

mgr inż. Arleta Bogustawska¹⁾

ORCID: 0000-0002-8771-3884

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

ORCID: 0000-0003-4615-4454

Przepływ powietrza w przestrzeni klatki schodowej w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego

The air flow through the staircase depending on the outside air temperature

DOI: 10.15199/33.2022.12.05

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentu w skali rzeczywistej dotyczącego przepływu powietrza wywołanego siłą ciągu naturalnego w przestrzeni klatki schodowej budynku średniowysokiego, zlokalizowanego na terenie Politechniki Łódzkiej. Badania były realizowane przez 6 miesięcy, co wynika z braku informacji literaturowych o zachowaniu się systemu w tak długim przedziale czasu. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że przez ok. 80% czasu w ciągu roku system oddymiania grawitacyjnego działa z odpowiednią wydajnością. Wyniki pomiarów zostały zweryfikowane z wykorzystaniem symulacji CFD.

Słowa kluczowe: grawitacyjny system oddymiania; klatka schodowa; kłapa dymowa; eksperyment w skali rzeczywistej; symulacja CFD.

Abstract. Article presents the results of a real-scale experiment for natural air flow in staircase space in medium-high building located on Lodz University of Technology Campus. The experiments were performed for six months. In literature data there is a lack of information about temporary air flow in such a long period time. On the basis of research results it has been found that natural smoke exhaust system works with sufficient capacity for almost 80% time in year. The experimental results were verified using CFD simulation.

Keywords: natural smoke exhaust system; staircase; smoke vent; real-scale experiment, CFD simulation.

Pionowe drogi komunikacji, do których należą m.in. klatki schodowe, stanowią w budynku podstawową drogę poruszania się pomiędzy kondygnacjami. W przypadku ewentualnego pożaru powinny nie tylko umożliwić bezpieczną ewakuację osób przebywających w budynku, ale również dojście służb ratowniczych do źródła pożaru. Te dwa czynniki sprawiają, że systemy wentylacji pożarowej, w tym oddymiające klatki schodowe odgrywają niezwykle istotną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa budynków. Podkreślają to m.in. Wytyczne Europejskie [1]. Konieczność wykonania i sposób realizacji wentylacji pożarowej w obrębie klatki schodowej w budynkach realizowanych w Polsce jest określony w Warunkach Technicznych [2]. W zależności od przeznaczenia i wysokości budynku klatka schodowa powinna zostać wyposażona w system oddymiania lub zabezpieczenia przed zadymieniem. W Polsce wymagane stosowania systemów oddymiania grawitacyj-

nego wynika z przepisów budowlanych, ale sposób ich obliczania nie jest jasno określony. W związku z tym projektanci tego typu systemów oddymiania mają do wyboru wytyczne krajowe (np. norma dotycząca oddymiania grawitacyjnego [3], Wytyczne CNBOP [4]) lub inne opracowane przez kraje europejskie [1, 5]. Algorytm wymiarowania systemów oddymiania grawitacyjnego w Europie bazuje przede wszystkim na wysokości i powierzchni rzutu poziomego klatki schodowej. Analizę porównawczą przedstawiono w artykule [6]. Wytyczne Europejskie CFPA [1] opisują dodatkowe ograniczenia, które należy uwzględnić w przypadku klatek schodowych o nieregularnych kształtach. Norma [3], która jest najczęściej stosowana w Polsce do obliczeń elementów składowych systemu oddymiania klatek schodowych, jest często krytykowana za przestarzałość, brak odniesienia do nowoczesnej architektury budynków oraz wymiarowanie systemu niezależne od potencjalnej wielkości pożaru i warunków pogodowych [7]. Szczegółowy algorytm obliczeń opracowany na podstawie różnych wytycznych stosowanych w Polsce przedstawiono w artyku-

le [8]. W tym artykule, omawiającym możliwą do osiągnięcia skuteczność systemów oddymiania grawitacyjnego, pominięto wpływ gorącego dymu i innych gazów pożarowych na naturalną konwekcję w przestrzeni klatki schodowej. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w początkowej fazie pożaru (okres, w którym odbywa się ewakuacja) ilość wytwarzanego dymu jest niewielka, a dodatkowo silnie schładzana przez zmieszanie z otaczającym powietrzem. Wzrost temperatury w przestrzeni klatki wynikający z napływu dymu może zwiększyć osiąganą wydajność systemu w porównaniu z uzyskanymi wynikami, przez zwiększenie różnicy pomiędzy temperaturą otoczenia a temperaturą w przestrzeni klatki schodowej.

