

# Badania modelowe wpływu interferencji aerodynamicznej otoczenia śródmiejskiego na budynek wysokościowy

Grzegorz Bosak<sup>1</sup>

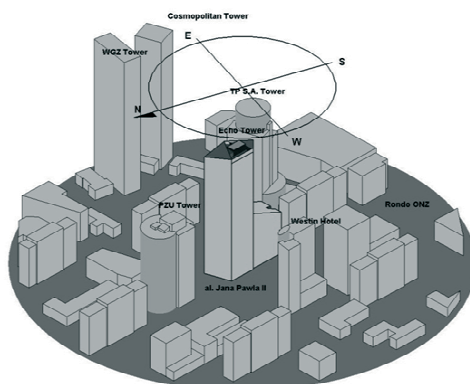
<sup>1</sup> *Laboratorium Inżynierii Wiatrowej, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, e-mail: GBosak@interia.pl*

**Streszczenie:** Praca przedstawia wyniki badań modelowych w tunelu aerodynamicznym wpływu interferencji aerodynamicznej na działanie wiatru na wysokościowy budynek projektowany w centrum Warszawy. Badania przeprowadzono w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. Mierzono ciśnienia wiatru na powierzchniach zewnętrznych modelu budynku, umieszczając początkowo tylko model budynku w przestrzeni pomiarowej a następnie model budynku wraz z najbliższym otoczeniem. Celem pracy było określenie charakteru zmiany działania wiatru na budynek wywołanej otoczeniem interferencyjnym najbliższego sąsiedztwa. Porównano współczynniki ciśnienia wiatru na powierzchniach oraz zmianę poziomego globalnego działania wiatru na konstrukcję w skali rzeczywistej.

**Słowa kluczowe:** pomiary ciśnień wiatru, interferencja aerodynamiczna, tunel aerodynamiczny, budynek wysokościowy.

## 1. Wprowadzenie

Przedmiotowy budynek, Echo Tower, o wysokości 155m zlokalizowany jest w ścisłym centrum Warszawy w kwartale zabudowy wyznaczonym przez: Aleje Jana Pawła II, oraz ulice: Grzybowską i Twardą. Zaprojektowany budynek znajduje się w centrum miasta, charakteryzującym się zwartą zabudową. Zarówno wzdłuż ulicy Grzybowskiej a także po obu stronach Alei Jana Pawła II znajdują się budynki o średniej wysokości około 40 m z dominantą budynków Hotelu Westin, TP SA Tower oraz PZU SA, których wysokość wynosi ponad 100 m. W badaniach uwzględniono także dwa budynki wysokościowe, których budowa planowana jest w obrębie analizowanego otoczenia. Wieżowiec Gminy Żydowskiej to konstrukcja o wysokości 170 m i oddalona od analizowanego budynku o około 220 m. Wysokość Cosmopolitan Tower, drugiego planowanego budynku, jest równa 160 m przy podobnej odległości w planie jak budynku poprzedniego. Wizualizacja budynku Echo Tower wraz z otoczeniem jest prezentowana na rys.1.



Rys. 1. Wizualizacja budynku Echo Tower wraz z otoczeniem

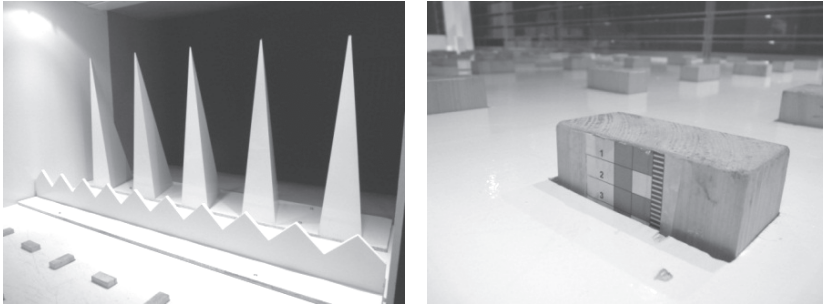
Celem badań w tunelu aerodynamicznym było określenie wpływu otoczenia budynku na zmianę średniego działania wiatru na powierzchni zewnętrznej konstrukcji a w sposób pośredni również na zmianę poziomego, globalnego działania wiatru na wysokościowiec w skali rzeczywistej.

