

Prof. dr hab. inż.

Poznań, 24.04.2020r.

**Edward SZCZECHOWIAK**

Politechnika Poznańska

Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych

ZAKŁAD OGRZEWNICTWA, KLIMATYZACJI I OCHRONY POWIETRZA

61-131 POZNAŃ, ul. Berdychowo 4

tel. (061) 66 52 533, 438

E-MAIL: office\_ee@put.poznan.pl

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Izabeli TEKIELAK-SKAŁKA  
pt. *“Badanie oporów przepływu powietrza w wydzielonych pożarowo klatkach schodowych  
podczas działania wentylacji pożarowej”*

Promotor: prof. dr hab. inż. Bogdan MIZIELIŃSKI,

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Kubicki

### Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka w Politechnice Warszawskiej (pismo RND-IŚGiE-16/2020)

### Ogólna ocena tematyki pracy

Praca doktorska pt. *„Badanie oporów przepływu powietrza w wydzielonych pożarowo klatkach schodowych podczas działania wentylacji pożarowej”* napisana w roku 2020, zawiera 169 stron (format B5) wraz ze spisem literatury, spisem treści i oznaczeniami oraz 1 załącznik z tabelami pomiarowymi Z1-Z36 (36 stron). Tekst zasadniczy pracy podzielono na osiem rozdziałów + podsumowanie i literaturę. Zamieszczony spis literatury zawiera 71 pozycji + 12 norm i wytycznych. Pozycje literatury są głównie z ostatnich 20 lat, w tym 29 w języku angielskim. Należy nadmienić, że 5 cytowanych publikacji jest doktorantki – jako współautorskie.

Problematyka analizowana w pracy dotyczy wentylacji pożarowej budynków, a w szczególności wydzielonych pożarowo klatek schodowych i występujących w nich zjawisk przepływowych w czasie pożaru. W budynkach wysokich i wysokościowych, gdzie wysokość klatki schodowej przekracza często 100 a nawet 200 m, przepływ powietrza lub powietrza z dymem jest dość złożony, gdyż zależy od geometrii klatki schodowej, oddziaływania dymu (w przypadku oddymiania), wpływu nieszczelności lub projektowanych upustów oraz ciągu kominowego. Te elementy były przedmiotem analiz numerycznych i doświadczalnych w niniejszej dysertacji.

Podjęta tematyka jest aktualna i ważna, gdyż wpisuje się w ogólny kierunek poprawy bezpieczeństwa pożarowego budynków, szczególnie wysokich i wysokościowych, a takich budynków powstaje coraz więcej na świecie i również w Polsce. Wyniki pracy mogą wpłynąć na poprawę procedur projektowych wentylacji pożarowej i testowanie powykonawcze tych układów i mieści się w obszarze dyscypliny naukowej: *Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

## Charakterystyka merytoryczna pracy

Na początku pracy we wstępie (rozdział 1) wprowadzono w problematykę bezpieczeństwa pożarowego budynków i szczególnego znaczenia klatek schodowych i szybów wind, które otwierają w pionie budynek. Biernie ich zabezpieczenie nie wystarcza, należy stosować zabezpieczenia czynne w postaci wentylacji pożarowej tych komponentów budynku. Zwrócono uwagę na znaczenie ciągu kominowego oraz spadku ciśnienia na długości wysokich klatek schodowych. Analiza literatury na temat strat ciśnienia w klatkach schodowych wykazała, że są tam informacje dość ubogie i wymagające rozszerzenia. Stąd Autorka zajęła się szerzej tym tematem.

W rozdziale 2 na tle istniejącego stanu wiedzy scharakteryzowano obszar badań. Omówiono ogólnie znaczenie schodów i klatek schodowych, podano wymagania geometryczne dla klatek schodowych wg przepisów, szczególnie w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych i użyteczności publicznej. Następnie omówiono zasady określania oporów przepływu z ukierunkowaniem na klatki schodowe. Omówiono złożoność przepływu i oporów przepływu oraz czynniki wpływające na rozkład ciśnienia w klatkach schodowych, w tym parcie i ssanie wiatru oraz wpływ efektu kominowego (w tym rozprężanie gazów pożarowych).