Badania systemów wentylacji pożarowej prowadzone na świecie koncentrują się na budynkach wysokich [9, 10] i systemach nadciśnieniowego zabezpieczenia przed zadymieniem [11]. Natomiast systemy oddymiania grawitacyjnego są rzadko poddawane analizie i polega ona przede wszystkim na badaniach eksperymentalnych w małej skali [12] lub na modelach symulacyjnych [7, 9, 13]. Przeprowadzone badania skupiają się

¹⁾ Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

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

na wpływie wysokości budynku [1], wiatru [14] i efektu kominowego [13] na oddymianie.

Analiza działania ciągu kominowego prowadzona w długim okresie (6 miesięcy), uwzględniająca wpływ wiatru i innych czynników zewnętrznych oraz geometrię klatki schodowej, jest unikatowa. Tego typu badania nie zostały znalezione w dostępnej literaturze. Dane zebrane na podstawie przeprowadzonych pomiarów pozwalają ocenić możliwość skutecznego oddymiania klatki schodowej z wykorzystaniem systemu oddymiania grawitacyjnego. Do analizy porównawczej uzyskanych wyników z symulacją CFD wybrano pomiary rzeczywiste przy małej prędkości wiatru (mniejszej niż 0,5 m/s).

Skuteczność działania systemu oddymiania grawitacyjnego jest w dużym stopniu uzależniona od aktualnych warunków atmosferycznych, przede wszystkim temperatury powietrza zewnętrznego (temperatura powietrza wewnętrznego jest utrzymywana na relatywnie stałym poziomie w ciągu roku). W celu oceny systemów oddymiania grawitacyjnego w budynkach średniowysokich w różnych warunkach atmosferycznych przeprowadzono badania wydajności przepływu powietrza przez klapę. W pierwszej części artykułu został opisany mechanizm działania systemu oddymiania grawitacyjnego. Następnie przedstawiono uzyskane wyniki badań eksperymentalnych, model CFD oraz wnioski.

Systemy wentylacji oddymiającej

Zgodnie z Warunkami Technicznymi [2], konieczność zastosowania systemów oddymiania klatek schodowych jest uzależniona od typu i wysokości budynku. Budynki definiowane jako średniowysokie, a więc o wysokości od 12 do 25 m (zgodnie z [2]) są przedmiotem artykułu. Klatki schodowe w tego typu budynkach muszą być wyposażone w urządzenia zapobiegające zadymieniu lub służące do usuwania dymu [2].

Jak już zostało wcześniej wspomniane, w przypadku budynków średniowysokich przepisy dopuszczają również możliwość zastosowania systemu różnicowania ciśnienia lub systemu oddymiania z nawiewem mechanicznym, ale ze względu na zdecydowanie wyższe koszty inwesty-

cyjne i eksploatacyjne tego typu systemy są wybierane niezwykle rzadko.

W skład typowych systemów oddymiania grawitacyjnego wchodzi następujące elementy:

- **klapa dymowa** montowana w dachu budynku lub **okno oddymiające** w ścianie na najwyższej kondygnacji budynku, wyposażone w system automatycznego otwierania;
- **drzwi wejściowe na klatkę schodową lub okno w ścianie na parterze** do nawiewu kompensacyjnego;
- **czujniki dymu** umieszczone pod sufitem na każdym piętrze, do wykrywania dymu i aktywacji alarmu przeciwpożarowego;
- **ręczne przyciski oddymiania**;
- **samozamykacze w drzwiach wychodzących na klatkę schodową**, ograniczające rozprzestrzenianie się dymu.

Eksperyment w skali rzeczywistej

Do oceny skuteczności działania systemu oddymiania grawitacyjnego w różnych warunkach atmosferycznych przeprowadzono eksperyment w skali rzeczywistej. Został on przeprowadzony w budynku Politechniki Łódzkiej – LabFactor (budynek A1) – o wysokości 19,8 m, który zgodnie z Warunkami Technicznymi [2] należy do grupy budynków średniowysokich (< 25 m). Podczas badań były automatycznie rejestrowane i zapisywane wartości temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego oraz prędkość przepływu powietrza w świetle klapy dymowej.

Pomiary temperatury i ciśnienia wykonywano wg standardów opisanych np. w monografii [15], a strumienia objętości powietrza przez kanały niekołowe zgodnie z normą [16].

