

**Wiesław Rokicki
Joanna Pietrzak
Mariusz Wrona**

WPŁYW OBCIĄŻEŃ OD WIATRU NA BUDYNEK WYSOKI O NIEREGULARNEJ FORMIE – BADANIA MODELOWE

Słowa kluczowe: wieżowiec, analiza normowa, badania tunelowe, aerodynamika, kształtowanie.

WIND LOADS' INFLUENCE ON THE HIGH-RISE BUILDING OF AN IRREGULAR FORM – MODEL STUDIES

Keywords: skyscraper, analyze according to Eurocode, wind tunnel test, aerodynamic, shaping.

Wstęp

Wznoszenie nowoczesnych budynków wysokich wymaga rozwiązywania coraz bardziej skomplikowanych problemów architektoniczno-budowlanych, konstrukcyjnych, instalacyjnych, komunikacyjnych, a także związanych z obsługą techniczną i zabezpieczeniem przeciwpożarowym. Należy zauważyć, iż skala trudności w projektowaniu i technologiach realizacji wynika przede wszystkim z wysokości budynków. W odniesieniu do struktury nośnej można stwierdzić, że budynek jest nazywany wysokim wtedy, gdy w procesie projektowania jego ustroju nośnego decydującą rolę odgrywają siły wywołane oddziaływaniami wiatru¹.

Współcześnie projektowane obiekty wysokie coraz częściej charakteryzują się bardzo oryginalną, niepowtarzalną formą przestrzenną. Oryginalna, architektonicznie wyróżniająca się dominanta wysokościowa tworzy widoczny znak rozpoznawczy w tkance miejskiej, często będąc wyznacznikiem prestiżu i reklamą inwestora. Aczkolwiek większość obecnie wznoszonych wieżowców cechują proste, zgeometryzowane forma, to jednak uwidacznia się tendencja projektowania form nieregularnych, o zmiennych rzutach i przekroju. Niekonwencjonalne kształty budynków wynikają m.in. z wizji autorskiej projektantów, ukształtowania działek budowlanych, jak również (co staje się bardziej istotne) analiz otaczającego mikroklimatu².

¹ Boda D. K., Banda L. S., *Wind effects on typical tall structures*, Lambert Academic Publishing, Saarbruecken 2011.

² Pietrzak J., *Shaping and structuring of high-rise office buildings in Europe*, „Challenges of modern technology” 2015, nr 6(2), s. 48–56.

Odpowiednia forma przestrzenna budynku jest istotnym czynnikiem determinującym jego odporność na oddziaływania aerodynamiczne wiatru. Interakcja forma - wiatr decyduje o przepływach mas powietrza wokół budynku i rozkładach ciśnienia wiatru na elewacjach³. Z optymalizacji kształtu wieżowca może wynikać m.in. znacząca oszczędność materiałów konstrukcyjnych, stąd struktury nośne takich obiektów są modyfikowane i optymalizowane, tak aby uzyskiwać rozwiązania ekonomiczne, przy jednoczesnym spełnieniu normowych warunków nośności i sztywności.

Badania oddziaływania wiatru na budynki wysokie są przedmiotem wielu prac i publikacji naukowych, uwzględniających trzy metody badawcze (empiryczną, normową oraz numeryczną)⁴. Większość szczegółowych opracowań odnosi się do ikonicznych realizacji o wysokości powyżej 200 m. Dla tych wieżowców obligatoryjne jest przeprowadzanie badań modelowych w tunelu aerodynamicznym. Przy projektowaniu niższych budynków (które stanowią ponad 96% europejskiej zabudowy wysokiej) obciążenia powstające na skutek oddziaływania wiatru można przyjmować wg PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1⁵ lub na podstawie badań modelowych. Dynamicznie rozwijane metody numeryczne nie stanowią jeszcze podstawy do podejmowania decyzji przy projektowaniu konstrukcji budynku wysokiego⁶.

