

Oddziaływanie wiatru na dachy płaskie

Tomasz Lipecki

*Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono zagadnienie oddziaływania wiatru na prostokątne dachy płaskie budynków średniej wysokości i wysokich. Wyznaczono rozkłady powierzchniowe współczynników średniego ciśnienia C_p na powierzchni takich dachów. Analizy przeprowadzono na podstawie badań modelowych, które zostały wykonane w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną znajdującym się w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. Przedmiotem badań były pionowe sztywno zamocowane w podłodze tunelu aerodynamicznego na stole obrotowym modele prostopadłościennych, o dwóch stosunkach wymiarów boków przekroju poprzecznego: 1:2 oraz 1:4. Pomiarów ciśnień powierzchniowych przeprowadzono dla pełnego kąta natarcia wiatru na modele od 0° do 90° , co 15° . Zbadano wpływ struktury wiatru na rozkłady ciśnień, uwzględniając sześć znacząco różniących się przypadków napływu.

Słowa kluczowe: tunel aerodynamiczny, badania modelowe, oddziaływanie wiatru, współczynniki aerodynamiczne ciśnień, dachy płaskie

1. Wprowadzenie

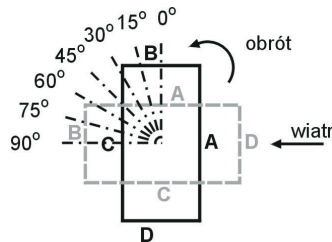
Zagadnienie oddziaływania wiatru na dachy płaskie jest dość szeroko analizowane w literaturze przedmiotu. Przeprowadzono zarówno badania modelowe, pomiary w skali naturalnej jak również symulacje komputerowe, głównie z wykorzystaniem technik CFD. Uematsu i in. [1, 2] wykonali pomiary ciśnień powierzchniowych i prędkości wiatru wokół dachów płaskich niskich budynków o przekrojach kołowych, zaś Fu i in. [3] przeprowadzili podobne badania w odniesieniu do budynków o przekrojach kwadratowych i prostokątnych. Ciekawe wyniki dotyczące wpływu attyk na ciśnienia i prędkości wiatru na dachu przedstawił Stathopoulos i in. [4]. Cao i in. [5] rozważali natomiast kilkupoziomowe dachy płaskie. Pindado i in. [6] badali w tunelu wpływ interferencji sąsiednich budynków na rozkłady ciśnień i prędkości wiatru na płaskim dachu. Bardzo szerokie pomiary w skali rzeczywistej na sześciu boku 6 m, dla kąta natarcia 0° przeprowadzili Richards i Hoxey [7, 8] tworząc potężną bazę danych mogących posłużyć do walidacji modeli numerycznych. Problem tzw. wirów stożkowych (wierzchołkowych) powstających nad dachem i powodujących pojawienie się dużego ssania na jego powierzchni, przy kącie natarcia wiatru różnym od 0° poruszali m.in.: Banks i in. [9], Wu i in. [10], Banks i Meroney [11], Kawai [12], Ono i in. [13], Tryggesson i Lyberg [14], Li i in. [15].

W niniejszej pracy przedstawiono badania modelowe współczynników średniego ciśnienia C_p na dachach płaskich, w zależności od struktury oraz kąta natarcia wiatru. Badania przeprowadzono na czterech modelach prostopadłościennych o stosunku wymiarów boków przekroju 1:2 oraz 1:4 i różnej smukłości całego modelu. Zmierzono ciśnienia dynamiczne na powierzchniach górnych modeli i na ich podstawie, po uśrednieniu i znormalizowaniu określono średnie współczynniki ciśnienia dynamicznego.

2. Badania modelowe

Badania obejmowały sześć wariantów struktury wiatru, opisanej znacząco różniącymi się równaniami: pionowego profilu średniej prędkości, pionowego profilu turbulencji, gęstości widmowej mocy. W niniejszej pracy rozróżnienie struktury wiatru opisano za pomocą nazw: profil 1 – profil 6 (por. Rys. 3-7). Odpowiednią strukturę wiatru uzyskano za pomocą metody biernej Counihana [16, 17] wykorzystującej elementy turbulizujące, takie jak bariery i iglice ustawione na wlocie do obszaru pomiarowego oraz klocki wysuwane z podłogi w obszarze pomiarowym. Szczegółowy opis badań nad strukturą wiatru przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym przedstawiono m.in. w pracach: Bęc i in. [18], Lipecki i Jamińska [19].

