

mgr inż. Marcin Fryda¹⁾

ORCID: 0000-0002-4679-0947

dr hab. inż. Dorota Brzezińska, prof. PŁ^{1)*}

ORCID: 0000-0003-4615-4454

Skuteczność działania systemów różnicowania ciśnień w klatkach schodowych budynków wysokich

Effectiveness of pressure differential systems in staircases of high-rise buildings

DOI: 10.15199/33.2022.07.03

Streszczenie. Zadaniem systemów różnicowania ciśnień w klatkach schodowych jest zapobieganie przedostawaniu się do nich dymu. Celem przeprowadzonych badań było określenie, jaki wpływ na warunki utrzymania nadciśnienia ma zmiana szczelności obudowy klatki schodowej. Wykazano, że zastosowanie klapy rozszczelniającej pozwala na znacznie bardziej precyzyjną i zdecydowanie szybszą regulację nadciśnienia wytwarzanego w klatce schodowej niż przy dotychczas stosowanych rozwiązaniach.

Słowa kluczowe: system różnicowania ciśnień; klatka schodowa; system ciśnieniowy; bezpieczeństwo ewakuacji; budynki wysokie.

Abstract. The purpose of pressure differential systems in staircases is to prevent smoke from entering them. The aim of the research was to determine what influence on the conditions of keeping the overpressure has a change in the airtightness of the staircase casing. It has been shown that the use of an unsealing flap allows for much more precise and much faster regulation of the overpressure generated in the staircase than with previously used solutions.

Keywords: pressure differential system; stairwell; pressure system; evacuation safety; high-rise buildings.

Zadaniem przeciwpożarowych systemów różnicowania ciśnień w budynku jest zapobieganie przedostawaniu się dymu do pomieszczeń chronionych, takich jak szyby windowe, korytarze, klatki schodowe oraz wszystkie pomieszczenia, które w razie pożaru powinny pozostać wolne od dymu. W celu utrzymania wymaganej różnicy ciśnień między przestrzenią chronioną a resztą budynku (wartość ta zależy od wymagań obowiązujących przepisów i norm) konieczne jest określenie, jak duże nieszczelności występują w przegrodach chronionych pomieszczeń. Jest to podstawowe kryterium prawidłowego doboru wydajności jednostki napowietrzającej. Dotychczasowe badania koncentrowały się na potwierdzeniu skuteczności systemów ciśnieniowych, przy założeniu stałego poziomu nieszczelności obudowy przestrzeni chronionej.

Zasada działania ciśnieniowych systemów przeciwpożarowych zabezpieczających drogi ewakuacyjne przed zadymieniem polega na wytworzeniu nadciśnienia o określonej wartości w przestrzeniach chronionych w stosunku do przestrzeni objętej pożarem [1]. Wszystkie drzwi do pomieszczeń o podwyższonym ciśnieniu powinny być wyposażone w samozamykacze. Jednocześnie projektanci muszą tak zaprojektować system różnicowania ciśnień, aby podczas ewakuacji siła potrzebna do otwarcia tych drzwi nie przekraczała 100 N. Ponadto, konieczne jest zapewnienie wypływu powietrza z przestrzeni chronionej po otwarciu do niej drzwi i jego przepływ aż na zewnątrz budynku. Wymagana wartość wytworzonego nadciśnienia waha się od 12,5 do 80 Pa, w zależności od norm i przepisów, zgodnie z którymi projektowany jest system [2 – 4]. W przypadku, gdy drzwi są otwarte, kryterium ciśnienia zostaje zastąpione kryterium przepływu powietrza. Minimalna wartość przepływu powietrza przez otwarte drzwi wynosi $0,5 \div 2$ m/s [2, 3].

W celu zapewnienia wymaganej skuteczności, system różnicowania ciśnień musi szybko reagować na zmienność warunków podczas otwierania i zamykania drzwi. W przypadku nadmiernego ubytku ciśnienia z przestrzeni chronionej, system zwiększa ilość dostarczanego powietrza przez zwiększenie wydajności wentylatora nawiewnego w wyniku zmiany obrotów jego silnika [5]. Aby spełnić wymienione kryteria, należy indywidualnie dobrać odpowiednie urządzenie napowietrzające do każdej klatki schodowej. Ze względu na nieszczelności występujące w budynku, nominalną wydajność wentylatora trzeba skorygować za pomocą współczynników korekcyjnych. Nieszczelności występują zwykle w oknach, drzwiach, szczelinach ścian i sufitów, szybach windowych, szybach instalacyjnych, podłogach technicznych i sufitach podwieszanych. Obliczona przez projektanta powierzchnia nieszczelności nie uwzględnia jednak zmian, które mogą wystąpić w trakcie budowy lub użytkowania budynku. W praktyce może to stanowić poważny problem, ponie-

¹⁾ Politechnika Łódzka; Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

^{*)} Adres do korespondencji: dorota.brzezińska@p.lodz.pl

waż podczas wieloletniej eksploatacji obiektu, klatka schodowa może być zarówno rozszczelniona, jak i doszczelniona, np. na skutek zmian architektonicznych lub prac termomodernizacyjnych [6].

