

Badania modelowe działania wiatru na budynek wysoki

Grzegorz Bosak

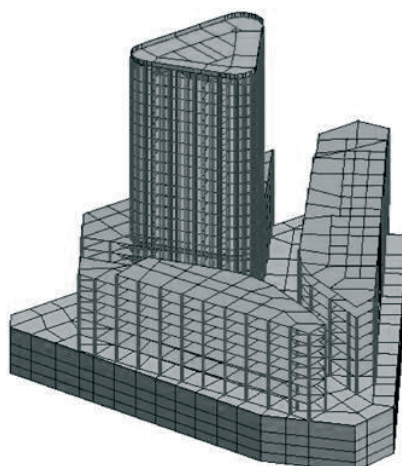
*Laboratorium Inżynierii Wiatrowej, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Krakowska, e-mail: GBosak@interia.pl*

Streszczenie: Praca przedstawia wyniki badań modelowych w tunelu aerodynamicznym działania wiatru na wysokościowy budynek projektowany przy ul. Puławskiej 2 w Warszawie. Badania przeprowadzono w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. Mierzono ciśnienia wiatru na powierzchniach zewnętrznych modelu budynku. Celem pracy jest określenie rozkładów ciśnienia wiatru na ścianach zewnętrznych modelu budynku przy różnych kierunkach wiatru, przeprowadzenie analiz studialnych oddziaływania wiatru na budynek oraz wyznaczenie podstawowych schematów ekwiwalentnego oddziaływania wiatru będących podstawą obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji.

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

1. Wprowadzenie

Budynek przy ul. Puławskiej 2 w Warszawie o wysokości 90 m to konstrukcja dwuczęściowa składająca się z rozległego trójbryłowego podium oraz pryzmatycznej wieży o przekroju poprzecznym w kształcie trójkąta z zaokrąglonymi narożami (zob. rys. 1.). Budynek o 22 kondygnacjach nadziemnych w którym wieżę stanowią kondygnacje od 6 do 22. Wizualizacje analizowanego budynku podano na rys.1.



Rys. 1. Wizualizacje budynku przy ul. Puławskiej w Warszawie

Uzasadnieniem badań aerodynamicznych jest nietypowy przekrój poprzeczny wieży oraz rozbudowane trójbryłowe podium, które ze względu na możliwe efekty interferencji aerodynamicznej, będzie ujawniać duży wpływ na wartość działania wiatru, szczególnie

w dolnej strefie wieży. W tunelu aerodynamicznym wykonano pomiar ciśnienia wiatru na powierzchni zewnętrznej wieży w czterech wyróżnionych poziomych przekrojach poprzecznych w celu wyznaczenia współczynników ciśnienia zewnętrznego wiatru. W badaniach uwzględniono najbliższą sąsiednią zabudowę znajdującą się w promieniu 200 m.

2. Opis przeprowadzonych badań w tunelu aerodynamicznym

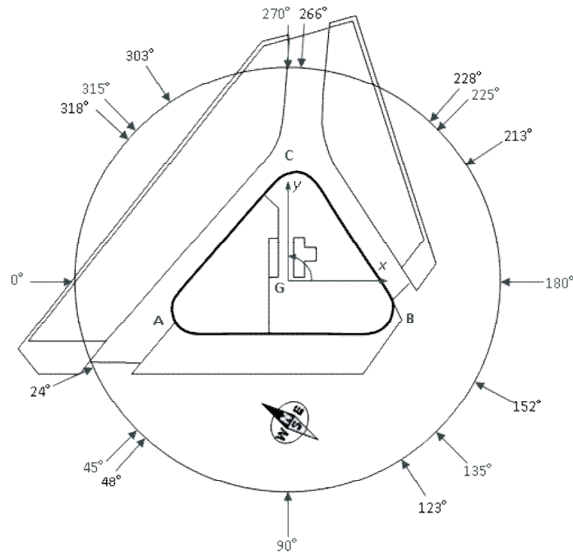
Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej wykorzystując sztywny model budynku wraz z otoczeniem wykonany w skali 1:200. W modelu budynku uwzględniono chropowatość powierzchni elewacji (por. rys. 1 i rys. 2). Zdjęcie modelu w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego przedstawiono na rys. 2.