Eliminowanie skutków niekorzystnego wpływu oddziaływania wiatru na budynek wymaga przeprowadzania optymalizacji aerodynamicznych. W efektywnie zaprojektowanym budynku wysokim forma przestrzenna i struktura nośna powinny tworzyć koherentne rozwiązanie, cechujące się zarówno jakością architektoniczno-estetyczną, jak i walorami techniczno-technologicznymi. W celu analizowania warunków dla takich wzajemnie zachodzących relacji, podjęto badania oddziaływania wiatru na budynek wysoki o nieregularnej bryle.

Poniżej opisano przeprowadzone badania w zakresie analizy oddziaływań wiatrowych na wysoki budynek biurowy przewidziany do realizacji w Warszawie. Wybrany obiekt stanowi nieregularną formę o wysokości nieprzekraczającej 200 metrów. Celem badawczym było porównanie wyników uzyskanych

³ Irwin P., Denoon R., Scott D., *Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings: An output of the CTBUH Wind Engineering Working Group*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Routledge / Taylor and Francis Group, Chicago 2013.

⁴ Flaga A., *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa 2008.

⁵ PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.

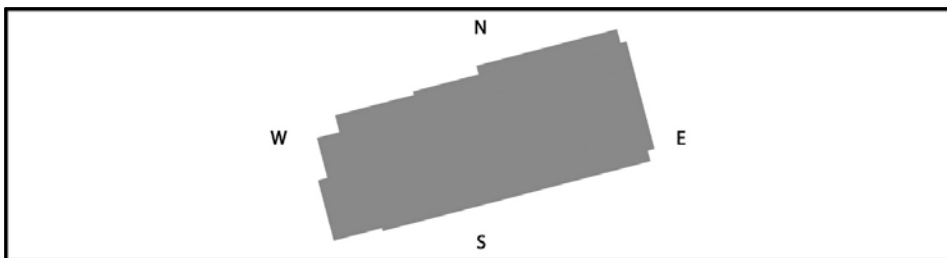
⁶ Pietrzak J., Rutkowski M., Wrona M., *Analizy normowe oraz badania modelowe oddziaływania wiatru na budynek wysoki o nieregularnej formie na przykładzie projektowanego wieżowca w Warszawie* (niepublikowana praca wykonana w ramach grantu dziekańskiego dla młodych naukowców i uczestników studiów doktoranckich Wydział Architektury PW w 2017 roku, Warszawa 2017.

z dwóch metod (obliczeń normowych⁷ oraz badań w tunelu aerodynamicznym). Porównanie przeprowadzono w zakresie obciążenia fasad, jak i sił przekazywanych na konstrukcję nośną budynku. Prezentowana analiza nawiązuje do badań modelowych, które zostały przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym na Politechnice Warszawskiej w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej⁸.

1. Warunki otoczenia

Projektowany wieżowiec o wysokości 198 m zostanie usytuowany w centrum Warszawy, w strefie intensywnej zabudowy. W pobliżu wybranej lokalizacji przebiegają główne arterie miasta oraz znajduje się ważny węzeł komunikacyjny, w którego skład wchodzi m. in. stacja metra. W tym rejonie wybudowano szereg różnorodnych obiektów o zróżnicowanej wysokości. W najbliższym otoczeniu budynku znajdują się wysokie biurowce, budynki mieszkalne oraz niskie centra handlowe. Od strony wschodniej (zobacz rysunek 1) przeważa zabudowa średnio wysoka lub niska. Od strony południowej znajdują się budynki kilkupiętrowe. Od strony północnej pojawia się kompleks budynków wysokich, a od zachodniej jest budowany kolejny.

Rysunek 1. Usytuowanie projektowanego budynku względem stron świata.



Źródło: opracowanie własne.