W praktyce projektowej, dobór wydajności nominalnej jednostki napowietrzającej wynika na ogół z konieczności spełnienia kryterium zapewnienia nadciśnienia 10 Pa przy otwartych drzwiach lub kryterium przepływu powietrza przez otwarte drzwi 0,75 m/s lub 2 m/s, przy czym liczba otwartych drzwi na klatce schodowej zależy od systemu zastosowanego w budynku [2]. Tak dobrany wentylator ma wydajność kilku-, a nawet kilkunastokrotnie większą od ilości powietrza potrzebnego do uzyskania nadciśnienia 50 Pa na klatce schodowej przy zamkniętych wszystkich drzwiach, nawet po uwzględnieniu współczynników korygujących. Ograniczenia techniczne związane z pracą wentylatora na falowniku (minimalna częstotliwość pracy i minimalna prędkość obrotowa wentylatora związana z chłodzeniem silnika) powodują, że tak zaprojektowany system może wytworzyć wyższe nadciśnienie na klatce schodowej niż zakładane 50 Pa. W wyniku zmian podczas eksploatacji budynku, np. wymiany uszczelek drzwiowych, pierwotna nieszczelność może ulec dodatkowemu zmniejszeniu, powodując dalsze zawyżanie nadciśnienia. W takim przypadku regulator nie będzie już w stanie zmniejszyć prędkości obrotowej wentylatora napowietrzającego, a uzyskane parametry będą znacznie przekraczać wartości normowe, uniemożliwiając jednocześnie otwarcie drzwi na klatce schodowej.

Znane są rozwiązania zapobiegające zbyt dużemu wzrostowi nadciśnienia na klatce schodowej, powodującego utrudnienia w otwarciu drzwi ewakuacyjnych. Do urządzeń tych zaliczyć można:

- klapę nadmiarowo-upustową, otwierającą się w momencie wystąpienia zbyt dużego ciśnienia na klatce schodowej, zapewniającą upust powietrza na zewnątrz budynku;
- bypass powietrza nawiewanego na klatkę schodową, powodujący ograniczenie strumienia powietrza dostar-

zanego do pionowej drogi ewakuacyjnej w momencie wystąpienia zbyt dużego nadciśnienia;

- presostat wysokiego ciśnienia, odcinający zasilanie wentylatora napowietrzającego w przypadku wystąpienia zbyt dużego nadciśnienia.

Celem badań było określenie, jaki wpływ na warunki utrzymania nadciśnienia ma zmiana szczelności klatki schodowej. Parametr ciśnienia analizowano pod kątem stabilności utrzymwanego nadciśnienia oraz dynamiki osiągania założonej różnicy ciśnienia. Zbadano również, jaki wpływ na układ regulacji ciśnienia, w przypadku szczelnej klatki schodowej, ma zastosowanie dodatkowego wentylatora wyciągowego, usuwającego nadmiar powietrza z przestrzeni chronionej.

Zasady projektowania systemów różnicowania ciśnień

Podstawowym dokumentem obowiązującym w Unii Europejskiej, na podstawie którego projektuje się obecnie systemy różnicowania ciśnień, jest norma EN 12101, część 6 [2]. Jest to zbiór danych i wytycznych dotyczących metod obliczeniowych, sposobu montażu i uruchomienia systemów nadciśnieniowych zapobiegających zadymieniu dróg ewakuacyjnych. W zależności od przeznaczenia budynku i wymagań bezpieczeństwa, norma wyróżnia 6 klas określających kryteria dla projektowanego budynku. Zgodnie z tą normą, różnica ciśnień po obu stronach zamkniętych drzwi między klatką schodową o podwyższonym ciśnieniu a przedsionkiem lub korytarzem powinna być nie mniejsza niż 50 Pa, siła potrzebna do otwarcia drzwi nie większa niż 100 N, a strumień powietrza na otwartych drzwiach klatki schodowej musi wynosić 0,75 – 2 m/s w zależności od klasy budynku.

Analiza problemu

Pierwszym krokiem w projektowaniu systemów różnicowania ciśnień jest określenie wymaganej ilości powietrza dostarczanego do klatki schodowej oraz dobór wentylatora napowietrzającego. Główne kryteria obliczeniowe to utrzymanie odpowiedniego nadciśnienia

i prędkości przepływu powietrza przez otwarte drzwi klatki schodowej, w celu niedopuszczenia do przedostania się do niej dymu podczas pożaru na jednej z kondygnacji. Wytworzony gradient ciśnienia zapobiega przenikaniu dymu do przestrzeni chronionej, utrzymując w niej odpowiednie warunki do ewakuacji.