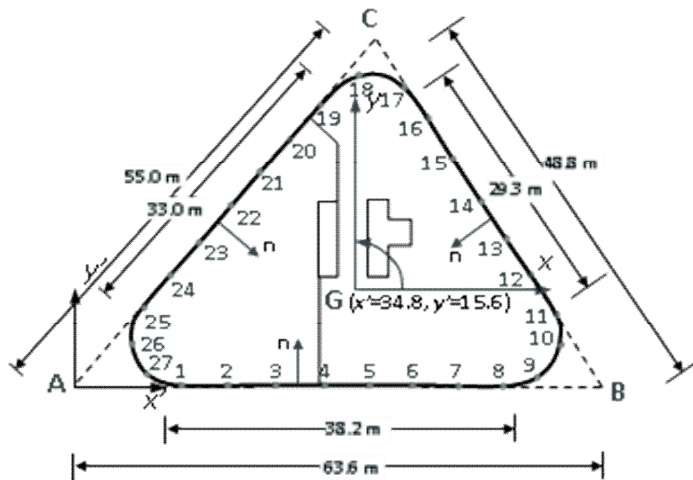
Rys. 2. Model budynku w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego

W trakcie badań aerodynamicznych przeprowadzono pomiary rozkładu chwilowych ciśnień wiatru na zewnętrznej powierzchni elewacji wieży w czterech przekrojach poprzecznych, zlokalizowanych na różnych wysokościach (P1-32 m.n.p.t., P2- 51 m.n.p.t., P3- 67 m.n.p.t., P4- 85 m.n.p.t.), przy 33 kierunkach wiatru. Zasadniczo były to kierunki wyznaczone z krokiem, co 15° , w zakresie od 0° do 345° (24 kierunki) oraz charakterystyczne kierunki związane z geometrią przekroju poprzecznego budynku (kierunki równoległe i prostopadłe do boków przekroju poprzecznego oraz zgodne z dwusiecznymi kątów wyznaczonych przez boki przekroju poprzecznego - 9 kierunków) (por. rys. 3).

W każdym z czterech przekrojów pomiarowych ciśnienia wiatru mierzono w 27 punktach pomiarowych, których konfigurację w skali rzeczywistej budynku prezentuje rys. 4.



Rys. 3. Charakterystyczne kierunki wiatru realizowane w trakcie badań w tunelu aerodynamicznym

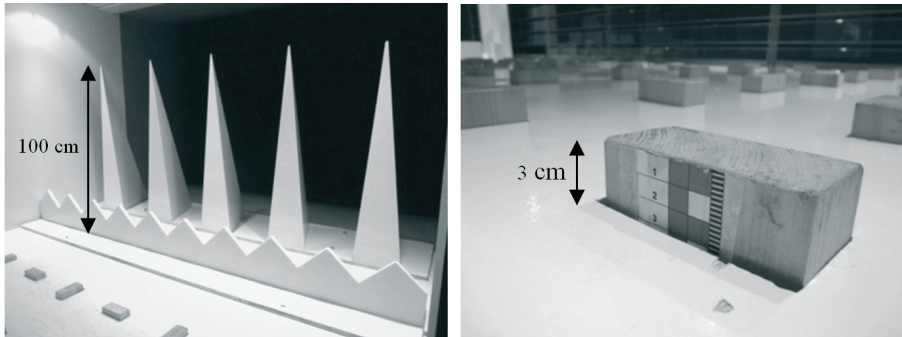


Rys. 4. Położenie punktów pomiarowych w przekroju poprzecznym wieży budynku w skali rzeczywistej

Rejestracji podlegały przebiegi czasowe ciśnienia wiatru na powierzchniach zewnętrznych modelu budynku w 108 punktach pomiarowych. Długość rejestrowanego przebiegu czasowego wynosiła 30 s, który próbkowano z częstotliwością 200 Hz. W badaniach wykorzystano elektroniczny skaner ciśnienia, system termoanemometryczny oraz rurkę Pitota.

Otrzymane w wyniku badań w tunelu aerodynamicznym przebiegi czasowe chwilowych ciśnień wiatru na powierzchni zewnętrznej modelu w poszczególnych przekrojach pomiarowych, zostały wykorzystane do określenia współczynników aerodynamicznych C_x , C_y i C_m odpowiadających poszczególnym przekrojom pomiarowym (P1, P2, P3 i P4). Zestaw trzech wartości współczynników aerodynamicznych danego przekroju pomiarowego został wyznaczony w każdym z 33 kierunków wiatru. W wyniku tego otrzymano zależności wartości danego współczynnika siły i momentu aerodynamicznego od kierunku działania

wiatru na model. Podczas badań ustalono strukturę przepływu w przestrzeni pomiarowej zgodną z przyjętymi założeniami dotyczącymi warunków wiatrowych występujących w miejscu lokalizacji projektowanego obiektu. Strukturę przepływu uformowano dzięki elementom modyfikującym przepływ (rys. 5), to jest iglicom, barierce i klozkom.