## 2. Opis przeprowadzonych badań w tunelu aerodynamicznym

Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej wykorzystując sztywny model budynku wraz z otoczeniem wykonany w skali 1:250. Budynek, pod względem aerodynamicznym, jest bryłą o płaskich powierzchniach i ostrych krawędziach.

### 2.1. Symulacja warstwy przyziemnej

W pierwszym etapie badań ustalono strukturę przepływu w przestrzeni pomiarowej zgodną z przyjętymi założeniami dotyczącymi warunków wiatrowych występujących w miejscu lokalizacji projektowanego obiektu przedstawionymi w [1]. Strukturę przepływu uformowano dzięki elementom modyfikującym przepływ (rys. 2), to jest iglicom typu IA10 (o wysokości 1m), barierce Bz2 (o wysokości 20cm) i klocek wysuniętym na wysokość 3cm.



Rys. 2. Elementy turbulacyjne wykorzystane podczas badań

Strukturę przepływu powietrza w tunelu aerodynamicznym zmierzono niezależnie przy pomocy zestawu termooanemometrycznego oraz grzebieniową sondą ciśnień.

Pomiar termooanemometryczny został wykonany w 6 punktach położonych w osi tunelu na wysokościach od 115 mm do 825 mm nad podłogą w odległości 1420 mm od osi modelu w kierunku nawietrznym w strefie niezaburzonej przez model, w której doszło już do uformowania struktury przepływu dzięki elementom turbulacyjnym.

Pomiar grzebieniową sondą ciśnień wykonano w trzech pionowych osiach znajdujących się w tej samej płaszczyźnie tunelu w której wykonano pomiar termooanemometryczny. Punkty pomiarowe znajdowały się na wysokościach od 200mm do 600mm.

Następnie wykonano regresję (rys. 3) metodą najmniejszych kwadratów funkcji prawa potęgowego średniej prędkości wiatru otrzymując zależność:

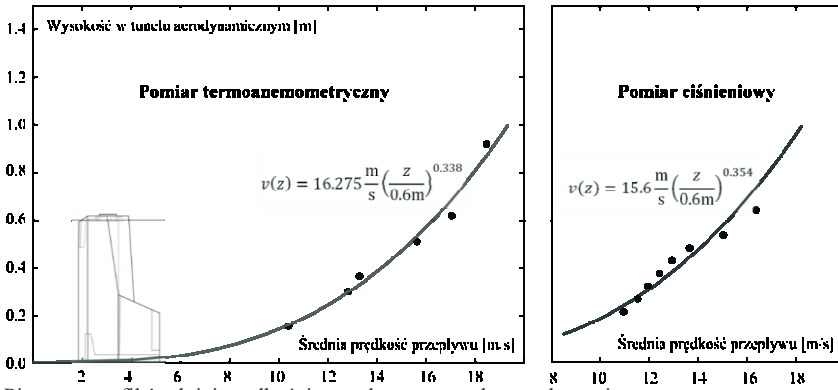
$$V(z) = V_{ref} \left( z / z_{ref} \right)^{\alpha} ; z_{ref} = 0,6m \quad (1)$$

z parametrami ujętymi w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów prawa potęgowego

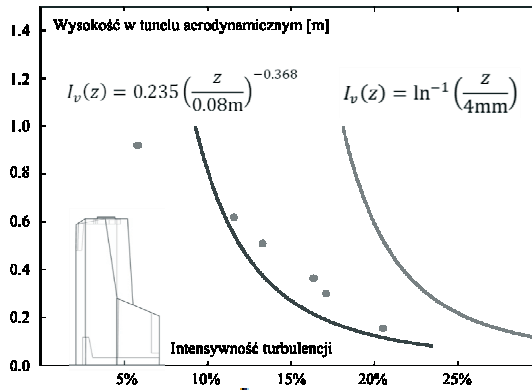
Parametry	Termooanemometry	Sonda ciśnień
$\alpha$	0,338	0,354
$V_{ref}$	16.275 m/s	15.6 m/s

Na podstawie prędkości referencyjnej pochodzącej z pomiaru ciśnieniowego (15.6m/s) określono ciśnienie referencyjne  $q_{ref}=150$  Pa.



