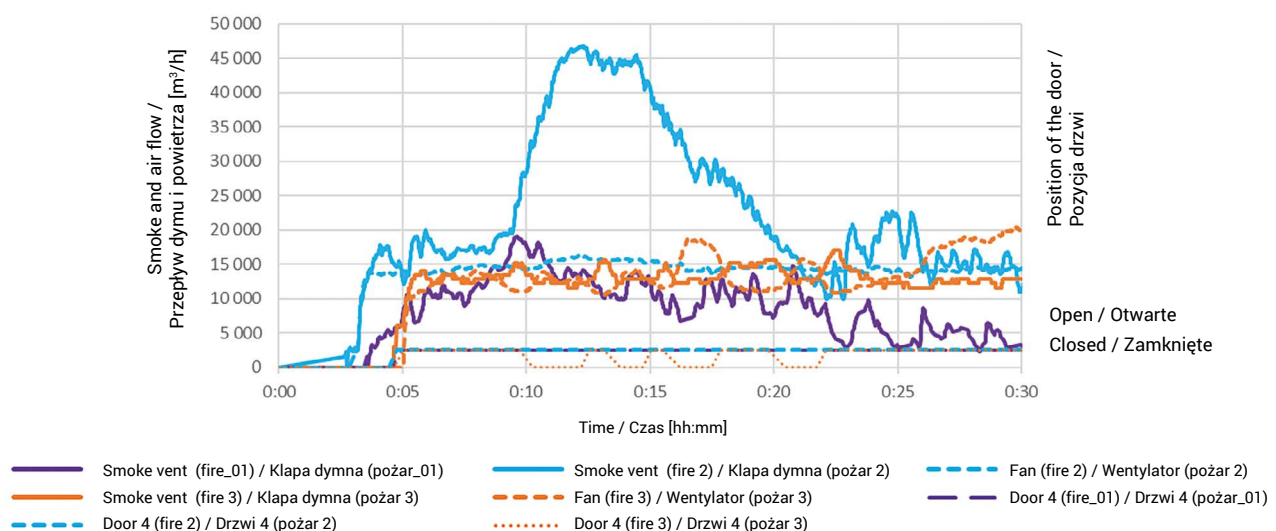


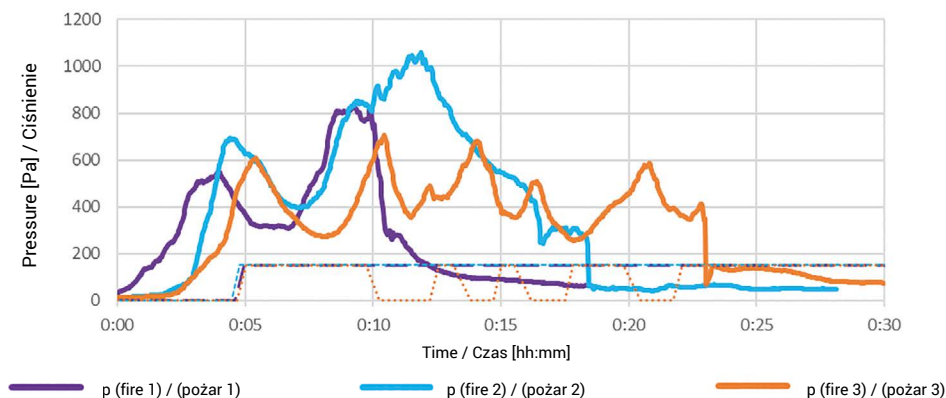
Figure 8. Smoke flow through the smoke vent and air supply flow (if a fan was used)
Rycina 8. Przepływ powietrza przez kłapę dymową i przepływ powietrza nawiewanego (w przypadku użycia wentylatora)
Source: Own elaboration/Źródło: Opracowanie własne.