Jako modele badawcze przyjęto cztery prostopadłościanny o stosunku wymiarów boków przekroju 1:2 oraz 1:4, o wymiarach zestawionych w Tabeli 1, gdzie D , B – krótszy i dłuższy wymiar boku przekroju poprzecznego, H – wysokość modelu. Modele zamontowano pionowo w centralnej części obszaru pomiarowego na stole obrotowym, umożliwiającym obrót w zakresie kąta $\alpha = 0^\circ$ - 90° , co 15° . W położeniu początkowym modele zostały ustawione dłuższym bokiem (B) prostopadłe do napływu (Rys. 1).



Rys. 1. Definicja kąta natarcia wiatru

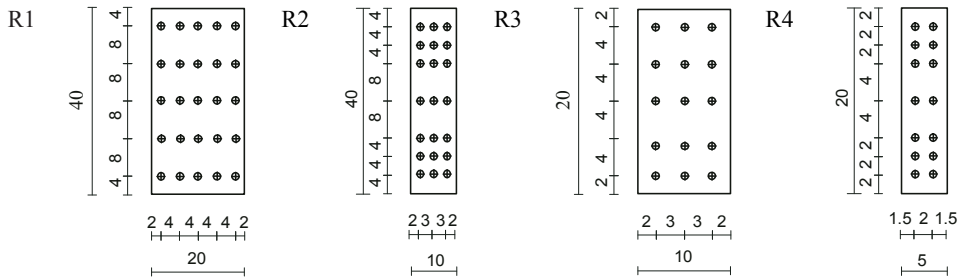
Tabela 1. Wymiary geometryczne modeli prostopadłościennych

Model	H	B	D	H/B	B/D
	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[-]
R1	100	40	20	2.5	2
R2	100	40	10	2.5	4
R3	100	20	10	5	2
R4	100	20	5	5	4

Na powierzchniach bocznych i górnej zamontowano czujniki, które zostały połączone za pomocą silikonowych rurek z piezorezystywnymi skanerami ciśnienia, które następnie przesyłały dane do urządzenia archiwizującego. Na powierzchniach górnych zainstalowano, w zależności od wymiarów modeli od 14 do 25 czujników rozmieszczonych według schematów pokazanych na Rys. 2. Ciśnienia dynamiczne na powierzchniach modeli mierzone były z częstotliwością 200 Hz, w czasie 30 s, dzięki czemu uzyskano 6000 próbek. Dokładność pomiarowa zastosowanego systemu wynosiła 0,1% i nie mniej niż 0,1 Pa. Zmierzone ciśnienia dynamiczne zostały uśrednione w czasie i unormowane do średniego współczynnika ciśnienia dynamicznego C_p zgodnie ze wzorem:

$$C_p = p/p_0, \quad (1)$$

w którym: p , p_0 – średnie ciśnienia dynamiczne, odpowiednio w danym punkcie na powierzchni dachu oraz referencyjne, zmierzone przed modelem, w obszarze przepływu niezaburzonego, na wysokości 70 cm. Szczegółowe informacje na temat pomiarów ciśnień przedstawiono w pracach Lipecki i in. [20, 21].