Rys. 3. Pionowy profil średniej prędkości przepływu w tunelu aerodynamicznym

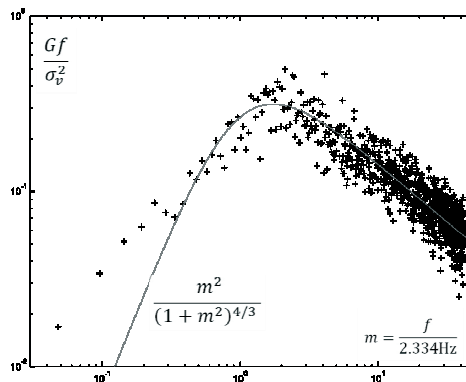
W termooanemometrycznych punktach pomiarowych określono intensywność turbulencji, co przedstawia rys. 4 wraz z dwiema krzywymi teoretycznymi.



Rys. 4. Pionowy profil intensywności turbulencji  $I_v$  wraz z krzywymi teoretycznymi

Poziom turbulencji na wysokości badanego obiektu jest wystarczający ze względu na zalecenia proponowane przez ISO.

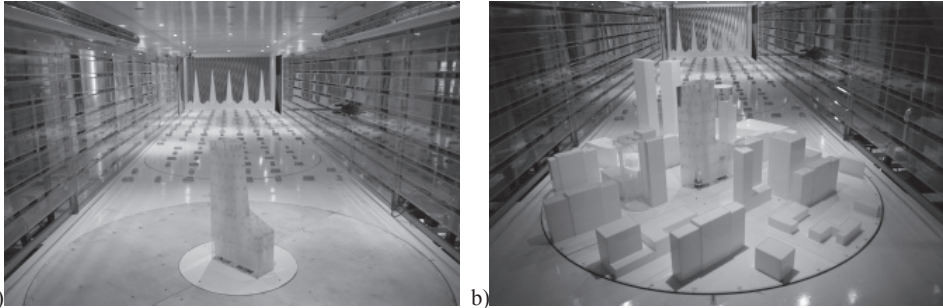
Określono spektrum gęstości widmowej mocy prędkości wiatru. Przykładowe wyniki pokazują rys. 5. Są one dobrze zgodne z teoretycznym modelem Davenporta.



Rys. 5. Spektrum gęstości widmowej mocy prędkości wiatru dla punktu pomiarowego na wysokości 620 mm; regresja metodą najmniejszych kwadratów funkcji spektrum Davenporta

## 2.2. Podstawowa charakterystyka badań w tunelu aerodynamicznym

Badania w tunelu aerodynamicznym wykonano w dwóch sytuacjach pomiarowych: w sytuacji *S* w przestrzeni pomiarowej tunelu umieszczono tylko model analizowanego budynku (por. rys.6a), natomiast w sytuacji *I* model budynku wraz z otoczeniem (por. rys.6b).



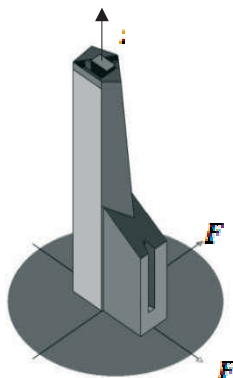
Rys. 6. Sytuacje pomiarowe w tunelu aerodynamicznym: a) sytuacja *S*, b) sytuacja *I*

Rejestracji podlegały przebiegi czasowe ciśnienia wiatru na powierzchniach zewnętrznych modelu budynku w 219 punktach pomiarowych (p.p.). Długość rejestrowanego przebiegu czasowego wynosiła 15 s, który próbkowano z częstotliwością 200 Hz. Uwzględniono w badaniach 40 kierunków wiatru w pełnym zakresie zmiany kąta od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  co  $10^\circ$  oraz 4 dodatkowe kierunki:  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  oraz  $315^\circ$ . Kierunek wiatru  $0^\circ$  jest przeciwny do osi *X* globalnego układu współrzędnych (por. rys. 7). Pozostałe kierunki odmierzane są zgodnie ze skretnością układu współrzędnych (por. rys. 7). Skala liniowego podobieństwa geometrycznego modelu wynosiła 1:250. W badaniach wykorzystano elektroniczny skaner ciśnienia, system termooanemometryczny oraz rurkę Pitota.