Rys. 5. Elementy turbulizacyjne wykorzystane podczas badań

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

Następnie określono funkcję prawa potęgowego średniej prędkości wiatru otrzymując zależność:

$$V(z) = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha, \quad z_{ref} = 0,45\text{m} \quad (1)$$

z parametrami ujętymi w tab. 1.

Tablica 1. Wartości parametrów prawa potęgowego

Parametry	Wartość
α	0.3
v_{ref}	20.5 m/s

Wartość współczynnika intensywności turbulencji na wysokości badanego modelu wynosiła 20 %.

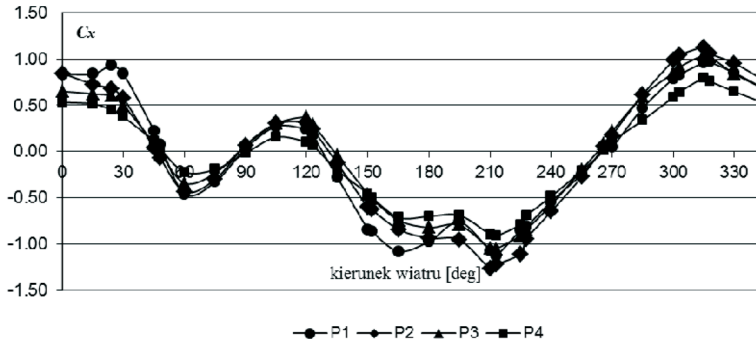
3. Wyniki badań

Wartości współczynników sił i momentu aerodynamicznego w poszczególnych przekrojach pomiarowych (P1, P2, P3 oraz P4), obliczone zgodnie ze wzorami (2) na podstawie rozkładu ciśnienia wiatru zmierzonego podczas badań w tunelu aerodynamicznym, zamieszczonych rys. 6-8.

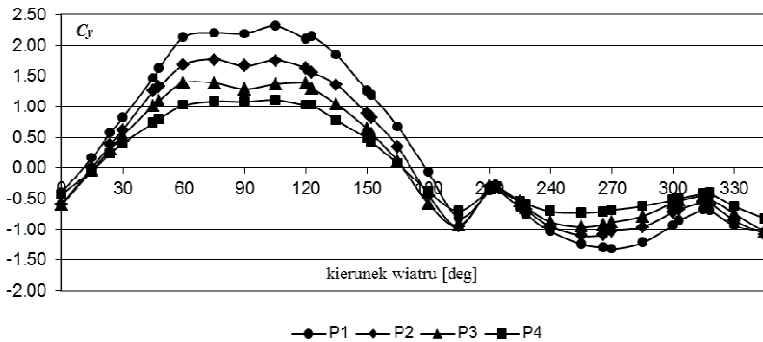
$$C_x = \frac{\overline{F_x}}{q_{ref} D}, \quad C_y = \frac{\overline{F_y}}{q_{ref} D}, \quad C_m = \frac{\overline{M_z}}{q_{ref} D^2} \quad (2)$$

gdzie: D - wymiar charakterystyczny równy 0.318 m, co jest wymiarem najdłuższego boku przekroju poprzecznego modelu (dokładnie trójkąta powstałego z przedłużenia boków przekroju poprzecznego); q_{ref} - ciśnienie referencyjne; $\overline{F_x}$, $\overline{F_y}$, $\overline{M_z}$ - średnie wartości składowych sił i momentu aerodynamicznego działania wiatru na wieżę budynku w danym przekroju pomiarowym otrzymane w wyniku sumowania rozkładu ciśnienia wiatru na powierzchni zewnętrznej.