Aparatura pomiarowa została zamontowana w obrębie klatki schodowej działającego obiektu, co generowało ograniczenia dotyczące usytuowania przyrządów pomiarowych, tzn. żadne z zamontowanych urządzeń nie mogło ograniczać funkcjonalności klatki schodowej. W związku z tym zrezygnowano z pomiaru temperatury w świetle drzwi zewnętrznych i strumienia objętości powietrza przepływającego przez drzwi zewnętrzne. Brak możliwości pomiaru strumienia powietrza wpływającego do

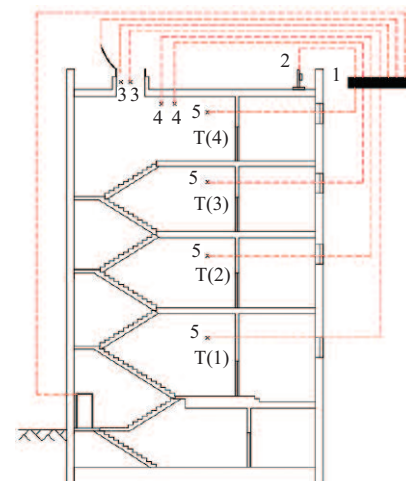
przestrzeni klatki schodowej sprawił, że przyjęto, zgodnie z równaniem ciągłości, że strumień objętości powietrza wpływającego przez otwarte drzwi jest równy strumieniowi objętości powietrza przepływającego przez klapę dymową.

Stanowisko pomiarowe składało się z następujących elementów:

- sterownika swobodnie programowalnego, realizującego cyfrową akwizycję danych pomiarowych i sterującego układem otwierania i zamykania klapy dymowej oraz drzwi zewnętrznych w zadanych przedziałach czasowych;
- czujnika wiatr-deszcz, zlokalizowanego na dachu budynku;
- czujnika prędkości i temperatury powietrza (2 szt.), zlokalizowanego w świetle klapy dymowej;
- czujnika ciśnienia różnicowego powietrza na wylocie klapy;
- termometrów rezystancyjnych, zlokalizowanych pod stropem każdej kondygnacji, w przestrzeni biegu schodów.

Uproszczony schemat stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1.

W celu uzyskania statystycznej wiarygodności badań i zróżnicowania temperatury zewnętrznej pomiaru wykonywano



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego w przestrzeni klatki schodowej: 1 – sterownik swobodnie programowalny; 2 – czujnik wiatr-deszcz; 3 – czujnik prędkości i temperatury powietrza; 4 – czujnik ciśnienia różnicowego powietrza; 5 – termometr rezystancyjny

Fig. 1. Scheme of the measuring station in the analysed staircase: 1 – free-programmable controller; 2 – wind-rain sensor; 3 – airspeed and temperature sensor; 4 – air differential pressure sensor; 5 – resistance thermometer

dwa razy dziennie (o godzinie 3.00 oraz 15.00) przez 6 miesięcy (od lutego do lipca 2019 r.). Zgodnie z danymi statystycznymi, w wybranych godzinach obserwuje się najwyższą temperaturę w ciągu dnia oraz najniższą w porze nocnej [17].

Wyniki badań w skali rzeczywistej

Badania konwekcji naturalnej w przestrzeni klatki schodowej były realizowane, jak już wspomniano, w różnej temperaturze powietrza zewnętrznego zarówno w okresie letnim, jak i zimowym. Skrajne wartości temperatury zarejestrowane w czasie badań wynosiły odpowiednio $+35,4^{\circ}\text{C}$ oraz $-2,0^{\circ}\text{C}$.

Zmienność temperatury powietrza wewnętrznego. Temperatura powietrza w przestrzeni klatki schodowej w okresie zimowym była utrzymywana na względnie stałym poziomie ok. 20°C z wykorzystaniem instalacji ogrzewania (grzejników płytowych zlokalizowanych na spocznikach). W okresie letnim temperatura powietrza nie była regulowana i wynosiła w zależności od aktualnych warunków pogodowych $21 - 27^{\circ}\text{C}$.