W dalszej części omówiono systemy wentylacji pożarowej w kontekście klatek schodowych. Istnieją dwa podstawowe rozwiązania: system oddymiania klatek schodowych i system zapobiegania zadymieniu klatek schodowych. Omówiono stan badań w tym zakresie, zwracając szczególną uwagę na wpływ oporów przepływu na funkcjonowanie systemów wentylacji pożarowej w klatkach schodowych.

W konkluzji Autorka stwierdza, że opory przepływu w połączeniu z innymi czynnikami zakłócającymi, mogą w istotny sposób wpływać na końcowy wynik nadciśnienia. Do tej pory opory przepływu w klatkach schodowych nie zostały wystarczająco przebadane i wymaga to dalszych badań, co podjęto w tej pracy.

W rozdziale 3 sformułowano tezę pracy: a) przepływ powietrza i dymu w wydzielonej pożarowo klatce schodowej generuje opory, których wartość jest proporcjonalna do przepływu i geometrii wewnętrznej tej przestrzeni; b). korelacja intensywności nawiewu pożarowego z oporami przepływu uzależnionymi od konstrukcji klatki schodowej ma znaczenie dla faktycznej skuteczności oddymiania lub zabezpieczenia nadciśnieniowego – szczególnie dla klatek schodowych o znacznej wysokości.

W rozdziale 4 sformułowano cel i zakres pracy. W pracy określono straty ciśnienia jakie występują w klatce schodowej w wyniku przepływu powietrza lub powietrza z dymem. Badania doświadczalne wykonano zarówno na modelu klatki schodowej wykonanej w skali, jak również przeprowadzono liczne badania numeryczne, które pozwoliły na rozszerzenie zakresu badań o inne geometrie klatek schodowych.

W rozdziale 5 omówiono metodologię badań zarówno numerycznych jak i doświadczalnych. Badania przeprowadzono w skali, co wymagało spełnienia warunków badań na modelu, tzw. liczb podobieństwa geometrycznego i liczb Reynoldsa, Frouda i Webera. W tym przypadku uwzględniono liczby o największym udziale na przebieg zjawiska przepływu tj. podobieństwo geometryczne i liczbę Reynoldsa, co wydaje się słuszne. W dalszej części omówiono zasady przeprowadzania obliczeń numerycznych, tzw. symulacje CFD, wykorzystywane w zagadnieniach wentylacji pożarowej. Omówiono podstawowe równania różniczkowe: zachowania masy, zachowania pędu oraz zachowania energii, tworzenie siatek obliczeniowych i przyjęte modele turbulencji.

W następnym rozdziale 6 przedstawiono badania przepływu w klatce schodowej na modelu w skali 1:10. Model odwzorowywał klatkę o jednej wysokości 25,0 m (w modelu 2,5 m). Badano 3 wersje rozwiązania poręczy: bez poręczy, z poręczami pełnymi i

poręczami ażurowymi. Pomiar ciśnienia przeprowadzono w trzech miejscach w pionie (P1, P2, P3). Pomiary prowadzono w sposób ciągły następujących parametrów: pomiar ciśnienia różnicowego w klatce schodowej, pomiar spiętrzenia na kryzie pomiarowej przepływu powietrza, pomiar ciśnienia barometrycznego, pomiar temperatury i wilgotności powietrza. Wyniki pomiarów zbierano przez multiplexer podłączony do komputera z oprogramowaniem ADAMview firmy ADVANTECH. Wyniki były uśredniane z przedziałów czasowych co 60 s. Należy podkreślić, że model klatki schodowej był umieszczony w pozycji poziomej (co eliminowało wpływ sił wyporu termicznego).

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych przedstawiono w tabl. 12-14 i na wykresach 6-9 – przy zmiennym przepływie powietrza i dla trzech układów poręczy. Uzyskane wyniki spadku ciśnienia mają przebieg w przybliżeniu kwadratowy w funkcji prędkości przepływu. A różnice uzyskanych wyników dla różnych rodzajów poręczy (bez poręczy, pełna i ażurowa) nie są duże (wykres 9).