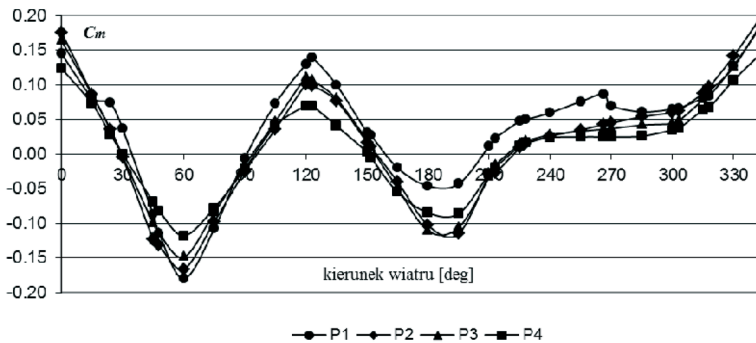
Przebiegi wartości współczynników aerodynamicznych w kolejnych przekrojach pomiarowych są podobne, co wynika z formy geometrycznej przekroju poprzecznego. Wartości w poszczególnych przekrojach różnią się jednak, co szczególnie ujawnia się w przypadku przekroju P1. Rezultat ten związany jest z efektem wystąpienia interferencji aerodynamicznej z najbliższą zabudową w niższych strefach wieży budyńku.



Rys. 6. Wartości współczynnika aerodynamicznego C_x w przekrojach pomiarowych (P1, P2, P3, P4) w zależności od kierunku wiatru



Rys. 7. Wartości współczynnika aerodynamicznego C_y w przekrojach pomiarowych (P1, P2, P3, P4) w zależności od kierunku wiatru



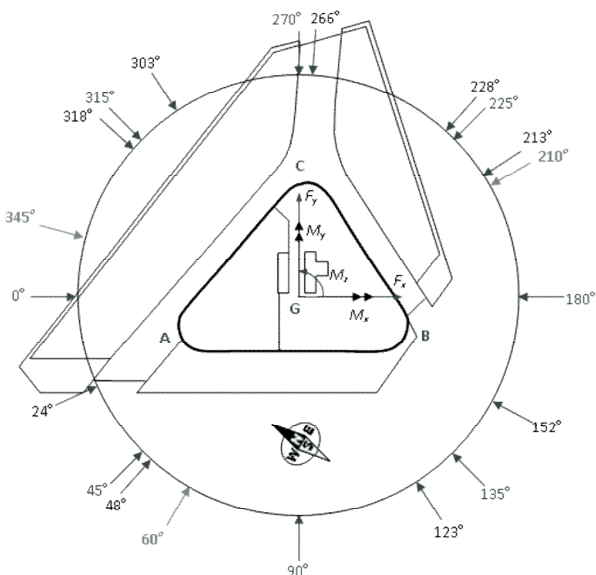
Rys. 8. Wartości współczynnika aerodynamicznego C_m w przekrojach pomiarowych (P1, P2, P3, P4) w zależności od kierunku wiatru

Określone powyżej wartości współczynników aerodynamicznych porównano z wynikami badań zamieszczonymi w [2], które dotyczyły pomiaru sił aerodynamicznych działania wiatru na graniastosłup prawidłowy trójkątny przy proporcji boków $b/h=0.4$ (b - wymiar boku przekroju poprzecznego, h - wysokość graniastosłupa). W wyniku porównania, biorąc pod uwagę wartości ekstremalne, podstawową różnicę obserwuje się w przypadku współczynnika C_y przy kierunkach wiatru zbliżonych do 90° . W przypadku badanego modelu budynku, w przekrojach P1 i P2 występują znacząco większe wartości tego współczynnika (odpowiednio 1.6 i 2.3), podczas gdy w badaniach opisanych w [2] wartość maksymalna wynosiła 1.3, co odpowiada w przybliżeniu przekrojowi pomiarowemu P3 (por. rys. 7).

Wartości współczynników aerodynamicznych C_x , C_y , C_m posłużyły do określenia schematów ekwiwalentnego działania wiatru na wieżę budynku w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych głównej konstrukcji nośnej.

4. Wyznaczenie schematów ekwiwalentnego działania wiatru na wieżę budynku

W wyniku analizy wykresów wartości współczynników aerodynamicznych, otrzymanych na podstawie badań, wyróżniono trzy kierunki wiatru, przy których występują ekstremalne globalne siły działania wiatru na konstrukcję wieży. W przypadku kierunku 60° występuje bliska maksymalnej siła F_y działania wiatru w kierunku osi y globalnego układu współrzędnych przy jednoczesnym minimalnym (największym ujemnym) momencie skręcającym M_z . Tę sytuację wyróżniono, jako „Sytuacja projektowa 1”. W „Sytuacji projektowej 2” kierunek wiatru jest równy 210° , gdzie występuje minimalna (największa ujemna) siła F_x działania wiatru w kierunku x globalnego układu współrzędnych. Maksymalny moment skręcający wieżę względem osi pionowej M_z występuje przy kierunku wiatru 345° w „Sytuacji projektowej 3”. Dodatkowo zwroty sił i momentu aerodynamicznego działania wiatru na wieżę budynku wraz z analizowanymi kierunkami wiatru prezentuje rys. 9.