Figure 8 presents the observed dependence between the amount of smoke flowing through the smoke removal device and the type of the smoke removal system, and the fire phase. Fire 1 (the violet line) illustrates the flow through the smoke damper of the natural system with a continuous inflow hot smoke to the staircase. During fire 2, the accumulation of smoke generated during the fire and the make-up air with constant efficiency occurred. The smoke ventilation system supported by variable make-up air supply, as used during fire 3, allowed keeping the flow through the smoke removal device at a constant level. The flow through the smoke removal device was in this case very similar to the flow recorded for the natural system.

Maintaining a constant flow through the smoke ventilation device at a controlled level is necessary for maintaining the overpressure in the staircase space at a level not exceeding 5 Pa. The accumulation of fire gases, which occurred during fire 2, increased the pressure near the measurement point to above 20 Pa (Figure 9). In such conditions, there was a risk of smoke being “pushed” from the staircase into adjacent rooms.

Rycina 8 przedstawia zależność pomiędzy ilością dymu przepływającego przez urządzenie oddymiające, rodzajem instalacji oddymiającej a fazą pożaru. Pożar nr 1 (linia fioletowa) ilustruje przepływ dymu przez klapę dymową stanowiącą element instalacji naturalnego oddymiania przy ciągłym napływie gorącego dymu na klatkę schodową. Podczas pożaru nr 2 nastąpiła akumulacja dymu wytworzonego podczas pożaru i powietrza uzupełniającego o stałej wydajności. Instalacja oddymiająca ułatwiła wlot zmiennych ilości powietrza uzupełniającego podczas pożaru nr 3, co pozwoliło utrzymać stały poziom przepływu dymu przez urządzenie oddymiające. Przepływ dymu był w tym przypadku zbliżony do strumienia, jaki zarejestrowano dla instalacji naturalnego oddymiania.

Utrzymanie przez urządzenie oddymiające stałego przepływu na kontrolowanym poziomie jest niezbędne w kontekście zapobiegania wzrostowi ciśnienia w obrębie klatki schodowej powyżej 5 Pa. Akumulacja gazów pożarowych, która miała miejsce podczas pożaru nr 2, skutkowała wzrostem ciśnienia w pobliżu punktu pomiarowego do ponad 20 Pa (ryc. 9). W takich warunkach istnieje ryzyko „wypchnięcia” dymu z klatki schodowej do sąsiednich pomieszczeń.



* Flash over occurred during fire 2, and measurement equipment was damaged after 11 minutes.

* Przeskok płomieni do sąsiednich pomieszczeń wystąpił podczas pożaru nr 2; urządzenia pomiarowe uległy zniszczeniu po 11 min.

Figure 9. Pressure in the upper part of the staircase

Rycina 9. Ciśnienie w górnej części klatki schodowej

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

An important aspect related to each of the smoke exhaust solutions tested is the time of the staircase clearance from smoke, determined on the basis of the light transmittance measurement (Figure 10).

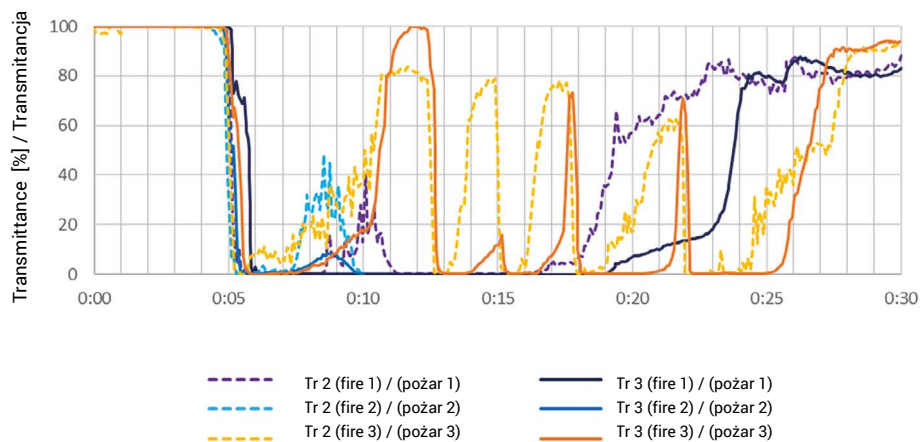
The door to the staircase was opened all the time during test 1. The fire was put out after 18 minutes and the time required to remove smoke was measured from that moment. The level of transmittance at 60% was achieved after 20 minutes on sensor Tr2, while on sensor Tr3 it took 23 minutes 50 seconds. The time required to remove smoke from one floor was 3 minutes 50 seconds.