2. Charakterystyka budynku

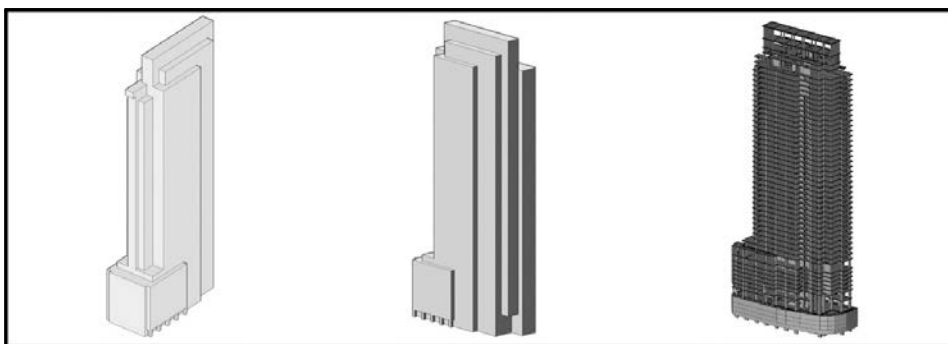
Budynek zawiera 46 kondygnacji nadziemnych oraz 2 podziemne. Maksymalna wysokość budynku wynosi 198 m. Kształt rzutu wieżowca zbliżony jest do prostokąta o wymiarach 85 x 36 m (zobacz rysunek 2). Budynek zaprojektowano w żelbetowej konstrukcji szkieletowej. W centralnej części rzutu jest usytuowany trzon stanowiący podstawowe usztywnienie. Udział powierzchni rzutu

⁷ Żurański J.A., Gaczek M., *Oddziaływania klimatyczne na konstrukcje budowlane według Eurokodu 1. Komentarz z przykładami obliczeń*, ITB, Warszawa 2011.

⁸ Uczelniane Centrum Badawcze Lotnictwa i Kosmonautyki PW, *Badania w tunelu aerodynamicznym oddziaływania wiatru na elewacje i konstrukcję budynku wieżowego [...] o wysokości 198 m w Warszawie* (niepublikowany raport z badań), Warszawa 2016.

trzonu w całkowitej powierzchni kondygnacji parteru wynosi około 25%. Trzon budynku pełni funkcje komunikacyjne oraz mieści szachty instalacyjne. Płyta fundamentowa o grubości 3,00 m jest odcinkowo wzmocniona sekcjami ściany szczelinowej. Słupy żelbetowe ustawiono na siatce o wymiarach 8,75 x 8,75 m, a ich maksymalne przekroje wynoszą 140 x 120 cm. Zaprojektowano zróżnicowane grubości ścian trzonu (30–90 cm) oraz stropów (26–28 cm). Przewidywana technologia wykonania wieżowca to beton monolityczny. Fasady budynku zaprojektowano jako przeszklone ściany kurtynowe o strukturze nośnej z aluminiowych profili.

Rysunek 2. Model projektowanego wieżowca.



Źródło: opracowanie własne.

3. Badania tunelowe

Celem badań przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym było m. in. probabilistyczne ustalenie działających na konstrukcję budynku wielkości obciążeń powodowanych wiatrem, a także określenie prawdopodobnego rozkładu ciśnień na elewacjach. W ramach badań przeprowadzono również analizę klimatyczną, która obejmowała wyznaczenie wartości charakterystycznych prędkości wiatru o okresie powrotu 50 lat, w podziale na 12 głównych kierunków. W analizie obciążeń zostały wykorzystane wyniki pomiarowe uzyskane ze stacji meteorologicznej (wieloletnie ekstremalne wartości prędkości wiatru).

Strukturę wiatru w przyziemiu odwzorowano modelując odpowiednio profil prędkości wiatru i rozkład intensywności turbulencji według normy PN-EN 1991-1-4: 2008 (zobacz rysunek 3). Teren, na którym planowana jest zabudowa, zgodnie z normą został zaliczony do kategorii IV (jako miejsce, którego minimum 15% jest pokryte budynkami o średniej wysokości przekraczającej 15 m). Wzory normowe zostały dostosowane do skali badanego modelu. Wykonane sprawdzające pomiary prędkości występujące w tunelu potwierdziły prawidłowe przyjęcie profil prędkości wiatru oraz rozkład intensywności turbulencji.

Przyjęto profil prędkości wg wzoru:

$$V/V_{10} = (z/10)^{0,24} \quad (1)$$

gdzie:

- V_{10} – prędkość wiatru na wysokości 10 m nad terenem [m/s],
- z – wysokość nad poziomem gruntu [m].