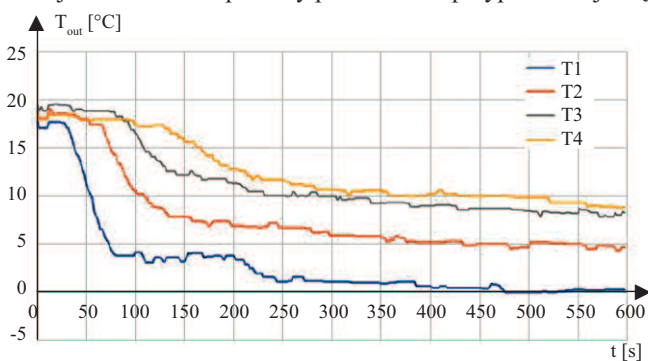
W czasie eksperymentu, po otwarciu drzwi zewnętrznych i klapy dymowej, następowała stopniowa zmiana temperatury w przestrzeni klatki schodowej wraz z napływem powietrza zewnętrznego. Prezentowane zmiany temperatury powietrza wewnętrznego obejmują okres pojedynczego pomiaru wynoszący 10 min. Rysunek 2 przedstawia zmiany temperatury powietrza wewnętrznego w przypadku poszczególnych czujników w okresie zimowym przy temperaturze powietrza zewnętrznego $T_{\text{out}} = -2,0^{\circ}\text{C}$. Była to najmniejsza wartość temperatury powietrza

zewnętrznego zarejestrowana w czasie półrocznych pomiarów. Jak można zauważyć, początkowa temperatura powietrza w przestrzeni klatki schodowej wynosiła, w zależności od lokalizacji czujnika, $T_{\text{in}} = 18,7 - 20,2^{\circ}\text{C}$. Najniższa wartość została pomierzona pod stropem parteru (czujnik T1), a najwyższa pod stropem kondygnacji +2 (czujnik T3).

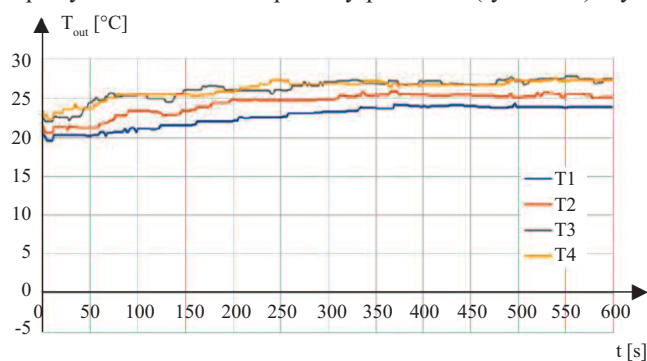
Rysunek 3 przedstawia stopniową zmianę temperatury powietrza zewnętrznego w okresie letnim przy temperaturze powietrza zewnętrznego $35,4^{\circ}\text{C}$ (najwyższa pomierzona wartość temperatury powietrza zewnętrznego). Początkowa temperatura powietrza w przestrzeni klatki schodowej wynosiła $20,5 - 23,3^{\circ}\text{C}$. Najniższa temperatura, podobnie jak w okresie zimowym, została pomierzona pod stropem parteru (czujnik T1), a najwyższa pod stropem kondygnacji +3 (czujnik T4).

Z rysunku 2 wynika, że temperatura powietrza wewnętrznego po otwarciu klapy w okresie zimowym ulega stopniowemu zmniejszeniu, przy czym w pierwszej kolejności obniża się temperatura powietrza rejestrowana przez czujnik zlokalizowany najniżej (najbliżej drzwi zewnętrznych – otworu wlotowego). W następnej kolejności otwarcie drzwi wpływa na czujniki zlokalizowane na kolejnych kondygnacjach.

W okresie letnim, co widać na rysunku 3, uruchomienie systemu wywołuje stopniowy wzrost temperatury powietrza wewnętrznego. Podobnie jak w okresie zimowym, w pierwszej kolejności zmiana temperatury jest zauważana we wskazaniach czujników zlokalizowanych najbliżej otworu wlotowego, którym w tym przypadku staje się kłapa dymowa.