Na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczono rozkłady aerodynamicznych współczynników średniego ciśnienia zewnętrznego wiatru na 32 opomiarowanych powierzchniach analizowanego budynku (płaszczyznach ścian i dachu). Powierzchnie opomiarowane stanowią 99% ogólnej powierzchni zewnętrznej konstrukcji. Rozkłady współczynników ciśnienia zewnętrznego wiatru na poszczególnych obszarach (ścianach i dachu) wyznaczono poprzez interpolację, bazującą na średnich wartościach ciśnień wiatru otrzymanych w punktach pomiarowych.

Za kryterium porównawcze wpływu interferencji otoczenia na budynek przyjęto porównanie globalnego, poziomego działania wiatru w dwóch analizowanych sytuacjach pomiarowych. Szczytowe poziome działanie wiatru na budynek w skali rzeczywistej otrzymano poprzez wykorzystanie współczynników aerodynamicznych ciśnienia wiatru z badań w tunelu oraz określając szczytowe ciśnienie prędkości wiatru na wysokości referencyjnej w skali rzeczywistej właściwe obszarowi Warszawy. Następnie przeprowadzono sumowanie działań wywierane na poszczególne płaszczyzny zgodnie z wzorem (2).

$$F_k(\text{dir}) = q_p(z_{\text{ref}}) \cdot \sum_{p=1}^{32} \sum_{A_p} C_{pe}(x, y, z, \text{dir}) \cdot \Delta A_p(x, y, z) \cdot n_k(p) \quad \text{gdzie: } k=x, y \quad (2)$$



Rys. 7. Składowe globalnej siły poziomego działania wiatru na budynek

Przy sumowaniu działań założono jednoczesność występowania szczytowych wartości ciśnienia na wszystkich powierzchniach. Tym samym otrzymane wartości poziomych globalnych sił działania wiatru należy przyjąć jako oszacowanie górne. Poziome działania globalne otrzymano w dwóch sytuacjach pomiarowych  $S$  i  $I$ .

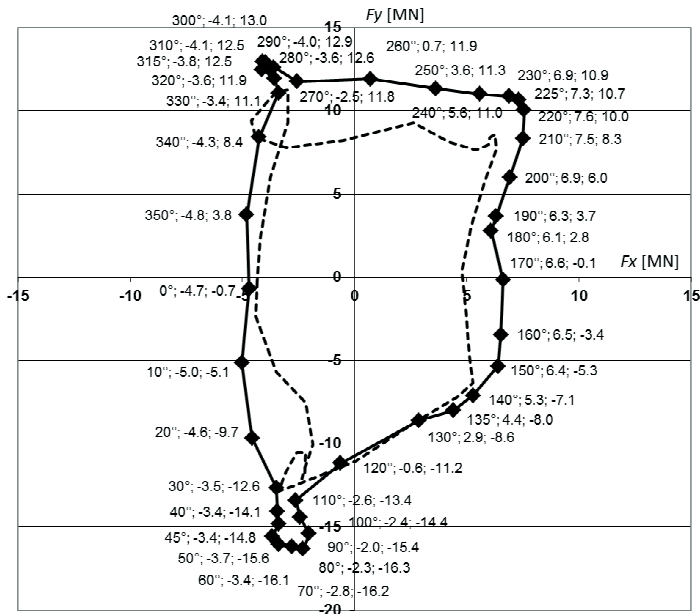
W celu określenia znaczenia wpływu interferencyjnego wprowadzono współczynnik interferencyjny sił zgodny z wzorem (3).

$$I_c^F(dir) = \frac{F_H^I(dir) - F_H^S(dir)}{\max |F_H^S(dir)|} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:  $F_H^S$  - moduł wektora sumy sił średniego poziomego działania wiatru na budynek w sytuacji pomiarowej  $S$ ,  $F_H^I$  - moduł wektora sumy sił średniego poziomego działania wiatru na budynek w sytuacji pomiarowej  $I$ .