W dalszej części pracy (rozdział 7) przedstawiono analizy oporów przepływu powietrza w klatkach schodowych uzyskane za pomocą symulacji CFD (oprogramowanie ANSYS Fluent). W analizie numerycznej uwzględniono większą liczbę przypadków niż w badaniach doświadczalnych, mianowicie: cztery szerokości biegu schodów, 3 szerokości duszy pomiędzy schodami i 4 wysokości kondygnacji – co daje łącznie 64 przypadki. W każdym modelu klatka schodowa miała 10 kondygnacji. Jak wynika z tekstu (str. 93) – przyjęto model turbulencji k- $\epsilon$ , przepływ powietrza od dołu do góry, analizę wykonano dla stanu ustalonego. Wyniki obliczeń numerycznych umieszczono w tabl. 17 – straty ciśnienia dla jednej kondygnacji od wysokości klatki, prędkości przepływu i szerokości duszy, natomiast w tabl. 18 – zamieszczono współczynnik oporów klatki schodowej zależny od tych samych zmiennych.

W dalszej części tego rozdziału (p. 7.3) przedstawiono analizę na podstawie badań numerycznych dla klatek schodowych o różnej geometrii (trzy wysokości, trzy szerokości dusz i cztery szerokości biegu schodów). Wyniki strat ciśnienia zestawiono w tabl. 19 i na wykresie 12 – zależnie od wysokości kondygnacji oraz wykresie 13 – zależnie od szerokości duszy. Po analizie wyników obliczeń numerycznych Autorka wykazuje, że współczynnik oporów  $K_{sw}$  zależy od szerokości schodów, szerokości spoczników i wysokości klatki schodowej i można go opisać zależnością funkcyjną (wzory 51 i 52). Przebieg zależności  $K_{sw}$  od parametru  $x$  pokazano na wykresie 14. W dalszej części porównano wyniki badań doświadczalnych z wynikami analizy numerycznej. W tym przypadku obliczenia numeryczne wykonano dla geometrii modelu doświadczalnego (skala 1:10) ale również dla wymiarów rzeczywistych (skala 1:1). Porównanie wyników pomiarów strat ciśnienia z wynikami obliczeń numerycznymi wykazuje, że wartości uzyskane z pomiarów są wyższe o 9,6 do 21% w porównaniu z wynikami obliczeń, natomiast skala modelu w obliczeniach numerycznych nie ma praktycznie wpływu na wyniki obliczeń numerycznych.

W rozdziale 8 wskazano na praktyczne zastosowanie wyników badań do projektowania instalacji wentylacji pożarowej klatek schodowych. Omówiono procedurę postępowania i algorytm obliczeń. Zamieszczono również przykład obliczeniowy dla konkretnej klatki schodowej w budynku o 21 kondygnacjach wraz z wynikami obliczeń (tablica 25 i 26 oraz wykres 18).

Rozdział 9 podsumowanie i wnioski końcowe. Efektem pracy jest określenie funkcji opisującej zależność wartości współczynnika oporów  $K_{sw}$  od wymiarów geometrycznych klatki schodowej, natomiast prędkość przepływu powietrza nie ma praktycznie wpływu na wartość tego współczynnika.

## Ocena pracy

W moim przekonaniu postawiona teza, składająca się z dwóch części, została w wystarczającym stopniu udowodniona, chociaż zakres przebadanych wariantów, choć dość szeroki, nie pozwala na pełne uogólnienie. Z przeprowadzonego zakresu badań wynika, że opory przepływu w klatce schodowej zależą od prędkości przepływu i geometrii klatki schodowej – co jest słuszne, jednak wyniki uzyskano dla przepływu izotermicznego, a to ogranicza uogólnienie przy istnieniu wyporu termicznego.

Przyjęta w pracy koncepcja przeprowadzenia badań doświadczalnych na modelu w skali 1:10, a potem badań numerycznych również w skali 1:10 i 1:1 należy uznać za słuszną. Ogólna procedura prowadzenia badań doświadczalnych i numerycznych i ich zakres są poprawnie skonstruowane i mogą być wykorzystane w przyszłości do przeprowadzenia bardziej kompleksowych badań, z uwzględnieniem przepływów nieizotermicznych i z upustami np. w wyniku zadziałania przepustnic upustowych, klap transferowych lub otwarcia drzwi – co pozwoli na szersze uogólnienia.