Podstawowym równaniem stosowanym w procesie projektowym systemów kontroli rozprzestrzeniania się dymu jest zależność wynikająca z równania Bernoulliego opisującego przepływ powietrza przez nieszczelność:

$$m = CA\sqrt{2\rho\Delta p} \quad (1)$$

gdzie:

m – masowe natężenie przepływu;
C – współczynnik wypływu;
A – powierzchnia przepływu;
 Δp – różnica ciśnień po obu stronach nieszczelności;
 ρ – gęstość gazu.

Równanie (1) można również wyrazić jako objętościowy przepływ gazu:

$$Q = CA\sqrt{(2\Delta p)/\rho} \quad (2)$$

Podczas przepływu w temperaturze 21°C i pod ciśnieniem atmosferycznym, przy założonym współczynniku przepływu 0,65, równanie (2) przyjmuje postać:

$$Q = 0,839A\sqrt{\Delta} \quad (3)$$

Przekształcając równanie (3), różnicę ciśnień po obu stronach nieszczelności można wyrazić wzorem:

$$\Delta p = 1,42(Q/A)^2 \quad (4)$$

Wynika z tego, że różnica ciśnień po obu stronach nieszczelności zależy od objętości strumienia powietrza i powierzchni nieszczelności. Zmiany zachodzące w procesie inwestycyjnym lub podczas użytkowania budynku mogą w istotny sposób modyfikować warunki ochrony dróg ewakuacyjnych [6]. Regulatory prędkości obrotowej wentylatorów przy dużych zmianach nieszczelności mogą mieć problemy z utrzymaniem wymaganego ciśnienia, co często prowadzi do niestabilnej i oscylacyjnej pracy wentylatora. W związku z tym postanowiliśmy przeanalizować wpływ zmiany powierzchni nieszczelności na parametry ciśnienia. W tym celu na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym przeprowadzono badania w następujących wariantach:

1) wytworzenie nadciśnienia w przestrzeni chronionej za pomocą wentylatora o zmiennej wydajności w przypadku, gdy obudowa klatki schodowej jest szczelna;

2) wytworzenie nadciśnienia w przestrzeni chronionej za pomocą wentylatora o zmiennej wydajności wciągającego powietrze do częściowo rozszczelnionej klatki schodowej;

3) wytworzenie nadciśnienia w przestrzeni chronionej za pomocą wentylatora o zmiennej wydajności w przypadku rozszczelnionej klatki schodowej;

4) wytworzenie nadciśnienia w przestrzeni chronionej, której obudowa była szczelna, za pomocą wentylatora o zmiennej wydajności przy jednoczesnym wywiewie powietrza z przestrzeni klatki schodowej wymuszonym przez wentylator o stałym wydatku.

Powierzchnię poszczególnych nieszczelności wyznaczono na podstawie zależności (3), którą można również znaleźć w literaturze, m.in. w [7] oraz [8].

Badania laboratoryjne

Badania przeprowadzono w Laboratorium Techniki Przeciwpożarowej CS w Błoniu k. Wrocławia. Komorę wentylatorową przedstawiono na fotografii 1. Pomieszczenie laboratoryjne zostało przygotowane zgodnie z wytycznymi normy [9]. Stanowisko badawcze składa się z dwóch pomieszczeń pomiarowych:

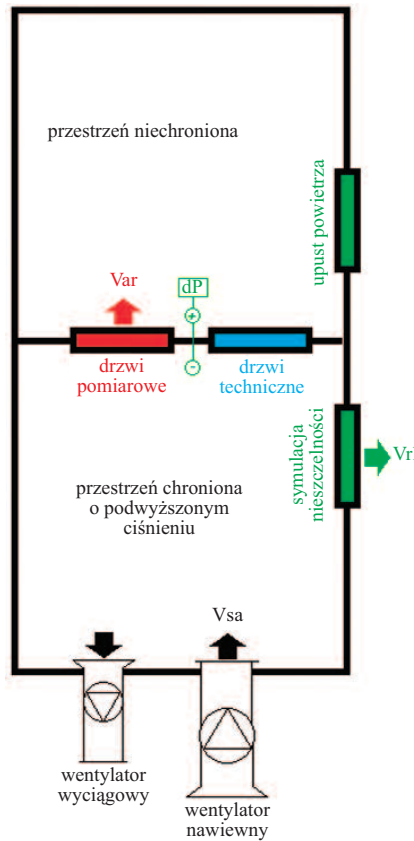
- chronionego o kubaturze ok. 125 m³ (symulacja klatki schodowej);

- niezabezpieczonego o objętości ok. 115 m³ (symulacja korytarza).