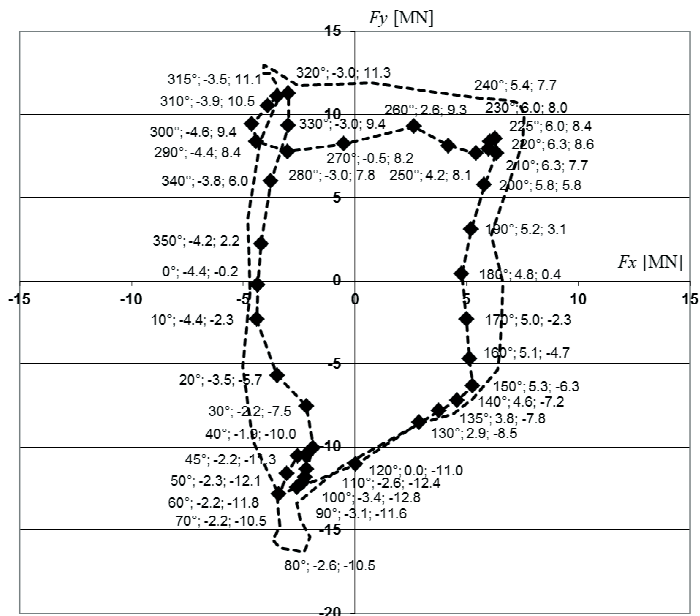
### 3. Wyniki badań

Wartości składowych  $F_x$ ,  $F_y$  globalnej siły poziomego działania wiatru na budynek (skala rzeczywista) w sytuacji pomiarowej  $S$  prezentuje rys. 8. Przy poszczególnych markerach określono kierunek wiatru oraz odpowiadające mu wartości składowych  $F_x$ ,  $F_y$  wyrażone w MN. Linia przerywaną, w celu porównawczym, przedstawiono wartości otrzymane w sytuacji  $I$ .



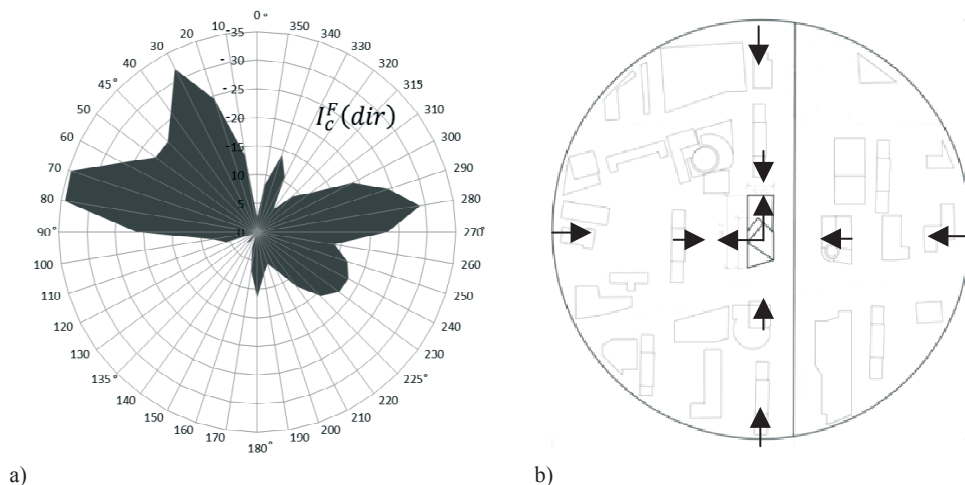
Rys. 8. Wartości składowych  $F_x$ ,  $F_y$  globalnej siły poziomego działania wiatru na budynek (skala rzeczywista) w sytuacji pomiarowej  $S$  na tle rezultatów otrzymanych w sytuacji  $I$  (linia przerywana)

Analogiczne wartości w sytuacji pomiarowej  $I$  zestawiono na rys. 9. Liniją przerywaną zaznaczono wartości właściwe dla sytuacji  $S$ .