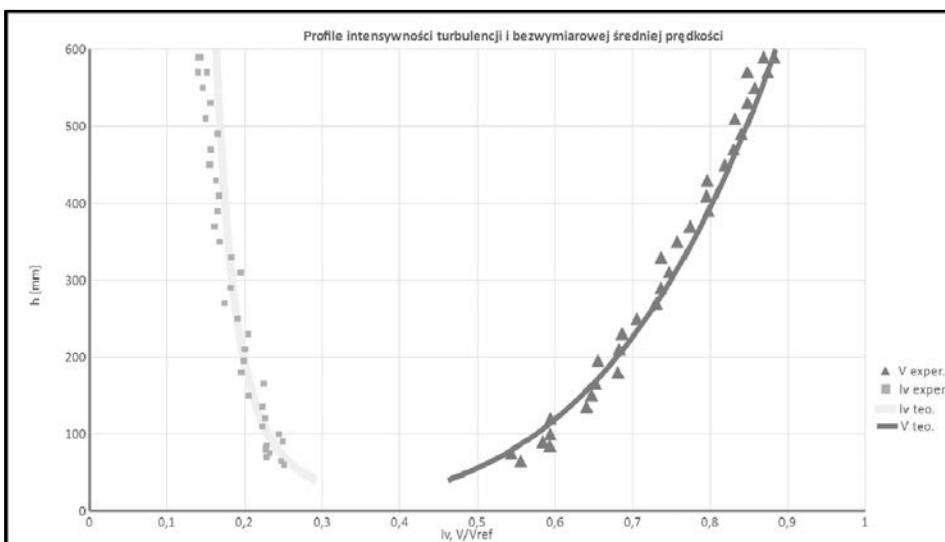
Natomiast pożądaną poziom intensywności turbulencji obliczono na podstawie zależności:

$$I_v(z) = l / \ln(z/z_0) \quad (2)$$

gdzie:

- $I_v(z)$ – intensywność turbulencji na wysokości z ,
- z – wysokość nad poziomem gruntu [m],
- z_0 – wysokość chropowatości [m].

Rysunek 3. Profile bezwymiarowej średniej prędkości wiatru V/V_{350} oraz intensywności turbulencji I_v : linia ciągła – pożądanane profile, punkty – wyniki uzyskane z pomiarów.



Źródło: Uczelniane Centrum Badawcze Lotnictwa i Kosmonautyki PW, *Badania w tunelu aerodynamicznym oddziaływania wiatru na elewacje i konstrukcję budynku wieżowego [...] o wysokości 198 m w Warszawie* (niepublikowany raport z badań), Warszawa 2016.

Model budynku wykonano w skali 1:350 (wraz z otoczeniem o zasięgu 500 m). Badania tunelowe przeprowadzono dla 36 kierunków wiatru. Uzyska-

no wartości ciśnień i sił na powierzchni projektowanego budynku, a następnie określono wartości sił działających na poszczególne piętra oraz wielkości sił wypadkowych działających na budynek.

4. Przeprowadzone własne badania i analizy

W przeprowadzonych badaniach wykonano analizę obciążeń wiatrem zgodnie z normą PN-EN 1991-1-4:2008. Wyznaczono szczytowe wartości ciśnienia prędkości q_p , w zależności od rzędnej oraz kierunku wiatru. Uzyskane dane posłużyły do otrzymania obwiedni ciśnienia wiatru działającego na fasady budynku oraz obciążenia siłami skupionymi. Ze względu na zróżnicowanie współczynnika kierunkowego c_{dir} dla 12 kierunków, a nie jak przyjęto w badaniach tunelowych 36 kierunków, każdemu kierunkowi normowemu odpowiadają 3 kierunki doświadczalne. Wielkości ciśnień uzyskano z przyjęciem współczynnika ciśnienia zewnętrznego $C_{pe,1}$, zgodnie z tabelą 1 oraz współczynnika ciśnienia wewnętrznego C_{pi} jako mniej korzystną z dwóch wartości: + 0,2 (parcie) lub -0,3 (ssanie).

Wypadkowe siły działające na konstrukcję wg PN-EN określono z iloczynu wartości szczytowych ciśnień prędkości, współczynnika konstrukcyjnego $c_s c_d$ (zmienny dla każdego kierunku) oraz współczynnika ciśnienia zewnętrznego $C_{pe,10}$ (zobacz tabela 2).