Z przestrzeni korytarza zapewniono naturalny upust powietrza. Schemat laboratorium pokazano na rysunku 1. Podczas badań mierzono wartość nadciśnienia utrzymującego się na klatce schodowej względem korytarza, w zależności od kąta otwarcia drzwi. Po-



Fot. 1. Pomieszczenie laboratoryjne
Photo 1. Laboratory room



Rys. 1. Schemat laboratorium
Fig. 1. Diagram of the measuring laboratory

miar dokonano za pomocą przetwornika ciśnienia o czasie odpowiedzi 0,1 s i całkowitym błędzie pomiaru mniejszym niż 1,5%. Kąt otwarcia drzwi był odczytywany jako informacja zwrotna o pozycji serwonapędu przepustnicy imitującej drzwi. Wszystkie dane pomiarowe zostały zarejestrowane w czasie rzeczywistym w sterowniku przemysłowym wyposażonym w szybkie moduły pomiarowe, zapisujące wyniki z częstotliwością 20 Hz, które następnie w postaci arkusza kalkulacyjnego przesyłano do komputera PC.

Określony przepływ powietrza osiągnęto przez zmianę prędkości obrotowej wentylatora za pomocą przemiennej częstotliwości. Maksymalna wydajność wentylatora wynosiła 56 tys. m³/h. Wartość strumienia powietrza obliczono na podstawie zmierzonego spadku ciśnienia na standardowym stożku pomiarowym o znanej charakterystyce. Stanowisko badawcze było także wyposażone w wentylator wyciągowy o stałej wydajności 7,5 tys. m³/h. W zależności od wariantu badania wentylator był włączany lub

wyłączany. W przypadku wyłączonego wentylatora kanał wywiewny był szczelnie zamknięty.

Procedura testów laboratoryjnych

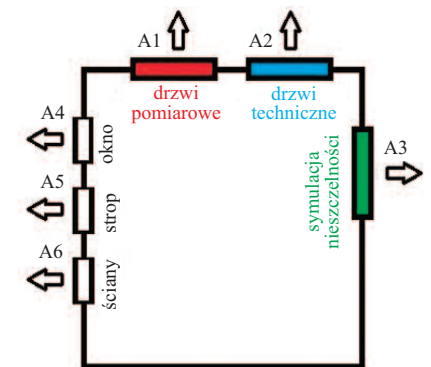
W badaniach zastosowano przepustnicę wielopłaszczyznową, za pomocą której można było zmieniać szczelność chronionego pomieszczenia. Przy poziomie otwarcia przepustnicy 0, 50 i 100% zdefiniowano trzy umowne pojęcia: klatka schodowa o minimalnym przecieku (szczelna); klatka schodowa o średnim przecieku i klatka schodowa o dużej powierzchni przecieku. W przypadku klatki schodowej o dużej powierzchni nieszczelności – uzyskany opór wypływu powietrza był wystarczający do uzyskania różnicy ciśnień 50 Pa. W przypadku, gdy obudowa przestrzeni chronionej została by całkowicie rozszczelniona, np. w wyniku otwarcia drzwi, utrzymanie ciśnienia 50 Pa byłoby niemożliwe. W takiej sytuacji systemy różnicowania ciśnień mają za zadanie wytworzyć strumień powietrza przepływający przez powstałą nieszczelność z odpowiednią prędkością, chroniąc tym samym przestrzeń przeznaczoną do ewakuacji przed zadymieniem.

Na podstawie danych i tabel zawartych w literaturze [2, 10 – 14] obliczono powierzchnię nieszczelności jako sumę poszczególnych ścieżek nieszczelności:

$$A_e = \sum_{i=1}^n A_i \quad (6)$$

gdzie:
A_e – efektywny obszar nieszczelności,
A_i – obszar przecieku dla danej ścieżki.

Na rysunku 2 pokazano ścieżki przecieków w pomieszczeniu laboratoryjnym



Rys. 2. Równoległe obszary nieszczelności w pomieszczeniu laboratoryjnym

[opracowanie własne]
Fig. 2. Parallel leakage areas for a laboratory room

nym. Przyjęte obszary nieszczelności przedstawiono w tabeli 1.

Przy użyciu przepustnicy wielopłaszczyznowej wyznaczono trzy potencjalne wartości przecieków, w przypadku których oszacowano całkowitą powierzchnię nieszczelności z pomieszczenia laboratoryjnego. Wartości te odpowiadają następującym warunkom:

- 1) przepustnica całkowicie zamknięta, klatka schodowa szczelna – szacunkowa powierzchnia nieszczelności 0,0652 m²; teoretyczny strumień powietrza 1392 m³/h;
- 2) przepustnica częściowo otwarta (50%), klatka schodowa o średniej szczelności – szacowana powierzchnia nieszczelności 0,477 m²; teoretyczny strumień powietrza 10191 m³/h;
- 3) przepustnica całkowicie otwarta (100%), klatka schodowa z dużą powierzchnią nieszczelności – szacunkowa powierzchnia nieszczelności 1,463 m²; teoretyczny strumień powietrza 31241 m³/h.