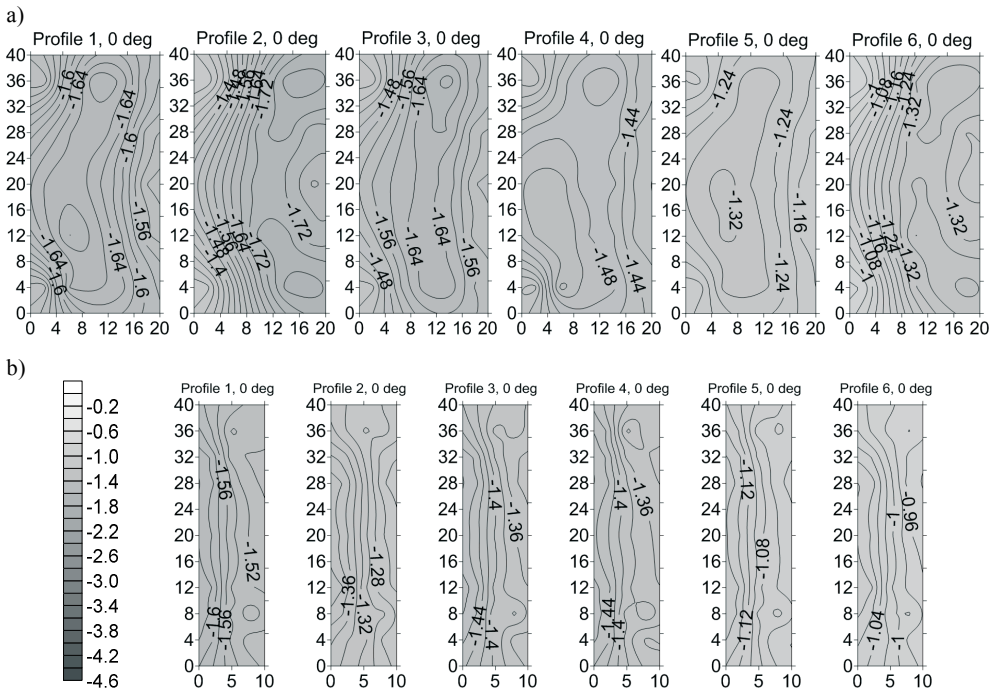


Rys. 2. Rozmieszczenie czujników ciśnienia na powierzchniach górnych prostokątów, wymiary modeli zostały podane w centymetrach

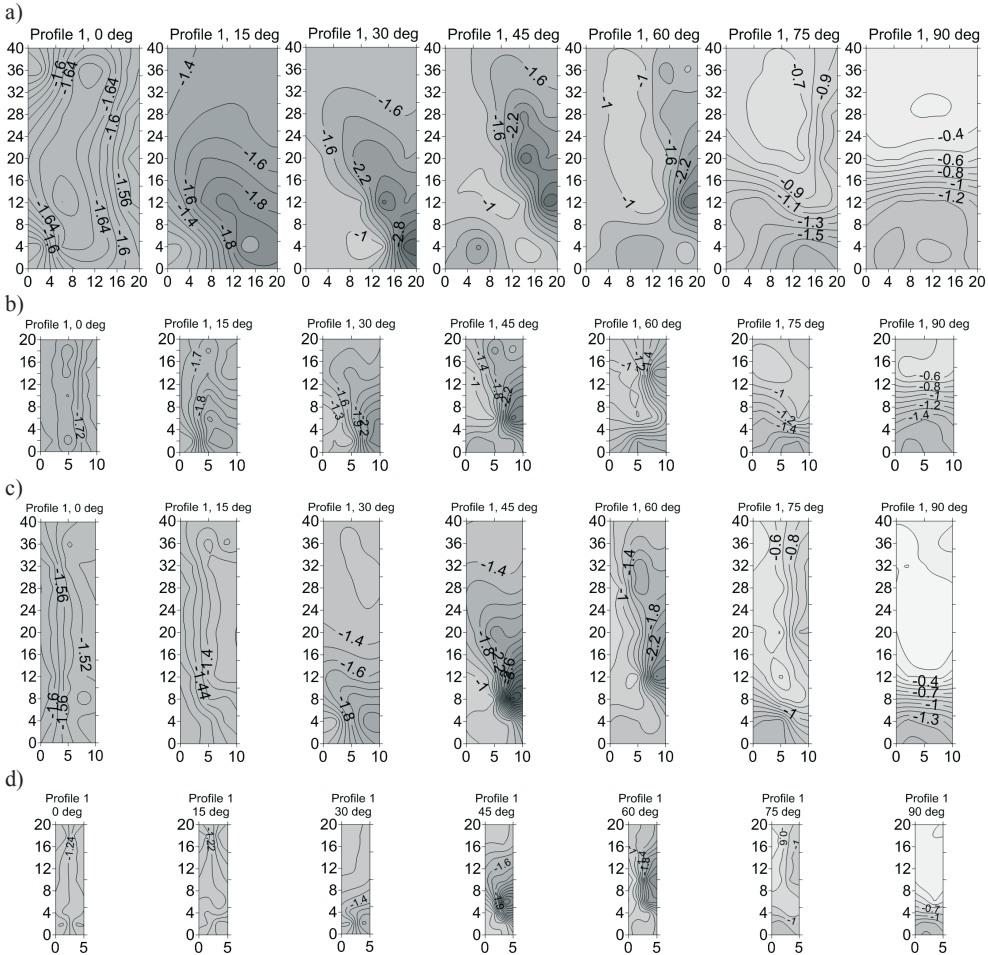
3. Rozkłady współczynników ciśnień średnich na dachach płaskich