Następnie dokonano całkowania wartości obciążenia wiatrem po powierzchni fasad budynku. W przypadku fasad równoległych do kierunku wiatru, dla uniknięcia równoważenia się sił, przyjęto założenie całkowania obciążenia tylko na jednej z dwóch fasad. W ten sposób na każdej kondygnacji otrzymano siły skupione w dwóch kierunkach X oraz Y.

Tabela 1. Wartości współczynnika $C_{pe,1}$.

A	B	C	D	E
-1,4	-1,1	-0,5	+1,0	-0,7

Źródło: Opracowanie własne na podstawie PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.

Tabela 2. Wartości współczynnika $C_{pe,10}$.

A	B	C	D	E
-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,7

Źródło: Opracowanie własne na podstawie PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.

5. Porównanie normowych ciśnień szczytowych oddziaływania wiatru z wielkościami uzyskanymi w badaniach tunelowych

Wartości ciśnień otrzymane z badań tunelowych zestawiono z ciśnieniami uzyskanymi wg PN-EN. Z uwagi na bardziej równomierny rozkład ciśnienia niezależnie analizowano fasady długie (północna i południowa) oraz fasady krótkie (wschodnia i zachodnia), a także naroża, gdzie pojawiają się największe wartości ciśnień. W porównaniu do przeprowadzonych badań ciśnienia generowane na fasadach długich są znacząco większe od ciśnień obliczonych według normy PN-EN. W tabelach 3 i 4 pokazano wartości ciśnień dla dłuższych fasad północnej i południowej (po zignorowaniu ciśnień w strefach narożnikowych). Dla fasady północnej przedstawiono ciśnienia dla najdłuższego jej odcinka. Należy tutaj nadmienić, że dla oceny aerodynamiki budynku, najbardziej miarodajne są porównania wyników normowych i doświadczalnych dla przypadku wiatrów wiejących z kierunków południowych. Wynika to z minimalnej, praktycznie pomijalnej liczby przeszkód zakłócających przepływ wiatru.

Tabela 3. Wartości ciśnień dla fasady północnej.

Fasada N	parcie [kPa]		ssanie [kPa]	
	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań
kondygnacja 10	0.83	0.37 - 0.53	0.55 - 1.02	0.41 - 0.60
kondygnacja 30	0.91	0.44 - 0.55	0.60 - 1.12	0.38 - 0.78
kondygnacja 45	1.12	0.71 - 0.79	0.74 - 1.38	0.41 - 0.68

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Wartości ciśnień dla fasady południowej.

Fasada S	parcie [kPa]		ssanie [kPa]	
	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań
kondygnacja 10	0.65	0.16 - 0.38	0.57 - 1.02	0.55 - 0.68
kondygnacja 30	0.72	0.33 - 0.46	0.63 - 1.12	0.55 - 0.67
kondygnacja 45	0.88	0.35 - 0.45	0.78 - 1.38	0.63 - 0.68

Źródło: opracowanie własne.

Dla krótszych fasad (wschodnia i zachodnia) wartości parcia i ssania wiatru wg badań były bardziej zbliżone do normowych (zobacz tabela 5).

Tabela 5. Wartości ciśnień dla fasady wschodniej.

Fasada E	parcie [kPa]		ssanie [kPa]	
	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań
kondygnacja 10	0.50	0.27 - 0.50	0.83÷1.02	0.73 - 1.03
kondygnacja 30	0.55	0.38 - 0.57	0.88÷1.12	0.62 - 0.95
kondygnacja 45	0.68	0.35 - 0.53	1.09÷1.38	0.61 - 0.70

Źródło: opracowanie własne.

Porównując dalej wartości ciśnień można zauważyć, iż różnice występujące w narożach i załamaniach fasad są niewielkie (zobacz tabela 6).