Rys. 2. Zmienność temperatury powietrza w przestrzeni klatki schodowej podczas pojedynczego pomiaru w okresie zimowym (23 lutego 2019)
Fig. 2. The air temperature variability in the staircase during a single measurement in winter time (23 February 2019)



Rys. 3. Zmienność temperatury powietrza w przestrzeni klatki schodowej podczas pojedynczego pomiaru w okresie letnim (30 lipca 2019)
Fig. 3. The air temperature variability in the staircase during a single measurement in summer time (30 June 2019)

Symulacja CFD

Dobór rozdzielczości siatki obliczeniowej. Po przygotowaniu modelu klatki schodowej będącej przedmiotem badań w pierwszej kolejności zweryfikowano wymaganą rozdzielczość siatki obliczeniowej. Przy wyborze siatki wzięto pod uwagę czas symulacji oraz odwzorowanie klatki schodowej w modelu. Biorąc pod uwagę wszystkie omawiane czynniki, w dalszych analizach przyjęto wielkość komórki siatki obliczeniowej równą 18 cm .

Warunki brzegowe symulacji. Symulacje przepływu powietrza przez wybraną geometrię klatki schodowej zostały przygotowane w programie symulacyjnym FDS (*Fire Dynamics Simulator* 6.7.6) z nakładką graficzną PyroSim v. 2021.3.0901.

Model symulacyjny klatki schodowej obejmuje jej przestrzeń wewnętrzną wraz z najbliższym otoczeniem, z uwzględnieniem naturalnych przeszkód, takich jak schody, spoczniki, ściany i drzwi. Analogicznie, jak w badanej klatce schodowej, przepływ powietrza był realizowany po „automatycznym” otwarciu drzwi zewnętrznych oraz klapy dymowej. Przyjęto następującą temperaturę powietrza zewnętrznego i wewnętrznego:

- $T_{\text{out}} = -2,0^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{in}} = +20,0^{\circ}\text{C}$;
- $T_{\text{out}} = +35,4^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{in}} = +21,5^{\circ}\text{C}$.

Wyniki symulacji CFD

Uzyskane wyniki symulacji CFD porównano z wynikami uzyskanymi w trakcie badań na obiekcie rzeczywistym. Do porównania wykorzystano płaszczyzny pomiarowe zlokalizowane w przybliżeniu w miejscu montażu czujników temperatury powietrza (rysunek 1). Sy-

mulacje zostały przeprowadzone w przypadku temperatury powietrza zewnętrznego $-2,0^{\circ}\text{C}$ i $35,4^{\circ}\text{C}$ (tabela).

W temperaturze zewnętrznej -2°C (okres zimowy) otwarcie drzwi wewnętrznych i kłapy dymowej (uruchomienie systemu oddymiania) powoduje stopniowe ochładzanie się przestrzeni klatki schodowej. System uruchomiony w okresach, gdy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa niż wewnętrzne, powoduje stopniowe unoszenie się ciepłego powietrza wypełniającego klatkę schodową i wydostawanie się przez otwartą klapę dymową. Największa zmiana temperatury wewnętrznej następuje po ok. dwóch minutach (przy $T_{\text{out}} = -2,0^{\circ}\text{C}$), gdy napływające chłodne powietrze dociera do górnej części klatki schodowej. Jak łatwo zauważyć, im niższa temperatura zewnętrzna (większa różnica temperatury powietrza zewnętrzne – powietrze wewnętrzne) wpływ ciepłego powietrza z przestrzeni klatki schodowej jest bardziej intensywny.

W okresie letnim ($T_{\text{out}} = 35,4^{\circ}\text{C}$) ciepłe powietrze z zewnątrz napływa do klatki schodowej przez otwartą klapę dymową i stopniowo opada w dół, w kierunku drzwi zewnętrznych.