Przykładowe rozkłady współczynników ciśnień średnich w zależności od struktury wiatru, dla kąta natarcia 0° (dłuższa ściana prostopadła do napływu – por. Rys. 1) i modeli R1 i R2 przedstawiono na Rys. 3, zaś w zależności od kąta natarcia wiatru α , dla profilu 1 i wszystkich modeli na Rys. 4. Osie pionowe i poziome odpowiadają wymiarom dachów modeli w cm. We wszystkich przypadkach na dachach uzyskano ssanie, dla którego na każdym z zamieszczonych wykresów zastosowano taką samą skalę: $C_{pmax} = 0$, $C_{pmin} = -4.6$.

Jak wynika z Rys. 3-4 rozkłady powierzchniowe ciśnień są podobne w każdym przypadku napływającego powietrza, zarówno pomiędzy dwoma modeli o tym samym stosunku boków B/D jak i modelami o różnych B/D , przy czym należy zauważyć, że różnice między modelami częściowo wynikają z innego rozmieszczenia czujników pomiarowych.



Rys. 3. Rozkłady przestrzenne C_p na dachach w zależności od struktury wiatru, dla kąta natarcia wiatru 0° , w przypadku: a) modelu R1, b) modelu R2

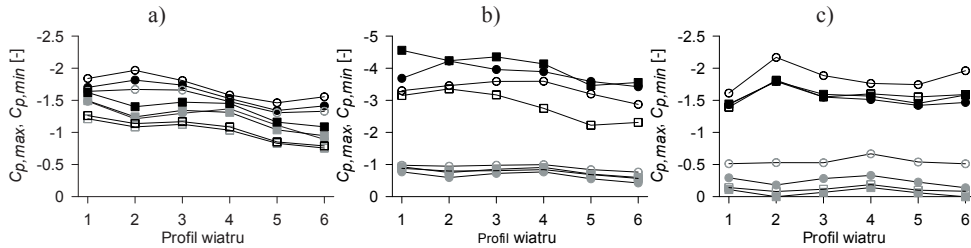


Rys. 4. Rozkłady przestrzenne C_p na dachach w zależności od kąta natarcia wiatru α , dla profilu 1, w przypadku: a) modelu R1, b) modelu R3, c) modelu R2, d) modelu R4

Analizując rozkłady można zauważyć, że większe ssanie pojawia się w przypadku kąta natarcia α równego 90° niż 0° , dla większości napływów, za wyjątkiem napływu 1 (Rys. 4), który jest scharakteryzowany przez najniższy wykładnik we wzorze opisującym pionowy profil wiatru, a więc odpowiada terenowi o charakterze najbardziej zbliżonym do otwartego. Taka tendencja ma miejsce w przypadku obu grup modeli 1:2 i 1:4, przy czym różnice są wyraźniejsze dla modeli mniejszych R3 i R4.