Tabela 1. Wykaz obszarów nieszczelności w przypadku poszczególnych dróg przecieków

Table 1. List of leakage areas for each outfall route

Indeks	Element konstrukcyjny	Powierzchnia przecieków [m ²]
A ₁	drzwi pomiarowe	0,03
A ₂	drzwi techniczne	0,01
A ₃ (system szczelny)	przepustnica symulująca nieszczelności	0,0124
A ₃ (system częściowo rozszczelniony)	przepustnica symulująca nieszczelności	0,4244
A ₃ (system rozszczelniony)	przepustnica symulująca nieszczelności	1,41
A ₄	okno	0,000036
A ₅	sufit	0,004295
A ₆	ściany	0,008514

W przypadku testu, podczas którego powietrze było usuwane z klatki schodowej przez wentylator wyciągowy, w obliczeniach uwzględniono strumień odprowadzanego przez wentylator powietrza w ilości 7500 m³/h. Przeprowadzono następujące testy:

- Test 1 – w przypadku klatki schodowej o minimalnej szczelności (hermetycznej);
- Test 2 – w przypadku klatki schodowej o średnich przeciekach;
- Test 3 – w przypadku klatki schodowej z dużą powierzchnią nieszczelności;

• Test 4 – w przypadku klatki schodowej o minimalnej szczelności z załączonym wentylatorem wyciągowym.

Każda z prób pomiarowych składała się z Sekwencji Cyklu Testowego, odwzorowującego operację otwierania i zamykania drzwi pomiędzy klatką schodową a korytarzem ewakuacyjnym. Na rysunku 3 przedstawiono sekwencję cyklu otwierania i zamykania drzwi w funkcji czasu: t₁ = 1 s – czas otwarcia drzwi; t₂ = 6 s – czas, przez jaki drzwi są otwarte; t₃ = 3 s – czas zamykania drzwi; t₄ = 6 s – czas, przez jaki drzwi są zamknięte.



Rys. 3. Sekwencja cyklu otwierania i zamykania drzwi w funkcji czasu

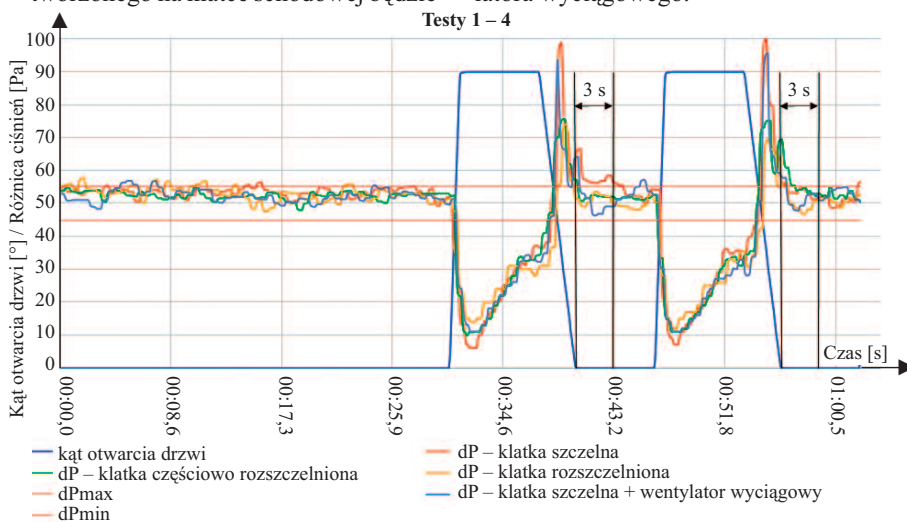
Fig. 3. Door opening cycle sequence as a function of time

Badania laboratoryjne – proces badawczy i wyniki

W celu oceny wpływu zmian nieszczelności obudowy klatki schodowej na rozkład różnicy ciśnień między klatką a przestrzenią objętą pożarem przeprowadzono testy napowietrzania w czterech konfiguracjach (Test 1-4). Przyjęto, że oczekiwana wartość nadciśnienia wytworzonego na klatce schodowej będzie

w warunkach stabilnych wynosiła 50 Pa. Wartość tę uzyskiwano automatycznie, za pomocą sterownika PLC z zaprogramowanym regulatorem PID. Należy podkreślić, że zastosowany w badaniach sterownik jest jednym z prostszych elektronicznych układów sterowania, a producenci systemów różnicowania ciśnień proponują rozwiązania z wykorzystaniem algorytmów adaptacyjnych, samouczących się lub predykcyjnych [15, 16]. Badane są również układy bazujące na regulatorach wykorzystujących wewnętrzny model matematyczny [17]. Przyszłością mogą okazać się systemy regulacji wykorzystujące sieci neuronowe i algorytmy genetyczne [18].

Podczas przeprowadzonych testów zbadano system różnicowania ciśnień o zmiennym wydatku wentylatora nawiewnego. Dodatkowo w przestrzeni chronionej zainstalowano wentylator wyciągowy, który został wykorzystany podczas Testu 4. Rozkład ciśnienia wynikający z różnej szczelności chronionego pomieszczenia przedstawiono na rysunku 4. W przypadku systemu szczelnego (Test 1) rozkład ciśnienia przedstawia linia pomarańczowa, systemu o średniej szczelności (Test 2) – linia zielona, a systemu o dużej powierzchni nieszczelności (Test 3) – linia żółta. W przypadku Testu 4 (linia niebieska), obudowa badanej klatki schodowej była szczelna, a powietrze z klatki schodowej usuwano z wykorzystaniem wentylatora wyciągowego.