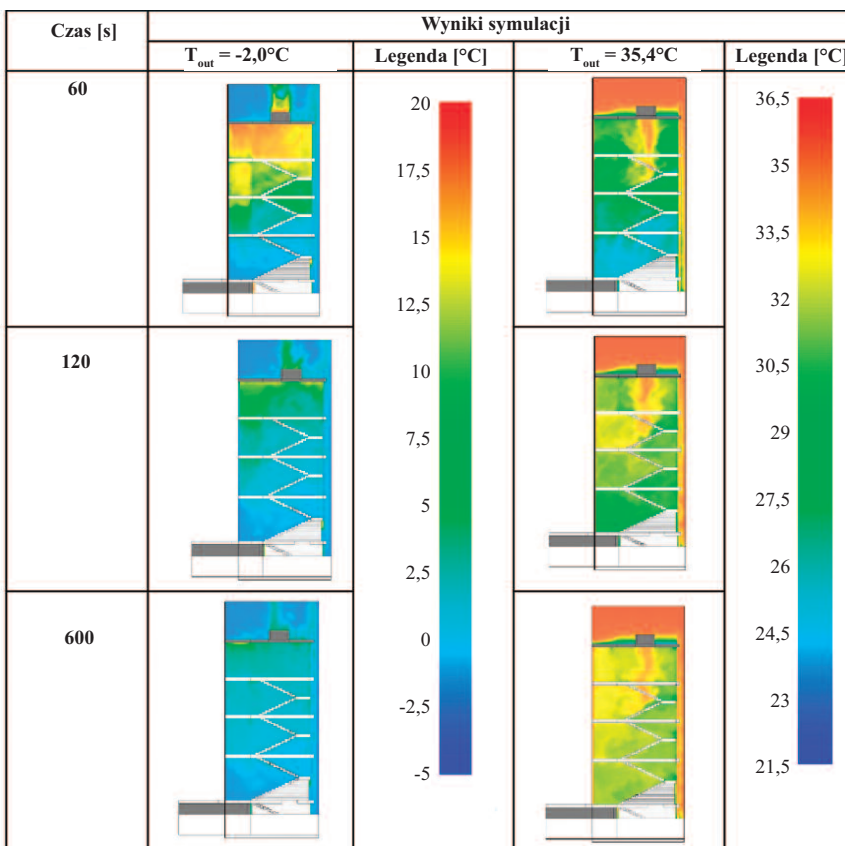
Analiza porównawcza zmienności temperatury w okresie zimowym i letnim (tabela) pokazuje, że charakter napływu powietrza zewnętrznego w okresie letnim i zimowym jest inny. Zimą powietrze zewnątrz stopniowo oddziałuje na temperaturę powietrza na kolejnych kondygnacjach, napełniając stopniowo chłodnym powietrzem przestrzeń klatki schodowej. W okresie letnim ciepłe powietrze „wpada” do budynku pionowo w dół i szybko oddziałuje na temperaturę na wszystkich kondygnacjach analizowanego budynku.

Prędkość powietrza w przestrzeni klatki schodowej uzyskana w wyniku pomiarów i symulacji CFD

Porównanie wyników pomiaru przepływu powietrza przez klatkę schodową uzyskanych podczas badań rzeczywistych oraz z wykorzystaniem symulacji CFD dotyczyło prędkości przepływu powietrza w świetle kłapy dymowej. Uzyskane wyniki przedstawiono na ry-

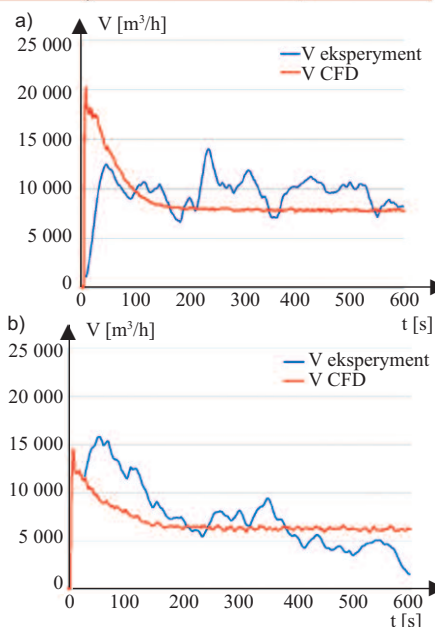
Przebieg zmienności temperatury powietrza wewnętrznego w przestrzeni klatki schodowej w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego

Variation in air temperature distribution in the staircase space depending on the outside temperature



sunku 4. Dane eksperymentalne uzyskano, wykorzystując metodę średniej kroczącej. Przyjęto krok 10 w przypadku temperatury powietrza zewnętrznego $T_{\text{out}} = -2,0^{\circ}\text{C}$ oraz 30 dla $T_{\text{out}} = 35,4^{\circ}\text{C}$.