During test 3, the door on the 4th floor was opened and closed several times. The results presented in the figure show

Przy zastosowaniu każdego z systemów odprowadzania dymu przeanalizowanych w badaniach, ważnym aspektem jest czas potrzebny do oddymienia klatki schodowej, określony na podstawie pomiaru transmitancji światła (ryc. 10).

W przypadku pożaru nr 1 drzwi prowadzące na klatkę schodową pozostawały przez cały czas otwarte. Czas potrzebny do oddymienia mierzono od chwili zgaszenia ognia, co nastąpiło po 18 min od rozpoczęcia eksperymentu. Transmitancję na poziomie 60% zarejestrowano po 20 min na czujniku Tr2 oraz po 23 min 50 s na czujniku Tr3. Czas niezbędny do oddymienia jednej kondygnacji wyniósł 3 min 50 s.

Podczas pożaru nr 3 drzwi na IV piętrze były otwierane i zamykane kilkakrotnie. Wyniki przedstawione na rycinie ukazują czasy



* Flash over occurred during fire 2, and measurement equipment was damaged after 11 minutes.

* Przekosk płomieni do sąsiednich pomieszczeń wystąpił podczas pożaru nr 2; urządzenia pomiarowe uległy zniszczeniu po 11 min.

Figure 10. Measurement of light transmittance above the level covered by the fire

Rycina 10. Pomiar transmitancji światła powyżej poziomu zajętego pożarem

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

the smoke clearance times obtained after each door closing. The measurements showed that during the five-time closing of the door, the time of smoke cleaning in four cases was in the range of 25–60 s. In one case, this time was longer.

Initially, the smoke moved down the staircase due to its low temperature during test 1. Then, it began to flow up as a result of the increasing power of the fire (an increase in the temperature of smoke flowing into the staircase). The phenomenon of the smoke flowing down was not observed during test 3 (100% transmittance).

A higher effectiveness of mechanical solutions compared to the natural smoke control system can be observed. The difference in effective protection against smoke falling can also

oddymienia uzyskane po każdorazowym zamknięciu drzwi. Jak wynika z pomiarów, podczas pięciokrotnego zamykania drzwi czas potrzebny do oddymienia w czterech przypadkach wynosił 25–60 s. W jednym przypadku czas ten był dłuższy.

W pożarze nr 1 dym początkowo przemieszczał się w dół klatki schodowej z uwagi na niską temperaturę. W miarę rozwoju pożaru kierunek przepływu się odwrócił (wskutek wzrostu temperatury dymu napływającego na klatkę schodową). Zjawiska przemieszczania się dymu w dół klatki schodowej nie zaobserwowano podczas pożaru nr 3 (transmittancja na poziomie 100%).

Porównując rozwiązania mechaniczne z instalacją naturalnego oddymiania, odnotowano ogólnie wyższą wydajność tych pierwszych. Różnice pod względem skuteczności ochrony przed

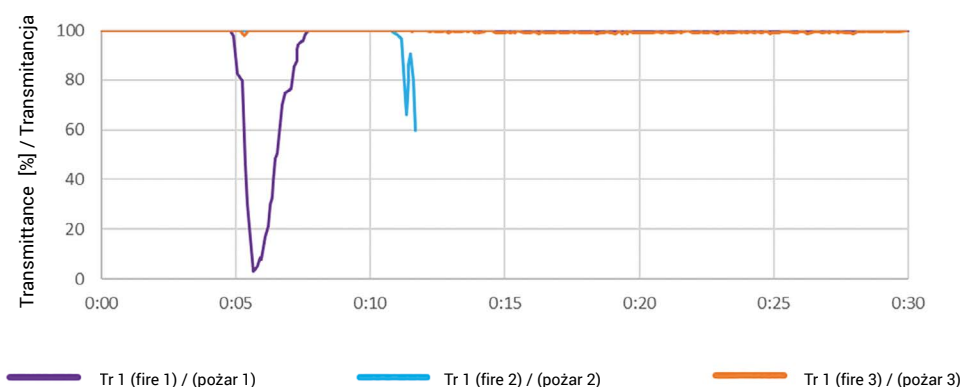


Figure 11. Measurement of light transmittance below the level covered by the fire