Praca jest dość zwarta, poszczególne zagadnienia przedstawiono w sposób wystarczający dla udowodnienia postawionej tezy, całość tekstu jest logicznie ułożona, choć tytuły niektórych rozdziałów mogły być nazwane bardziej jednoznacznie, np. rozdział 6 – raczej: *Badania doświadczalne na modelu klatki schodowej*, oraz 6.1. *Opis badań na modelu w skali 1:10*, rozdział 7 – raczej: *Badania numeryczne oporów przepływu powietrza w klatkach schodowych* itp.

Praca jest napisana ogólnie poprawnym językiem. Występujące drobne usterki stylistycznych i językowe nie mają wpływu na generalnie pozytywną ocenę pracy.

Jednak niektóre przyjęte założenia, wprowadzone uproszczenia i sposób przedstawienia niektórych fragmentów pracy są dyskusyjne. Najważniejsze z nich podaję poniżej:

1. W tytule pracy mówi się o badaniu oporów przepływu w klatkach schodowych podczas działania wentylacji pożarowej, jednak w badaniach doświadczalnych i numerycznych praktycznie takiej sytuacji nie badano?
2. Rozdział 2 jest dość obszerny, gdyż ma aż 49 stron, a teza pracy jest dopiero w połowie pracy (str. 66). Rozdział 2 mógł być bardziej zwarty?
3. Rozdziały 3 i 4 są dość krótkie i można je było scalić.
4. Badanie szczelności klatki modelowej przeprowadzono testerem PANDA o progu czułości 3,6 m<sup>3</sup>/h. Klatka modelowa ma jedynie 0,35 m<sup>3</sup> kubatury – co daje 10,5 h<sup>-1</sup>, czyli szczelność byłaby dość słaba. Przy tak małym modelu trzeba było zastosować inny sposób pomiaru o większej dokładności.
5. W pracy (str. 82) wymieniono przyrządy pomiarowe wykorzystane do pomiaru wartości poszczególnych wielkości fizycznych, jednak nie zamieszczono ich niedokładności (niepewności) pomiarów, co uniemożliwia oszacowanie błędów, w tym wyliczenie błędów wielkości złożonych. Stąd też trudno ocenić niepewność otrzymanych wyników?
6. W pracy nie zamieszczono konkretnych pozycji literatury, jako pozycje cytowane w danym miejscu, tylko ogólnie nazwisko i rok, co nie jest poprawne w dysertacji doktorskiej.
7. W wielu miejscach używa się: *ruch płynu...*, poprawniej jest: *przepływ płynu*.

8. W kilku miejscach (np. str. 31) myli się *wielkość* z *wartością*: **wielkość** – to np. ciśnienie, temperatura itp., natomiast **wartość** – to liczba określająca ciśnienie, temperaturę.
9. Wielokrotnie w pracy powtarza się przywołanie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 2002 dotyczące *warunków technicznych ...*. Jest to niepotrzebne, należało to zrobić na początku pracy a później powołać się na odpowiednią pozycję ze spisu w literaturze.
10. Uwagi szczegółowe:
  - a. str. 7 – brakuje tytułu rozprawy w języku angielskim?;
  - b. str. 15 – we wprowadzeniu mowa o budynkach w Polsce, nic nie mówi się o budynkach wysokościowych na świecie, które są znacznie wyższe i mają inaczej rozwiązywane problemy pożarowe klatek schodowych?;
  - c. str. 17-21 – historia rozwoju schodów nie jest istotna dla tej pracy, ważniejsze są wymiary stopni, biegów schodów, spoczników itp. w budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej;
  - d. str. 29-30 – wzory (2 ... 9) są wprawdzie dość powszechnie znane, jednak należało podać źródło literatury;
  - e. str. 31 – wzór (11) jest słuszny dla klatki schodowej prostokątnej, a istnieją również inne kształty klatek schodowych?;
  - f. str. 32 – źródło pochodzenia wzoru (12) – własny czy z literatury?;
  - g. str. 35-36 – oprócz przepływu przez nieszczelności równoległe i szeregowe, należy uwzględnić przepływy przez zaprojektowane otwory np. klapy transferowe, klapy upustowe, drzwi itp.;
  - h. str. 36 – źródło wzoru (15), jak określa się  $A_{eff}$ ?; dla konkretnego przypadku lepiej określić nieszczelność poprzez pomiar ciśnieniowy Blower Door;
  - i. str. 41 – nie *różnica temperatur*, a *różnica temperatury*; temperatura jako wielkość fizyczna jest jedna, a jedynie są dwie lub więcej jej wartości?;
  - j. str. 41 – gęstość powietrza we wzorze (21) jest słuszna dla powietrza suchego, powinniśmy uwzględnić stan rzeczywisty, czyli powietrze wilgotne,
  - k. str. 42 – skąd wzór (23), ponadto we wzorze jest współczynnik, a nie znamy w jakich jednostkach jest wynik, czyli spadek ciśnienia?
  - l. Str. 45 – we wzorze (25) powinno być  $V$  bez kropki (czyli objętość, a nie przepływ w czasie);
  - m. Str. 56 – ... *przedstawione zostało przez Brzezińska (2017)*, raczej ... *przez Brzezińską?*, w innych miejscach jest podobnie;
  - n. Str. 58 - ... *stosuje się klapy upustowe*, powinno być ... *stosuje się klapy upustowe lub wentylatory ze zmiennym przepływem sterowanym czujnikiem ciśnienia*;
  - o. Str. 59 – źródło pochodzenia wzorów: (26) i (27);
  - p. Str. 88 – stratę ciśnienia wyznaczono w funkcji prędkości w przedziale 0,2-0,6 m/s, co z większymi prędkościami oraz dlaczego nie określono w funkcji liczby Reynoldsa, co byłoby pewnym uogólnieniem?;
  - q. Str. 102 – na wykresie 14 nie powinno być: *pomiar – schody ... ale wynik z obliczeń CFD?*;
  - r. Str. 111 – czy wyniki pomiarów na modelu nie powinny być podstawą do walidacji modelu numerycznego i jego wyskalowania (wykres 16 i 17), wówczas korelacja byłaby może lepsza?