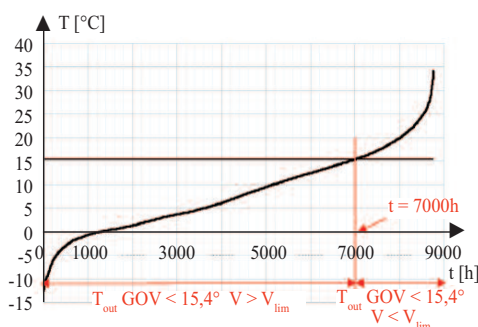
Z rysunku 4 wynika, że chwilowe wahania prędkości powietrza przepływającego przez klapę dymową są wyższe na podstawie pomiarów niż w symulacji CFD. Miało na to wpływ wiele uproszczeń zastosowanych w modelu CFD, do których należy m.in. nieuwzględnienie wiatru, promieniowania cieplnego i lokalnych turbulencji powietrza. Różnica pomiędzy średnią prędkością powietrza przepływającego w przestrzeni klatki schodowej, na podstawie wyników badań i symulacji CFD, nie przekracza 20%. Duża zgodność uzyskanych wyników (symulacji i pomiarów na obiekcie rzeczywistym) umożliwia wykorzystanie modeli symulacyjnych CFD do określenia potencjału systemu oddymiania grawitacyjnego do usuwania dymu z przestrzeni klatki schodowej o dowolnej geometrii.



Rys. 4. Prędkość powietrza w świetle kłapy dymowej na podstawie pomiarów i symulacji CFD przy temperaturze powietrza zewnętrznego: a) $T_{\text{out}} = -2,0^{\circ}\text{C}$; b) $T_{\text{out}} = 35,4^{\circ}\text{C}$
Fig. 4. The air velocity flowing through the smoke damper based on measurements and CFD simulation results for outdoor air temperature: a) $T_{\text{out}} = -2,0^{\circ}\text{C}$; b) $T_{\text{out}} = 35,4^{\circ}\text{C}$

Efektywność systemów oddymiania grawitacyjnego

Do oceny efektywności systemów oddymiania wykorzystano wykres zmienności temperatury powietrza zewnętrznego. W celu uzyskania uogólnionych wyników przygotowano uszeregowany wykres temperatury powietrza zewnętrznego na podstawie bazy danych klimatycznych Łodzi opublikowanej przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju (rysunek 5). Wartości na osi X określają liczbę godzin w ciągu roku o danej wartości temperatury powietrza zewnętrznego, która jest widoczna na osi Y.



Rys. 5. Dystrybucja temperatury powietrza zewnętrznego w przypadku Łodzi na podstawie rządowej bazy danych

Fig. 5. Line graph of measurements outdoor air temperature for Lodz based on the government database

W kolejnym kroku określono strumień objętości powietrza przepływającego przez klapę dymową na podstawie różnicy temperatury zewnętrznej i wewnętrznej. Analizę wydajności przeprowadzono na podstawie wyników uzyskanych podczas symulacji CFD dla kilku wartości temperatury powietrza zewnętrznego. Rozbieżności pomiędzy danymi eksperymentalnymi a wynikami symulacji CFD nie przekraczały 20%.

Przyjęto, że system oddymiania grawitacyjnego powinien zapewnić co najmniej 10-krotną wymianę powietrza w ciągu godziny, analogicznie jak w Normie Brytyjskiej [18]. Objętość analizowanej klatki schodowej wynosi ok. 510 m³, a zatem minimalny strumień objętości powietrza w systemie oddymiania został określony na poziomie $V_{lim} = 5100 \text{ m}^3/\text{h}$.

W badaniach eksperymentalnych, na podstawie analizy całej bazy naszych danych, taki strumień objętości powietrza został uzyskany przy różnicy temperatury powietrza zewnętrznego – powietrze we-

wnętrzne $\Delta T = -4,6^\circ\text{C}$ ($T_{out} - T_{in} = 15,4 - 20,0^\circ\text{C}$). W przypadku analizowanych danych klimatycznych, temperatura powietrza zewnętrznego była wyższa od 15,4°C dla 1760 godzin w ciągu roku (rysunek 5). Oznacza to, że system oddymiania grawitacyjnego nie działa z założoną skutecznością ($T_{out} > T_{out\ lim} = 15,4^\circ\text{C}$) przez 20% czasu w ciągu roku. Im niższa temperatura powietrza w pozostałym okresie, tym silniejszy efekt kominowy, a tym samym krotność wymiany powietrza uzyskiwana po uruchomieniu systemu oddymiania jest wyższa niż 10 wymian na godzinę. Należy mieć świadomość, że przyjęcie innych danych klimatycznych będzie generowało uzyskanie innego czasu działania systemu z wymaganą wydajnością.