Dużo większe zmiany wartości współczynnika C_p wzdłuż dachu można zaobserwować dla kąta 90° , a więc położeniu, w którym ścianą nawietrzną jest ściana krótsza. Występuje w tym przypadku znaczna redukcja ssania w obszarze w pobliżu krawędzi zawietrznej, gdzie odrywająca się z krawędzi nawietrznej warstwa przyścienna przylega ponownie do powierzchni modelu. Zmiany wartości współczynników ciśnienia na dachach w zależności od wariantu napływającego powietrza, dla kątów natarcia wiatru 0° , 45° oraz 90° pokazano na Rys. 5. Współczynniki $C_{p,max}$ oraz $C_{p,min}$ oznaczają wartości odpowiednio największego i najmniejszego ssania. Największa różnica między $C_{p,max}$ oraz $C_{p,min}$ wynosząca 0,603 występuje dla modelu R1 i profilu 2, w przypadku kąta $\alpha = 0^\circ$, oraz 1,796, dla modelu R2

i profilu 2, w przypadku kąta $\alpha = 90^\circ$. W większości przypadków największe ssanie uzyskano dla profilu 2, natomiast najmniejsze dla profili 5 i 6 scharakteryzowanych przez wysoki wykładnik opisujący pionowy profil wiatru oraz wysoki poziom turbulencji. Największe różnice pomiędzy wartościami $C_{p,max}$ zmierzonymi dla różnych profili, dla poszczególnych modeli wynoszą: R1: 0,473, R3: 0,534, R2: 0,506, R4: 0,472, w przypadku kąta $\alpha = 0^\circ$ oraz R1: 0,373, R3: 0,353, R2: 0,726, R4: 0,420, w przypadku $\alpha = 90^\circ$. Uogólniając większe różnice między profilami wystąpiły dla $\alpha = 0^\circ$, a więc gdy ściana dłuższa jest nawietrzna

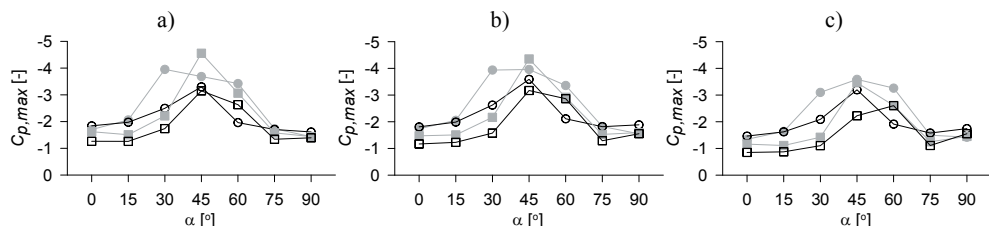


Rys. 5. Wartości największe $C_{p,max}$ (kolor czarny) i najmniejsze $C_{p,min}$ (kolor szary) współczynnika ssania na dachach w zależności od wariantu struktury wiatru i dla kąta natarcia α równego: a) 0° , b) 45° , c) 90° , ● – model R1, ○ – model R3, ■ – model R2, □ – model R4

Przy analizowaniu napływu na dachy płaskie okazuje się, że przy pewnych kątach natarcia wiatru różnych od prostopadłych do ścian można zauważyć obszary, w których powstaje znaczne ssanie, spowodowane tzw. wirami stożkowymi (wierzchołkowymi). W przeprowadzonych badaniach znacznie zwiększone obszary ssania zauważono dla modeli 1:2, dla kątów w zakresie $\alpha = 15^\circ$ - 60° i dla modeli 1:4, dla kątów w zakresie $\alpha = 30^\circ$ - 60° . Największe ssanie pojawia się przeważnie dla $\alpha = 45^\circ$. Wartości największego współczynnika ssania wraz z kątem natarcia, dla którego go uzyskano zestawiono w Tabeli 2, zaś na Rys. 5b pokazano różnice pomiędzy największymi i najmniejszymi wartościami współczynnika dla $\alpha = 45^\circ$. Na Rys. 6 w celu zobrazowania wzrostu wartości współczynnika ssania wywołanego wirami wierzchołkowymi przedstawiono zależność $C_{p,max}$ od kąta natarcia wiatru α . Jak wynika z wykresu większe wartości współczynnika uzyskano dla modeli R1 i R2, a więc większych.