Rycina 11. Pomiar transmitancji światła poniżej poziomu zajętego pożarem

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

be seen in Figure 12. The smoke exhaust system assisted by mechanical ventilation, regardless of the temperature of smoke, keeps smoke above the storey on which the fire is located (photo on the right). Natural smoke removal at lower smoke temperatures does not prevent it from falling to lower floors (photo on the left).

naporem dymu można zaobserwować na rycinie 12. System odprowadzania dymu w połączeniu z wentylacją mechaniczną, niezależnie od temperatury dymu, pozwala utrzymać dym ponad piętrzem, na którym zlokalizowany jest pożar (zdjęcie po prawej). Przy niższych temperaturach dymu instalacja naturalnego oddymiania nie zapobiega jego opadaniu na niższe piętra (zdjęcie po lewej).



Figure 12. Smoke in the staircase during test 1 (left side) and test 2 (right side), 45 and 75 seconds after opening the door

Rycina 12. Widok dymu na klatce schodowej podczas testu nr 1 (po lewej) i testu nr 2 (po prawej) odpowiednio 45 i 75 sekund po otwarciu drzwi

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

Discussion

The conducted research enabled tracking the development of a fire and smoke spreading inside the staircase equipped with various ventilation systems. The following observations were made:

- If there is a permanent supply of air to the fire through the open door, it leads to the fire development, and possibly to flashover (fire 2). If the door to the space covered by fire is closed (fire 3), the temperature above the fire and, therefore its power, is reduced;
- Before the flashover, the temperature of smoke flowing to the staircase was to 200°C (fire 1, fire 2, fire 3). After the flashover, the temperature was higher and achieved the level of 700°C (fire 2). The inflow of hot smoke and the inlet of a constant amount of air to the staircase led

Omówienie wyników

Przeprowadzone badania pozwoliły na przeanalizowanie rozwoju pożaru oraz rozprzestrzeniania się dymu na klatkę schodowej wyposażonej w różne instalacje wentylacyjne. Zaobserwowano, że:

- Stały napływ powietrza do pomieszczenia zajętego ogniem przez otwarte drzwi prowadzi do rozwoju pożaru i może skutkować przeskokiem płomieni do sąsiednich pomieszczeń (pożar nr 2). W przypadku zamknięcia drzwi do pomieszczenia zajętego pożarem (pożar nr 3) temperatura powyżej linii ognia, a tym samym jego siła, ulegają obniżeniu.
- Przed przeskokiem płomieni do sąsiednich pomieszczeń temperatura dymu napływającego na klatkę schodową wynosiła do 200°C (pożar nr 1, pożar nr 2, pożar nr 3). Po prze-

to a pressure increase in the staircase above the level covered by the fire (fire 2). The outflow of hot fire gases and the supply of a constant amount of air led to a pressure increase in the staircase above the fire level (fire 2). During test 2, the pressure increased to +20 Pa and such a value can lead to smoke being “pushed” into adjacent spaces.

- Test 1 showed that the smoke fell below the level covered by the fire at the beginning of the test, when it was cold and did not have the buoyancy force. Only the intense development of the fire directed the flow up the staircase. It can be assumed that, in the case of closing the door between the staircase and the fire area, the smoke would remain on the staircase for a long time. The use of a natural smoke control system consisting of a smoke vent in the roof and opening the door on the ground level would not be effective in the case of cold smoke.
- The speed at which smoke was removed from the staircase was assessed after putting out the fire. The assessment was carried out for the level of transmittance equal to 60%. Fire 1 was put out after 10 minutes, and the level of 60% transmittance was reached after 19 minutes on sensor Tr2 and after 23 minutes on sensor Tr3. Fire 3 was put out after 25 minutes, and the level of 60% transmittance was reached after 26 minutes and 30 seconds on sensor Tr2 and after 27 minutes and 20 seconds on sensor Tr3. Smoke was removed 4 times faster in test 3 than in test 1.
- During tests 1 and 3, the level of pressure did not exceed 5 Pa. Only during test 2, the pressure level exceeded 20 Pa.