Wnioski

Systemy oddymiania grawitacyjnego są najczęściej stosowane do ochrony pionowych dróg ewakuacyjnych w budynkach średniowysokich i niskich. Ich poprawne działanie jest niezbędne do skutecznego usuwania dymu i innych gazów pożarowych w sytuacji zagrożenia. Na podstawie przeprowadzonych analiz danych eksperymentalnych i wyników symulacji CFD stwierdzono, że skuteczność systemu jest silnie uzależniona od chwilowych warunków atmosferycznych, przy czym główny czynnik warunkujący jego działanie stanowi różnica temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego.

Przeprowadzone badania pozwoliły określić orientacyjny przedział czasu, w którym system oddymiania grawitacyjnego może działać prawidłowo. Na podstawie przyjętego kryterium odniesienia, jakim był przepływ powietrza przez klatkę o wydajności 10 wymian na godzinę, określono, że jest to niemal 80% czasu, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa niż założona $T_{out\ lim} = 15,4^\circ\text{C}$.

Wybór systemu oddymiania grawitacyjnego może być atrakcyjny dla inwestorów ze względu na niewielkie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Ponadto, brak dodatkowych urządzeń sterujących i regulujących przepływ powietrza w porównaniu z systemami wyposażonymi w urządzenia mechaniczne zwiększa niezawodność zadzia-

łania tego systemu. Podejmując decyzję o wyborze systemu oddymiania, należy mieć jednak świadomość, że system grawitacyjny może nie działać prawidłowo przez 20% czasu w ciągu roku. Ocena ryzyka w przypadku każdego z projektowanych budynków należy do inwestora oraz zespołu projektantów.

Literatura

- [1] CFPA-E No 2X: 201X F Smoke and Heat Exhaust Ventilation Systems Planning and Design.
- [2] Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2012 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 75 poz. 690 wraz z późniejszymi zmianami),” Apr. 2012.
- [3] PN-B-02877-4 Ochrona przeciwpożarowa budynków. Instalacje grawitacyjne do odprowadzania dymu i ciepła. Zasady projektowania.
- [4] Wytyczne CNBOP Systemy oddymiania klatek schodowych. May 2019.
- [5] Wytyczne VdS 2221: 2001-08 (01) Urządzenia do oddymiania klatek schodowych. Projektowanie i instalowanie. 2001.
- [6] Smardz P. Wentylacja pożarowa klatek schodowych w Europie. Ochrona Przeciwożarowa. 2017; 2.
- [7] Wnęk W. i in. Analiza możliwości zastosowania mechanicznego nawiewu kompensacyjnego w systemach grawitacyjnego usuwania dymu z klatek schodowych. Zeszyty Naukowe SGSP. 2012; 44.
- [8] Bogusławska ABD. Systemy wentylacji pożarowej klatek schodowych. Instal. 2017; 12: 30 – 36.
- [9] Tarek B, Bart M, Guoxiang Z. Study of FDS simulations of buoyant fire-induced smoke movement in a high-rise building stairwell. Fire Safety Journal. 2017; 91: 276 – 283.
- [10] Lim H, Seo J, Song D, Yoon S, Kim J. Interaction analysis of countermeasures for the stack effect in a high-rise office building. Building and Environment. 2020; DOI: 10.1016/j.buildenv. 2019.106530.
- [11] Kubicki G, Cisek M. How to Protect Staircases in Case of Fire in Mid-Rise Buildings. Real Scale Fire Tests. Safety & Fire Technology. 2019; DOI: 10.12845/sft.54.2.2019.1.
- [12] Shi WX at all. Influence of fire power and window position on smoke movement mechanisms and temperature distribution in an emergency staircase. Energy and Buildings. 2014; 79: 132 – 142.
- [13] Peppes AA, Santamouris M, Asimakopoulos DN. Buoyancy-driven flow through a stairwell. 2001, [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/buildenv.
- [14] Chow WK. Wind Effects on Performance of Static Smoke Exhaust Systems: Horizontal Ceiling Vents, ASHRAE. 2004; 479 – 488.
- [15] Fodemski TR i in. Pomiary cieplne cz. 1 i cz. 2. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. 1993.
- [16] PN-EN 12599:2013-04 Wentylacja budynków – Procedury badań i metody pomiarowe stosowane podczas odbioru instalacji wentylacji i klimatyzacji.
- [17] Recknagel H, Spranger E i in. Kompendium wiedzy ogrzewnictwo klimatyzacja ciepła woda chłodnictwo. Wrocław: Omni Scala sp. z o.o. 2008.
- [18] BS 7346-7:2013 Components for smoke and heat control systems. Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks.

Przyjęto do druku: 07.11.2022 r.