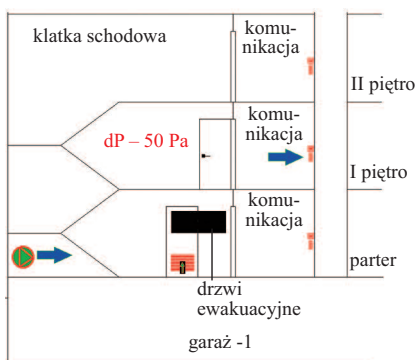
Rys. 4. Badanie laboratoryjne systemów napowietrzających o zmiennej wydajności w przypadku różnych poziomów rozszczelnienia obudowy klatki schodowej

Fig. 4. Laboratory test of variable capacity aeration systems for different levels of the staircase case unsealing

W stabilnym obszarze pomiarowym występuje niewielkie przekroczenie wartości granicznej różnicy ciśnień dla systemów o minimalnej (Test 1) i dużej powierzchni nieszczelności (Test 3) oraz w przypadku systemu szczelnego wspomaganego wentylatorem wyciągowym (Test 4). System szczelny (Test 1) charakteryzuje się również znacznym wydłużeniem czasu potrzebnego do osiągnięcia oczekiwanej różnicy ciśnień po zamknięciu drzwi. Wynika to z bardzo dużego ciśnienia szczytowego (ok. 100 Pa – linia pomarańczowa) oraz konieczności usunięcia powietrza z zamkniętego szczelnego pomieszczenia, co wymaga zastosowania skutecznego hamulca w układzie falownika. W przypadku systemu wspomaganego wentylatorem można zauważyć, że mimo szybkiej reakcji systemu na zamknięcie drzwi, po ok. 5 s nastąpiło przeregulowanie nadciśnienia powyżej 55 Pa.

Weryfikacja badań laboratoryjnych w rzeczywistej klatce schodowej

Badania laboratoryjne opisane w [19] wykazały, że szczelna obudowa chronionej klatki schodowej jest przyczyną wydłużenia czasu reakcji systemu różnicowania ciśnień związanego z otwieraniem i zamykaniem drzwi w obszarze pionowej drogi ewakuacyjnej. W związku z uzyskanymi wynikami badań laboratoryjnych przeprowadzono dodatkowe eksperymenty w rzeczywistym trzykondygnacyjnym budynku mieszkalnym, z wewnętrzną klatką schodową. W badanym systemie różnicowania ciśnień wykorzystano regulator proporcjonalno-integralno-pochodny (PID). Badana instalacja różnicowania ciśnień została zainstalowana na klatce schodowej (rysunek 5) i była już dopuszczona do użytkowania przez odpowiednie służby, co ograniczyło możliwość jakiegokolwiek bezpośredniej ingerencji w system sterowania. Niedogodności te były okazją do sprawdzenia, jak działa w pełni sprawny system różnicowania ciśnień, wyposażony w standardowy system automatyki fabrycznej, po zmianie szczelności obudowy klatki schodowej.



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe w obiekcie rzeczywistym

Fig. 5. The experimental layout in real object

Na podstawie badań przeprowadzonych w laboratorium [19] zauważono, że w systemach różnicowania ciśnień, w których obudowa klatki schodowej była rozszczelniona, błąd regulacji systemu był niewielki. Inny korzystny efekt wzrostu nieszczelności, to krótki czas regulacji ciśnienia, co jest istotne podczas wystąpienia pożaru.

Wykorzystując (3) oraz wyniki badań uzyskane w laboratorium [19], wyznaczyliśmy teoretyczną wydajność wentylatora, przy której regulacja ciśnienia powinna być najbardziej efektywna. Próby zostały przeprowadzone w przypadku pięciu różnych wydatków nawiewu, przedstawionych w tabeli 2. Procedura testowa zakładała zmianę szczelności klatki schodowej. W tym celu przepustnicę wielopłaszczyznową zamontowano w ramie drzwi wyjściowych. Przecieki powstałe między płytą OSB a ościeżnicą zostały uszczelnione, aby ograniczyć dodatkowe wycieki z klatki schodowej podczas pomiaru (fotografia 2).