Tabela 1. Maksymalne wartości współczynnika ssania $C_{p,max}$ z odpowiadającym im kątem natarcia wiatru.

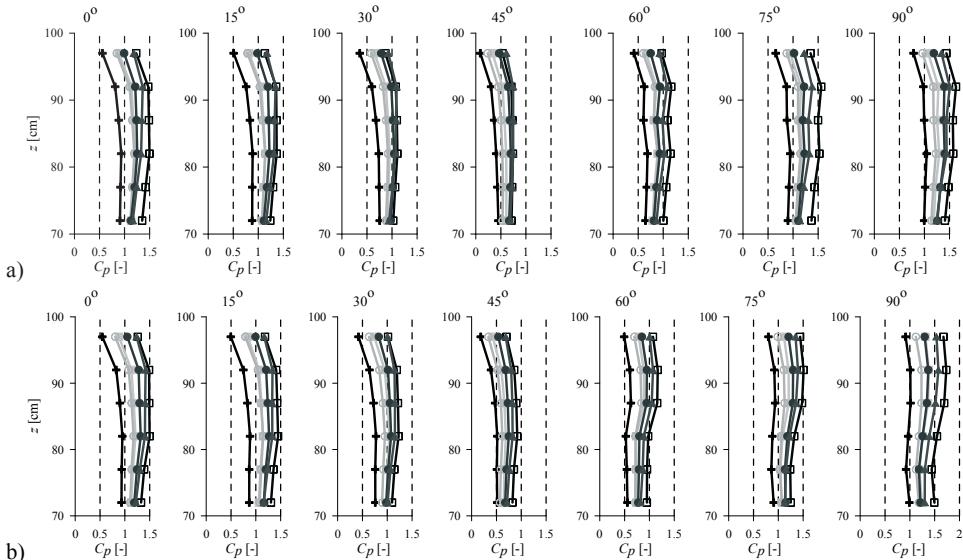
	1:2						1:4						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
R1	-3,95	-4,22	-3,96	-3,89	-3,59	-3,42	R2	-4,56	-4,23	-4,35	-4,13	-3,46	-3,55
α	30°	45°	45°	45°	45°	45°	α	45°	45°	45°	45°	45°	45°
R3	-3,30	-3,46	-3,59	-3,59	-3,20	-2,87	R4	-3,15	-3,35	-3,17	-2,93	-2,60	-2,43
α	45°	45°	45°	45°	45°	45°	α	45°	45°	45°	60°	60°	60°



Rys. 6. Zmiany największych wartości współczynnika ssania $C_{p,max}$ w zależności od kąta natarcia wiatru, ● – model R1, ○ – model R3, ■ – model R2, □ – model R4

Największy wzrost współczynnika ssania występuje na dachu bezpośrednio przy krawędzi nawietrznej ($\alpha = 15^\circ$ i 30°). Przy wyższych kątach natarcia wiatru 45° i 60° obszar maksymalnego ssania jest nieznacznie przesunięty w kierunku dłuższej krawędzi dachu, która staje się krawędzią boczną w stosunku do napływu. W przypadku modelu R1 wzrost ssania dla 15° i 30° występuje dokładnie w narożu, a nieznaczne przesunięcie na rozkładach powierzchniowych (Rys. 4) wywołane jest lokalizacją czujnika ciśnienia 4 cm od krawędzi krótszej. Dla kątów 45° i 60° największe ssanie pojawia się około 12 cm od krawędzi krótszej, a więc w $0,3B$. Podobne zależności można zaobserwować dla modelu R3. W przypadku modelu R2 (1:4) i kąta 30° największe ssanie pojawia się w narożu nawietrznym, dla kąta 45° jest odsunięte o 8 cm od krawędzi krótszej, a więc w $0,2B$, zaś dla 60° jest zlokalizowane 12 cm od krawędzi krótszej, a więc w $0,3B$. Podobne lokalizacje uzyskano dla modelu R4, ale dla kąta 60° największe ssanie było przesunięte do $0,4B$.