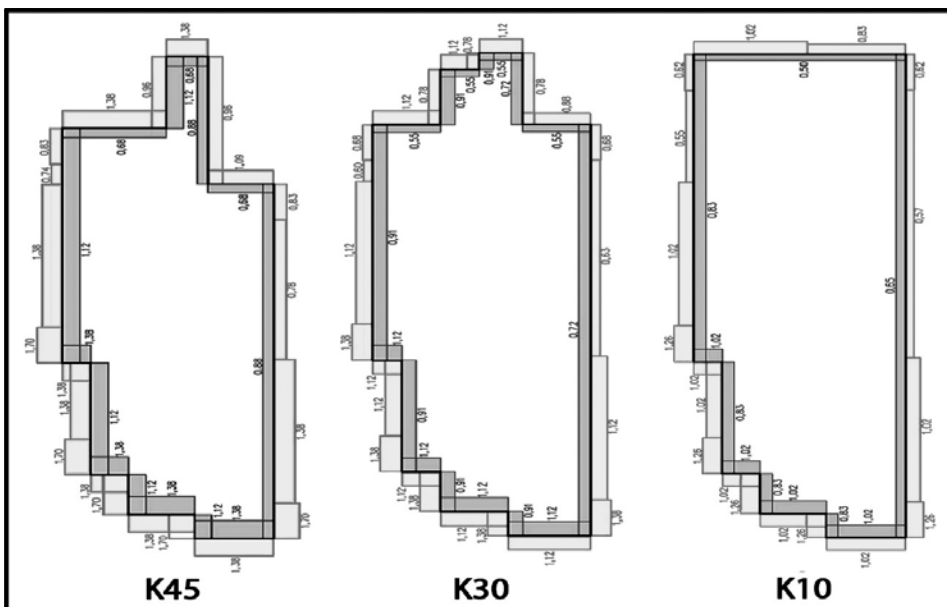
Tabela 6. Wartości ciśnień dla wybranych naroży i załamania fasady.

Kondygnacja 30	ssanie [kPa]	
	wg PN-EN	wg badań
narożnik N-E	0.68	0.60
narożnik S-E	0.68	0.71
załamanie na fasadzie N	1.38	1.35
załamanie na fasadzie W	1.12	1.09

Źródło: opracowanie własne.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że największe różnice pomiędzy maksymalnymi wartościami ciśnień normowych a pomierzonych w tunelu aerodynamicznym występują dla fasady południowej i prostoliniowej w planie części fasady północnej. W przypadku krótkich fasad wschodniej i zachodniej oraz w okolicach naroży i załamania wyniki są podobne. Rygorystyczne założenia normowe dotyczące krawędzi i załamania budynku w odniesieniu do krótkich lub załamanych w planie fasad (fasady wschodnia i zachodnia i uskoki na fasadzie północnej) zostały potwierdzone doświadczalnie.

Rysunek 4. Obwiednie ciśnień na kondygnacjach 10, 30 i 45.



Źródło: opracowanie własne.

Analiza obwiedni ciśnień dla poszczególnych fasad (zobacz rysunek 4) jest bardzo istotna z uwagi na projektowanie okładzin zewnętrznych budynku. Najbardziej efektywna optymalizacja może dotyczyć fasady południowej budynku oraz płaskiej (bez załamania w planie) części fasady północnej, na których różnice pomiędzy wartościami ciśnień normowych i otrzymanych z badań są największe.

W analizie ciśnień należy zwrócić uwagę na charakter wykresu obwiedni ciśnień, który ma wyraźnie zmienny przebieg, zwłaszcza dla łamanej linii fasady północnej oraz na krótkich fasadach wschodniej i zachodniej. Dlatego w analizie oddziaływań, tak istotne jest prawidłowe scałkowanie ciśnień dla uzyskania wielkości sił wypadkowych.

6. Porównanie sił wypadkowych działających na konstrukcję budynku

Po analizie wielkości sił wypadkowych działających na budynek wysoki obliczonych wg PN-EN oraz sił uzyskanych w badaniach tunelowych, można zauważyć wyraźny wpływ otaczającej zabudowy na wielkości sił wiatrowych. Wielkości sił wypadkowych obliczonych dla wiatrów wiejących z kierunku północnego (300°, 340°, 0° – zobacz tabela 8) znacząco się różnią. Wynika to z uwzględnienia w badaniach tunelowych przesłaniania projektowanego budynku przez sąsiedni wieżowiec. Wpływ otoczenia jest również istotny w anali-

zie wiatrów wiejących z kierunków zachodnich (210°, 240°, 270° – zobacz tabela 8). Oddziaływanie planowanej zabudowy wysokiej powoduje znaczące różnice w wielkościach sił obliczonych wg normy w porównaniu do uzyskanych w wyniku badań tunelowych. Przy wiatrach z kierunków południowo-wschodnich (90°, 120°, 160° – zobacz tabela 7) wielkości sił określone na podstawie tunelowych badań aerodynamicznych oraz wielkości obliczone normowo są zbliżone. Od tej strony nie ma wysokich budynków, które mogłyby przesłaniać wieżowiec.