Conclusions

The conducted tests lead to the conclusion that the best solution to protect staircases without PDSs would be to use a smoke ventilation system made of a smoke vent mounted at the top of the building and mechanically adjusted make up air supply on the ground level.

Acknowledgements

This work was supported by the SMAY Sp. z o. o., Poland (project ‘bezpiecznaewakuacja.pl’). The project also involved fire safety specialists from the Scientific and Research Center for Fire Protection – National Research Institute, the Faculty of Building Services, Hydro and Environmental Engineering at the Warsaw University of Technology, the Silesian University of Technology, the Main School of Fire Service in Warsaw, and an independent group of scientists.

skoku płomieni nastąpił wzrost temperatury do 700°C (pożar nr 2). Napływ gorącego dymu w połączeniu z wlotem stałych ilości powietrza na klatkę schodową spowodował wzrost ciśnienia na klatce schodowej powyżej piętra zajętego ogniem (pożar nr 2). Odpływ gorących gazów pożarowych w połączeniu z napływem stałych ilości powietrza skutkowało z kolei wzrostem ciśnienia na klatce schodowej powyżej piętra zajętego ogniem (pożar nr 2). Podczas testu ciśnienie wzrosło powyżej 20 Pa. Tak wysokie ciśnienie może skutkować „wypchnięciem” dymu do sąsiednich pomieszczeń.

- Podczas testu nr 1 stwierdzono, iż początkowo dym opadł poniżej piętra zajętego ogniem, z uwagi na niską temperaturę i brak lotności. Zmiana kierunku przepływu dymu nastąpiła dopiero, gdy pożar znacznie się rozwinął. Można założyć, że w przypadku zamknięcia drzwi pomiędzy klatką schodową a obszarem objętym ogniem dym przez długi czas utrzymałby się wewnątrz klatki schodowej. Zastosowanie instalacji naturalnego (grawitacyjnego) oddymiania z klapą dymową zlokalizowaną na dachu i otwarciu drzwi na parterze nie stanowi skutecznego rozwiązania, gdy mamy do czynienia z zimnym dymem.
- Czas niezbędny do oddymiania klatki schodowej liczone od momentu wygaszenia pożaru, przyjmując jako wyznacznik transmitancję na poziomie 60%. W przypadku pożaru nr 1 ogień zgaszono po 10 min, zaś transmitancję na poziomie 60% uzyskano po 19 min w obrębie czujnika Tr2 i po 23 min na czujniku Tr3. W przypadku pożaru nr 3 ogień zgaszono po 25 min, a transmitancję na poziomie 60% uzyskano po 26 min 30 s w obrębie czujnika Tr2 i po 27 min 20 s na czujniku Tr3. Podczas testu nr 3 oddymianie nastąpiło cztery razy szybciej niż podczas testu nr 1.
- W trakcie pożarów nr 1 i 3 ciśnienie nie przekroczyło 5 Pa, zaś podczas pożaru nr 2 jego wartość przekroczyła 20 Pa.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych testów stwierdzono, iż najskuteczniejszym rozwiązaniem w kontekście oddymiania klatki schodowej niewyposażonej w system różnicowania ciśnienia jest użycie klapy dymowej zlokalizowanej na dachu w połączeniu z mechanicznym wlotem powietrza uzupełniającego, umiejscowionym na parterze.

Podziękowania

Badanie zrealizowano przy wsparciu SMAY Sp. z o. o., Polska (projekt bezpiecznaewakuacja.pl). W projekcie wzięli także udział specjaliści z zakresu bezpieczeństwa pożarowego z następujących instytucji: Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowy Instytut Badawczy, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Politechnika Śląska i Szkoła Główna Służby Pożarniczej, oraz niezależna grupa naukowców.