W celu utrzymania nadciśnienia 50 Pa na klatce schodowej, po zmianie szczelności obudowy pionowej drogi ewakuacyjnej za pomocą klapy rozszczelniającej, sterownik systemu zmienił objętość nawiewanego strumienia

Tabela 2. Wydajność pomiarowa

Table 2. Measurement capacity

Próba	In_{reg} [%]	V_{reg} [m ³ /h]
1	25% V_{max}	4000
2	50% V_{max}	8000
3	60% V_{max}	9600
4	70% V_{max}	11200
5	80% V_{max}	12800



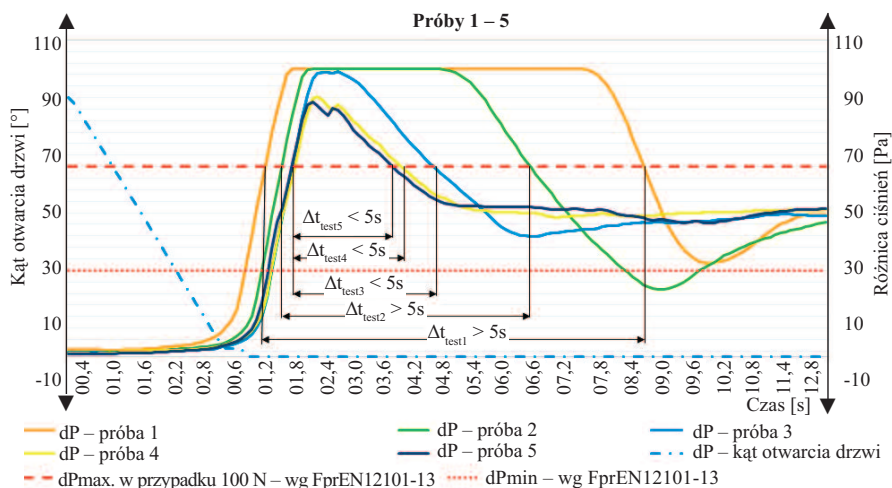
Fot. 2. Klapa rozszczelniająca w drzwiach zewnętrznych klatki

Photo 2. Throttle for leak change in outer door of the staircase

powietrza. Zgodnie z tabelą 1, w każdym punkcie pomiarowym klatka schodowa była nieszczelna w takim stopniu, że układ sterowania utrzymywał nadciśnienie 50 Pa dla określonej objętości strumienia powietrza. Po ustabilizowaniu się ciśnienia na klatce schodowej pomiar przeprowadzono wg schematu:

- 1) ręczne otwarcie drzwi w czasie ok. 3 s;
- 2) oczekiwanie na ustabilizowanie wydajności wentylatora;
- 3) swobodne zamykanie drzwi bez pomocy ręcznej.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów w obiekcie rzeczywistym potwierdzono, że zwiększona nieszczelność obudowy klatki schodowej może korzystnie wpływać na czas stabilizacji ciśnienia (rysunek 6). W próbach 1 i 2 (linia pomarańczowa i zielona) stwierdzono znaczny spadek ciśnienia podczas regulacji, co może powodować przenoszenie dymu w kierunku klatki schodowej. W próbach 3 i 4 (linia niebieska i żółta) sytuacja wyraźnie się poprawiła. Z drugiej strony, w przypadku próby 5 (linia granatowa) regulacja przy zamkniętych drzwiach była niestabilna. Zaobserwowano występowanie wartości granicznej równej ok. 60% wydajności nominalnej wentylatora nawiewnego, powyżej której następuje poprawa stabilizacji regulacji i skrócenie czasu osiągnięcia wymaganego nadciśnienia w klatce schodowej. Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano znaczną poprawę czasu regulacji nadciśnienia rów-



Rys. 6. Wykres porównawczy wyników pomiarów w obiekcie rzeczywistym
Fig. 6. Graph for measurement results in the real object

nego 50 Pa w obszarze 60 – 80% wydajności znamionowej wentylatora. W przypadku systemów szczelnych czas potrzebny do osiągnięcia regulacji ciśnienia był znacznie dłuższy.

Wnioski

W artykule przedstawiono nowe podejście do niepoprawnie działających systemów różnicowania ciśnień stosowanych do zabezpieczania przed zadymieniem klatek schodowych. Zamiast algorytmów obliczeniowych sterujących urządzeniami wentylacyjnymi zaproponowana została adaptacja nie szczelności klatki schodowej do zakresu pracy wentylatora napowietrzającego. Przedstawiono nowe podejście polegające na dodaniu dodatkowej nie szczelności w przestrzeni klatki schodowej w postaci klapy rozszielniającej montowanej w drzwiach klatki prowadzących na zewnątrz budynku.

Wyniki badań laboratoryjnych oraz w skali rzeczywistej potwierdziły pozytywny wpływ dodania nie szczelności na klatce schodowej na utrzymywane w niej nadciśnienie. Wykazano, że zastosowanie klapy rozszielniającej, pozwalającej zapewnić powierzchnię nie szczelności klatki schodowej na poziomie umożliwiającym uzyskanie nadciśnienia 50 Pa, przy wydajności wentylatora 60 – 80% jego wydatku znamionowego, spowodowało bardziej precyzyjną i zdecydowanie szybszą regulację nadciśnienia wytwarzanego w klatce schodowej. Atutem przedstawionego rozwiązania jest brak konieczności

zwiększania wydajności dobranej jednostki napowietrzającej, gdyż zaproponowana klapa rozszielniająca montowana jest w obrysie końcowych drzwi ewakuacyjnych, które podczas ewakuacji pozostają zwykle otwarte.