Tabela 7. Porównanie sił wypadkowych działających na konstrukcję budynku.

	Kierunek 30°				Kierunek 120°			
	Fx [kN]		Fy [kN]		Fx [kN]		Fy [kN]	
	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań
kondygnacja 10	-53.99	2.30	181.83	28.50	53.99	-16.80	-	-
							181.83	192.40
kondygnacja 30	-42.04	11.40	141.58	36.70	42.04	-2.80	-	-
							141.58	129.10
kondygnacja 45	-56,56	18,40	190,48	50,40	56.56	7.70	-	-
							190.48	138.30

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 8. Porównanie sił wypadkowych działających na konstrukcję budynku.

	Kierunek 270°				Kierunek 300°			
	Fx [kN]		Fy [kN]		Fx [kN]		Fy [kN]	
	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań	wg PN-EN	wg badań
kondygnacja 10	-	-	247.88	108.10	-	-81,00	398,76	167,60
	159.91	100.10			118.40			
kondygnacja 30	-	-56.00	193.01	82.50	-92.19	-49,30	310,49	126,10
	124.51							
kondygnacja 45	-	-95.80	259.68	76.90	-	-32,90	417,74	165,20
	167.52				124.04			

Źródło: opracowanie własne.

Wnioski

W niniejszym referacie porównano wielkości obciążeń powodowanych oddziaływaniami wiatru dla modelu normowego bez zdefiniowanego otoczenia z wielkościami obciążeń mierzonymi w tunelu aerodynamicznym z przewidy-

waną zabudową. Przeprowadzona analiza porównawcza służyła do weryfikacji obciążeń przyjętych wg PN EN w odniesieniu do wyników badań tunelowych.

W porównaniu normowych obciążeń wiatrowych z wielkościami uzyskanymi z badań, przy analizie kierunków północnego oraz zachodniego, różnice w efektach tych oddziaływań są znaczące. Szczególnie duże różnice zauważalne są podczas analizy sił wypadkowych działających na budynek.

Podczas analizy ciśnień występujących na elewacjach budynku stwierdzono możliwość optymalizacji w odniesieniu do fasady południowej i w części fasady północnej. W przypadku pozostałych fasad założenia normowe zostały w zasadzie potwierdzone doświadczalnie. Wypadkowe siły powstałe po scałkowaniu pomierzonych doświadczalnie ciśnień są znacznie mniejsze niż siły założone zgodnie z PN EN. Przy analizie sił wypadkowych bardzo widoczny jest wpływ zabudowy sąsiedniej i powstającego „cienia aerodynamicznego” na wartości sił działających na budynek.

Z przeprowadzonych analiz wynika, iż wychylenia trzonu budynku przy obciążeniach wiatrowych wg PN-EN są większe niż według badań doświadczalnych. Przykładowo, przy przyjęciu obciążeń normowych maksymalne przemieszczenie trzonu od oddziaływań wiatru z kierunku północnego wynosi 24 cm (1/850 H), natomiast w przypadku analizowania wychylenia od obciążeń uzyskanych doświadczalnie tylko 13 cm (około 1/1550H).

Wyniki uzyskane z badań doświadczalnych, jako bardziej miarodajne, mogą stanowić podstawę do przyjmowania niższych wartości obciążeń wiatrem, co dotyczy szczególnie projektowania fasad budynku o nieregularnych bryłach i rzutach. Budynki wysokie o nieregularnej formie często projektowane są z dużym zapasem bezpieczeństwa. Wynika to przede wszystkim z projektowania według procedur normowych, które nie określają sposobu postępowania w przypadku skomplikowanej geometrii budynku, co uniemożliwia określenie bardziej dokładnych charakterystyk obciążeń powstających na skutek oddziaływania wiatru.