Rys. 9. Siły działania aerodynamicznego na wieżę budynku

Wykorzystując współczynniki aerodynamiczne otrzymane w wyniku badań oraz procedurę zgodną z [3] obliczono siły i moment aerodynamiczny, zredukowane w środku geometrycznym G przekroju poprzecznego na czterech poziomach referencyjnych (P1, P2, P3 oraz P4), a następnie zredukowano globalne działanie wiatru na wieżę budynku w punkcie środka geometrycznego przekroju poprzecznego położonego na wysokości 25 m.n.p.t (poziom podstawy wieży).

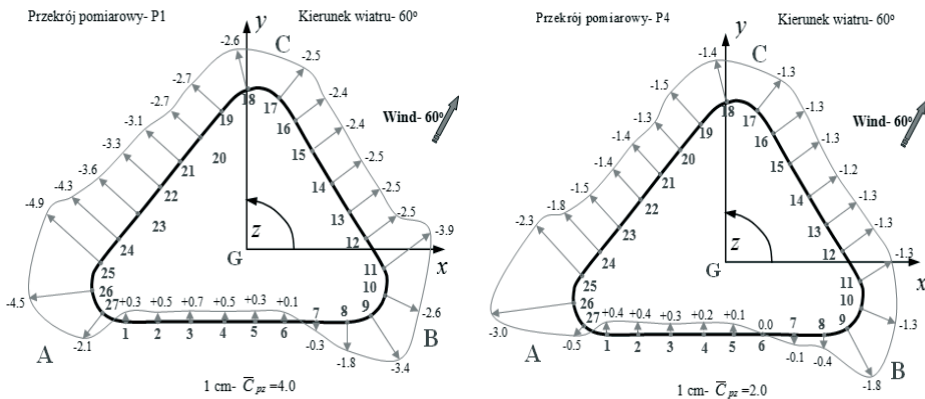
Przyjęto I strefę wiatrową (Warszawa), kategorię terenu IV. Współczynnik $c_s c_d$ przyjęto o wartości równej 1.0.

Zestawienie globalnych sił i momentów aerodynamicznych działających na wieżę budynku zredukowanych w punkcie środka geometrycznego przekroju poprzecznego położonego na wysokości 25 m.n.p.t (poziom podstawy wieży) dla analizowanych „Sytuacji pomiarowych” zamieszczono w tab.2.

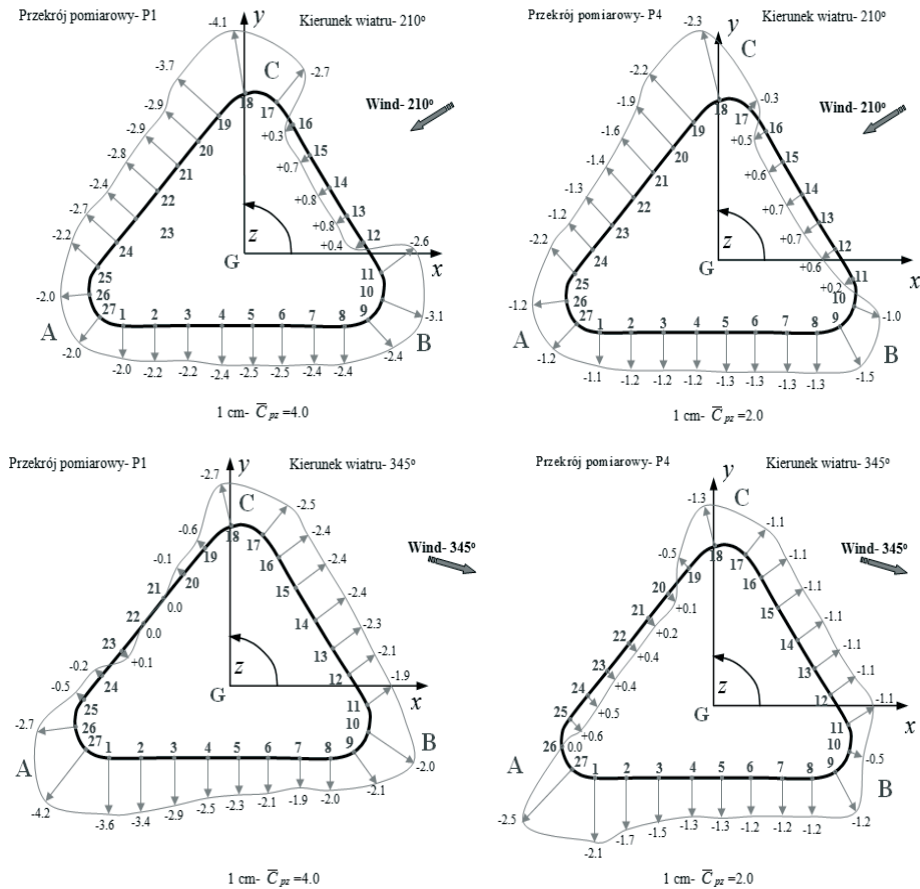
Tablica 2. Wartości globalnych sił i momentów aerodynamicznych działających na wieżę