Należy wspomnieć, że wpływ wiatru może niekorzystnie oddziaływać na przedstawione rozwiązanie. Rozwarstwienie ciśnienia w obrębie pionowej drogi ewakuacyjnej spowodowane wiatrem jest cechą charakterystyczną systemów różnicowania ciśnień na klatkach schodowych. Dodatkowe otwarcie obudowy od strony drzwi ewakuacyjnych może wzmocnić niekorzystny efekt oddziaływania wiatru. Trzeba jednak podkreślić, że zastosowane przez nas rozwiązanie charakteryzuje się dużo większym strumieniem powietrza przepływającego przez klatkę schodową w przypadku kryterium nadciśnienia 50 Pa, w porównaniu z tradycyjnymi systemami nadciśnieniowymi, co w efekcie powinno zmniejszyć punktowy wzrost ciśnienia w obrębie klatki schodowej. Nie zostało to jednak potwierdzone badaniami.

Na podstawie przeprowadzonych badań zgłoszono dwa wnioski patentowe dotyczące zastosowania klapy do rozszielnienia obudowy pionowej drogi ewakuacyjnej oraz systemu regulowania ciśnienia na pionowych drogach ewakuacyjnych.

Literatura

[1] Brzezinska D, Fryda M. Implementation of new high-rise building staircase pressure differential system improvements. Build. Serv.

Eng. Res. Technol., no. September, 2021, doi: 10.1177/01436244211044669.

[2] Polska Norma PN-EN 12101-6 – Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła – Część 6: Wymagania techniczne dotyczące systemów ciśnieniowych – Zestawy urządzeń. 2007.

[3] Kosiorek M, Głąbski P. Projektowanie instalacji wentylacji pożarowej dróg ewakuacyjnych w budynkach wysokich i wysokościowych. Instr. ITB. 2002; 378.

[4] Standard NFPA Standard for Smoke Control Systems 2015 Edition. 2015.

[5] Standard European FprEN 12101-13: 2021 – Smoke and heat control systems – Part 13: Pressure differential systems (PDS) – Design and calculation methods, installation, acceptance testing, routine testing and maintenance Systèmes. 2021.

[6] Lay S. Pressurization systems do not work & present a risk to life safety. Case Stud. Fire Saf. 2014; 1 (1): 13 – 17, doi: 10.1016/j.csf.2013.12.001.

[7] Butcher EG, Fardell PJ, Clarke JJ. Pressurization as a means of controlling the movement of smoke and toxic gases on escape routes. Fire Saf. Sci. 1968; 704.

[8] Klote JH, Milke JA. Principles of Smoke Management. Cornstock, W. 2002.

[9] Standard European FprEN 12101-6:2021 – Smoke and heat control systems – Part 6: Specification for pressure differential systems – Kits. 2021.

[10] Hobson PJ, Stewart LJ. Pressurization of Escape Routes in Buildings. Fire Saf. Sci. 1972; 958.

[11] Tamura GT. Air Leakage Data for the Design of Elevator and Stair Shaft Pressurization Systems. ASHRAE Trans. 1976; 82 (2): 179 – 190.

[12] Shaw C, Tamura G. Design of a Stairshaft Pressurization System for Tall Buildings. ASHRAE J. 1976; 18 (2).

[13] Akizuki Y. Visibility and human behavior in fire smoke in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition. 2016.

[14] Klote JH. Flow of Air and Smoke, in Handbook of Smoke Control Engineering, W. Stephen Comstock. 2012: 107 – 136.

[15] Szałański P, Misiński J. Laboratory tests of overpressure differential systems for smoke protection of lobbies. E3S Web Conf., 2017; 22: 1 – 8, doi: 10.1051/e3sconf/20172200170.

[16] Wiche J, Majdański A. Pierwsze na świecie urządzenie wentylacyjne służące bezpieczeństwu ludzi z wykorzystaniem sztucznej inteligencji. Chłodnictwo & Klimatyzacja. 2012; 3: 42 – 44.

[17] Kula K, Pozorski K. Układ regulacji z modelem wewnętrznym sterującym obiektem nieliniowym. Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Autom. 2014; 40 (25): 65 – 68.

[18] Amin Rashidifar M, Abertavi A. A Novel Technique for Controller Tuning. Int. J. Appl. Control. Electr. Electron. Eng. 2014; 2 (2): 1 – 12.

[19] Fryda M, Brzezińska D, Dziubiński M. High rise buildings stairwells pressure differential systems tests and improvement solutions. Build. Serv. Eng. Res. Technol. 2021, doi: 10.1177/0143624420964313.

Przyjęto do druku: 30.06.2022 r.