Optymalizacja formy budynku wysokiego wymaga przede wszystkim spełnienia warunków dokładnego rozpoznania oddziaływań wiatru na budynki. Analizy aerodynamiczne powinny być wprowadzane jeszcze na etapie opracowywania koncepcji, kiedy możliwe są zmiany geometrii budynku, a nie tylko przekrojów elementów konstrukcyjnych i elewacji.

Bibliografia

1. Boda D. K., Banda L. S., *Wind effects on typical tall structures*, Lambert Academic Publishing, Saarbruecken 2011.
2. Flaga A., *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa 2008.

3. Irwin P., Denoon R., Scott D., *Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings: An output of the CTBUH Wind Engineering Working Group*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Routledge / Taylor and Francis Group, Chicago 2013.
4. PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.
5. Pietrzak J., Rutkowski M., Wrona M., *Analizy normowe oraz badania modelowe oddziaływania wiatru na budynek wysoki o nieregularnej formie na przykładzie projektowanego wieżowca w Warszawie* (niepublikowana praca wykonana w ramach grantu dziekańskiego dla młodych naukowców i uczestników studiów doktoranckich Wydział Architektury PW w 2017 roku, Warszawa 2017.
6. Pietrzak J., *Shaping and structuring of high-rise office buildings in Europe*, „Challenges of modern technology” 2015, nr 6(2), s. 48-56.
7. Uczelniane Centrum Badawcze Lotnictwa i Kosmonautyki PW, *Badania w tunelu aerodynamicznym oddziaływania wiatru na elewacje i konstrukcję budynku wieżowego [...] o wysokości 198 m w Warszawie* (niepublikowany raport z badań), Warszawa 2016.
8. Żurański J.A., Gaczek M., *Oddziaływania klimatyczne na konstrukcje budowlane według Eurokodu 1. Komentarz z przykładami obliczeń*, ITB, Warszawa 2011.

Streszczenie

W referacie nawiązano do przeprowadzonych analiz oddziaływania wiatru na wieżowiec o nieregularnym rzucie i wysokości nieprzekraczającej 200 m. Celem badawczym było porównanie przyjmowanych normowych wartości obciążeń wiatrem, w stosunku do wartości uzyskanych w badaniach modelowych. Porównanie przeprowadzono w zakresie ciśnień szczytowych wiatru działających na fasady oraz sił wypadkowych działających na konstrukcję budynku. Zasadnicze różnice wynikały z braku uwzględnienia wpływu sąsiedniej zabudowy w obliczeniach wg PN-EN. Wypadkowe siły powstałe po scałkowaniu pomierzonych doświadczalnie ciśnień były znacznie mniejsze niż siły założone zgodnie z PN EN. Można stwierdzić, że wyniki uzyskane z badań doświadczalnych, jako opracowania bardziej miarodajne, mogą stanowić podstawę do przyjmowania mniejszych wartości obciążeń.

Summary

In the paper there is reference to the analysis of wind influence on the skyscraper of an irregular plan and the height not exceeding 200 metres. The aim of the research was the comparison of wind load values based on eurocodes in

relation to the results of experimental research carried out in an aerodynamic tunnel. The comparison concerned wind spike pressure influencing the facades of the building and resultant forces acting on its structure. The major differences of force values calculated in accordance with euro codes and these obtained from experimental research resulted from not taking into account the influence of neighbouring buildings in calculations based on PN-EN. The resultant forces arising from the integration of experimentally measured pressure were significantly smaller than those calculated in accordance with PN-EN. To conclude, one might state that the results obtained from experimental research - as more reliable ones - could be the basis for assuming smaller wind loads.

Informacje o autorach

prof. nadzw. dr hab. inż. Wiesław Rokicki
Politechnika Warszawska
Wydział Architektury
wrokicki@poczta.fm

mgr inż. arch. Joanna Pietrzak
Politechnika Warszawska
Wydział Architektury
joanna.pietrzak@pw.edu.pl

mgr inż. Mariusz Wrona
Politechnika Warszawska
Wydział Architektury
m.wrona@proinvest.waw.pl