Mimo w/w usterek i niedociągnięć, pracę oceniam pozytywnie, zawiera ona wiele wartościowych badań i analiz, które pozwoliły szerzej uwzględnić wpływ elementów geometrycznych klatki schodowej na opory przepływu powietrza i ewentualnie powietrza z

gazami pożarowy, co rozszerza wiedzę o zjawiskach w klatkach schodowych i pozwoli to na dokładniejsze obliczanie układów wentylacji pożarowej w budynkach wysokich i wysokościowych.


### **Wniosek końcowy**

Przytoczone uwagi ogólne i szczegółowe nie umniejszają zasadniczych wartości merytorycznych pracy. Część z powyższych uwag jest dyskusyjna, generalnie mają skorygować uchybienia, ukierunkować ewentualne dalsze badania prowadzone przez Autorkę w tym zakresie i rozszerzenie badań o nowe parametry oceny, aby uzyskać szersze uogólnienie.

Stwierdzam więc, że Doktorantka przedstawiła ciekawą pracę wnoszącą nowe elementy do problematyki wentylacji pożarowej budynków, w szczególności do oddymiania lub ciśnieniowego zabezpieczenia przed zadymieniem klatek schodowych – poprzez dokładniejsze uwzględnienie wpływu różnych czynników na straty ciśnienia. Efektem tej pracy jest określenie funkcji opisującej zależności wartości współczynnika oporów przepływu  $K_{SW}$  od wymiarów geometrycznych klatki schodowej i dodatkowo kilku spostrzeżeń mówiących o naturze przepływu w klatce schodowej.

Uzyskane wyniki mają wartość poznawczą i ale jednocześnie mogą być również wykorzystane w praktyce inżynierskiej, co pokazano w przedstawionym przykładzie projektowym (punkt 8.1). Doktorantka dobrze opanowała zasady prowadzenia badań doświadczalnych i analizę numeryczną za pomocą programu komercyjnego ANSYS Fluent oraz opracowywanie wyników tych badań. Mogę więc stwierdzić, że potrafi formułować i rozwiązywać problemy naukowe oraz oceniać uzyskane wyniki.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Izabeli Tekielak-Skałka pt. *“Badanie oporów przepływu powietrza w wydzielonych pożarowo klatkach schodowych podczas działania wentylacji pożarowej”* spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003r. nr 65 poz. 595 – 2003 z późn. zm.) – biorąc pod uwagę art. 179 ust. 1. Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1669). Wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej dyskusji.

  
(Edward Szczechowiak)