Rys. 9. Wartości składowych  $F_x$ ,  $F_y$  globalnej siły poziomego działania wiatru na budynek (skala rzeczywista) w sytuacji pomiarowej  $I$  na tle rezultatów otrzymanych w sytuacji  $S$  (linia przerywana)

Na rys. 10 zamieszczono diagram współczynnika interferencji oraz plan budynku wraz z otoczeniem. Ujemne wartości wyrażone w procentach na diagramie wskazują na osłaniający charakter otoczenia budynku w odniesieniu do globalnego działania wiatru na konstrukcję. Charakter osłaniający jest zróżnicowany w zależności od kierunku wiatru.



Rys. 10. Diagram współczynnika interferencji (a) w odniesieniu do planu budynku wraz z otoczeniem (b)

#### 4. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań określono następujące wnioski:

- Otoczenie budynku, w odniesieniu do działania globalnego, ma charakter osłaniający, zmniejszający działanie wiatru na konstrukcję;
- Znaczne zmniejszenie modułu siły poziomego działania wiatru występuje przy kierunkach napływu od strony TP S.A. Tower (30°)- redukcja 32 %, PZU Tower (180°)- redukcja 12 %, Westin Hotel (280°)- redukcja 28 %;
- Największa redukcja działania wiatru, wyrażona w spadku modułu siły poziomej, występuje przy kącie napływu 70°-80°, dla którego efekty osłaniające budynków: TP S.A. Tower, Cosmopolitan Tower oraz Wieżowca Wspólnoty Żydowskiej sumują się; redukcja modułu poziomej siły działania wiatru jest w tym przypadku równa około 35%;
- W przypadku działań miejscowych od strony napływającego strumienia powietrza, w rozległych obszarach niżej położonych, charakter osłaniający otoczenia skutkuje zmianą ciśnienia parcia na ciśnienie ssania;
- Nie obserwuje się zwiększenia intensywności ciśnienia parcia;
- Miejscowo występuje znaczące zwiększenie poziomu ciśnienia ssania, głównie w strefach przy krawędziach ścian;
- Największy efekt zmiany wartości ciśnienia, w odniesieniu do ekstremalnego poziomu ciśnienia występującego na powierzchni konstrukcji w sytuacji braku interferencji (brak otoczenia), dochodzi do poziomu 50 %;
- Na dachu i wyżej położonych obszarach między konstrukcji nie obserwuje się znaczących wpływów interferencyjnych, z wyłączeniem kierunków napływu od strony najwyższych budynków otoczenia (kierunki napływu wiatru od 30° do 80°).

## Literatura

- 1 Flaga A., Bosak G., Kłaput R., Flaga L., Kimbar G. Badania modelowe w tunelu aerodynamicznym i analizy studialne oddziaływań wiatru dla projektowanego budynku wysokościowego u zbiegu al. Jana Pawła II i ul. Grzybowskiej w Warszawie, Raport z badań, Politechnika Krakowska, Kraków 2012.

## Wind tunnel tests of aerodynamic interference of the high-rise building and its nearest city surroundings

Grzegorz Bosak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Wind Engineering Laboratory, Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology, e-mail: GBosak@interia.pl*

**Abstract:** The paper summarizes the results of wind tunnel tests of the influence of aerodynamic interference on wind action of a high-rise building design in Warsaw. Measurements were accomplished in Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology. Wind pressures on external surfaces of the building model were acquired in two different situations. Firstly, only the building model was placed in the tunnel working section, secondly, the building model with the nearest surroundings was taken under consideration. A study of the character of wind action differences caused by the nearest surroundings of the building was the main aim of the paper. Wind pressure coefficients on the external building surfaces and the difference of horizontal wind action on full scale were compared.

**Keywords:** wind pressure measurements, aerodynamic interference, wind tunnel, high-rise building