Kierunek wiatru	F_x [kN]	F_y [kN]	M_x [kNm]	M_y [kNm]	M_z [kNm]
60°	-1667	7073	-212578	-50421	-44632
210°	-4929	-1535	52528	-162894	-6110
345°	3033	-4585	151677	99565	54420

Rozkłady aerodynamicznego współczynnika ciśnienia wiatru na powierzchni zewnętrznej C_{pe} w najniższym (P1) i najwyższym (P4) analizowanym przekroju poprzecznym wieży w rozpatrywanych sytuacjach pomiarowych podano na rys. 10(11).



Rys. 10. Rozkłady wartości aerodynamicznego współczynnika ciśnienia C_{pe} w przekrojach P1 i P4 w analizowanych sytuacjach pomiarowych



Rys. 11. Rozkłady wartości aerodynamicznego współczynnika ciśnienia C_{pe} w przekrojach P1 i P4 w analizowanych sytuacjach pomiarowych

5. Wnioski końcowe

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

- W przypadku powierzchni zewnętrznej ścian wieży budynku nie obserwuje się zwiększenia intensywności ciśnienia parcia (ciśnienie dodatnich) związanych z wpływem otoczenia;
- W obszarach zaokrąglonych naroży wieży występują znaczące wartości ciśnienia ssania (ciśnienia ujemne);
- Największe wartości ciśnienia ujemnego (ssania) występują w przekroju najniższym P1, co związane jest z wpływem interferencyjnym zabudowy podium budynku.
- Schematy ekwiwalentnego działania wiatru określono w trzech sytuacjach projektowych, w których wystąpiły odpowiednio ekstremalne wartości sił aerodynamicznych w kierunku osi y , x globalnego układu współrzędnych oraz maksymalna wartość momentu skręcającego wieżę M_z .
- W wyniku porównania otrzymanych wartości współczynników aerodynamicznych w analizowanych przekrojach pomiarowych z wynikami badań zamieszczonymi

w [2], stwierdzono zasadniczą różnicę w przypadku współczynnika C_y przy kierunkach wiatru zbliżonych do 90° . W przypadku badanego modelu budynku, w przekrojach P1 i P2 występują znacząco większe wartości tego współczynnika (odpowiednio 2.3 i 1.6), podczas gdy w badaniach opisanych w [2] wartość maksymalna wynosiła 1.3, co odpowiada w przybliżeniu przekrojowi pomiarowemu P3. Należy uznać, że jest to efekt interferencji aerodynamicznej związanej głównie z występowaniem trójbryłowego podium na niżej położone obszary wieży.

Literatura

- 1 Flaga A., Bosak G., Rzegocka-Kłaput R., Flaga Ł., Augustyn M. Badania modelowe i analizy studyjne oddziaływania wiatru na budynek wysoki przy ul. Puławskiej w Warszawie, Raport z badań, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- 2 Koloušek V., Pirner M., Fischer O., Náprstek J.- Wind Effects on Civil Engineering Structures. ACADEMIA/PRAHA, Prague 1983.
- 3 PN-EN 1991-1-4: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływanie wiatru.

Wind tunnel tests of wind action on a high-rise building

Grzegorz Bosak

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 a wind action on 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. A study of the character of the wind action on a tower of the building was the main aim of the paper. A triangle shape with rounded corners of the cross section of the tower and a complex group of neighbor buildings support aerodynamic analysis in a wind tunnel. Wind pressure coefficients on the external building surfaces and the global horizontal wind action on the building tower on full scale were analyzed.

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