Literature/Literatura

- [1] NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems.
- [2] PN-EN 12101-6:2007 Smoke and heat control systems - Part 6: Specification for pressure differential systems – Kits.
- [3] Klote J. H., and Milke J. A., *Principles of Smoke Management*, ASHREA, Atlanta 2002.
- [4] Bellido C., Quiroz A., Panizo A., Torero J. L., *Performance Assessment of Pressurized Stairs in High Rise Buildings*, "Fire Technology" 2009, 45, 189–200, <https://doi.org/10.1007/s10694-008-0078-0>.
- [5] Acikyol B. H., Kilic A., Balik G., *Experimental Investigation of the Effect of Fire Protection Lobby on Stair Pressurization System in a High-Rise, Building*, "Fire Technology" 2017, 53, 135–151, <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0560-4>.
- [6] VdS 2221:2007-06 VdS Richtlinien für Entrauchungsanlagen in Treppentraumen (ETA) – Planung und Einbau.
- [7] PN-B 02877 Ochrona przeciwpożarowa budynków – Instalacje grawitacyjne do odprowadzania dymu i ciepła – Zasady projektowania.
- [8] Smardz P., *Staircase fire ventilation in middle-high buildings in Europe*, Scientific-Technical Seminar in Zakopane, Poland 2016.
- [9] Zhao G., Beji T., Merci B., *Study of FDS simulations of buoyant fire-induced smoke movement in a high-rise building stairwell*, "Fire Safety Journal" 2017, 91, 276–283, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.005>.

GRZEGORZ KUBICKI, PH.D. ENG. – A specialist in the field of fire ventilation systems. For 15 years, lecturer of the fire ventilation subject and in post-graduate studies 'Building smoke extraction systems – fire ventilation'. Participant of research programmes and co-creator of technical solutions for modern smoke prevention systems for the evacuation and smoke extraction of stairwells.

IZABELA TEKIELAK-SKAŁKA, M.SC. – graduated from the Cracow Technical University in 2010 with a M.Sc. degree. Head of the department of research and CFD analysis at SMAY Sp. z o.o. She has been researching various fire ventilation systems for 8 years.

MARCIN CISEK, M.SC. – graduated from the Main School of Fire Service in Warsaw in 2003 with the master degree in fire protection engineering. Since then he has been a lecturer at the Faculty of Civil Safety Engineering in the Main School of Fire Service. For the last 17 years he has also been working as a fire protection engineer and an expert in a fire protection consultant company. He is a Ph.D. candidate at the Building Technical Institute.

DR INŻ. GRZEGORZ KUBICKI – specjalista w dziedzinie wentylacji pożarowej. Od 15 lat prowadzi na uczelni zajęcia z wentylacji pożarowej oraz wykłady w ramach studiów podyplomowych z zakresu systemów oddymiania budynków – wentylacji pożarowej. Uczestnik programów badawczych oraz współtwórca rozwiązań technicznych na potrzeby współczesnych systemów zapobiegania rozprzestrzenianiu dymu w procesie ewakuacji i oddymiania klatek schodowych.

MGR INŻ. IZABELA TEKIELAK-SKAŁKA – w 2010 r. ukończyła studia na Politechnice Krakowskiej, uzyskując tytuł magistra. Kierownik działu badań i analiz CFD w przedsiębiorstwie SMAY Sp. z o.o. Od 8 lat prowadzi badania nad różnymi systemami wentylacji pożarowej.

MGR INŻ. MARCIN CISEK – w 2003 r. ukończył Szkołę Główną Służby Pożarniczej, uzyskując tytuł magistra w dziedzinie inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. Od tego czasu wykłada na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Cywilnego Szkoły Główny Służby Pożarniczej. Od 17 lat pracuje także jako inżynier i ekspert ds. bezpieczeństwa pożarowego w firmie konsultingowej. Otworzył przewód doktorski w Instytucie Techniki Budowlanej.