Wskutek trójwymiarowego opływu wokół swobodnego wierzchołka modelu na poziomach górnych ścian pionowych zaobserwowano redukcję współczynników ciśnienia. Zmniejszenie wartości C_p występuje głównie na ścianie nawietrznej. Na Rys. 7 przedstawiono zmiany wartości współczynnika parcia od wysokości 72 cm, czyli ok. 1/3 wysokości modelu do 97 cm, a więc poziomu ostatniego obwodu zainstalowanych czujników na ścianach pionowych. Rozkłady współczynnika C_p pokazano wzdłuż linii przechodzącej przez środek ściany nawietrznej. W przypadku kątów natarcia wiatru w zakresie 0° - 45° była to ściana dłuższa, zaś w przypadku kątów 60° - 90° krótsza. Znaczny spadek wartości C_p pojawia się od wysokości ok. 92 cm (poziom czujników) i jest podobny dla każdej struktury wiatru. Spadek C_p jest wyraźniejszy, gdy ściana dłuższa jest nawietrzną, a więc kątów 0° - 45° . W przypadku modeli 1:4 i kątów 60° - 90° w zasadzie nie ma spadku wartości C_p (R2) lub jest nawet nieznaczny ich wzrost (R4). Więcej informacji na temat rozkładów ciśnień na ścianach pionowych przedstawiono w pracach Lipecki i in. [20, 21].



Rys. 7 : Zmniejszenie wartości C_p na ścianie nawietrznej w pobliżu dachu, a) model R1, b) model R2,

+ – profil 1, □ – profil 2, ■ – profil 3, ○ – profil 4, ● – profil 5, ▲ – profil 6

4. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów w tunelu aerodynamicznym dotyczące ciśnień na powierzchniach górnych prostopadłościanów (dachach płaskich budynków wysokich i średniej wysokości) o stosunku wymiarów boków przekroju poprzecznego 1:2 oraz 1:4 i różnych smukłościach całych modeli. Analizowano wartości współczynnika średniego ciśnienia dynamicznego C_p w punktach zlokalizowanych na pokrywie górnej modeli oraz na ścianach pionowych, w zależności od kąta natarcia i struktury wiatru. Podsumowując można wymienić kilka głównych spostrzeżeń wynikających z badań i obliczeń:

1. Wartości C_p są znacząco różne w zależności od napływającego powietrza w obrębie modelu i podobne pomiędzy modelami w obrębie jednego wariantu struktury wiatru.

2. Większe ssanie pojawia się przy kącie natarcia wiatru równym 90° , niż 0° , a więc w przypadku, gdy krótsza ściana jest nawietrzna.

3. Większe zmiany współczynnika ciśnienia C_p na dachu zaobserwowano w przypadku kąta natarcia 90° , a więc gdy wiatr działa na krótszą ścianę. Występuje wtedy bardzo duży spadek ssania w kierunku krawędzi zawietrznej spowodowany ponownym przyleganiem do powierzchni dachu oderwanej na krawędzi warstwy przyściennej.

4. Najmniejsze wartości C_p występują dla przypadków napływu 5 i 6 charakteryzujących się wyższym wykładnikiem we wzorze opisującym pionowy profil wiatru oraz wyższą turbulencją.

5. Występuje znaczący wzrost ssania spowodowany wirami wierzchołkowymi (stożkowymi) dla kątów natarcia wiatru w zakresie 0° – 60° w przypadku modeli 1:2 oraz 30° – 60° w przypadku modeli 1:4. Większe wartości ssania uzyskano dla modeli większych R1 i R2, co może świadczyć o wpływie blokady wewnątrz tunelu aerodynamicznego.

6. W związku z charakterem trójwymiarowym opływu wokół dachu występuje zmniejszenie wartości C_p od wysokości ok. 92 cm, głównie w przypadku, gdy ściana dłuższa jest nawietrzna.

Literatura

- 1 Uematsu Y., Watanabe K., Sasaki V., Yamada M., Hongo T. Wind-induced dynamic response and resultant load estimation of a circular flat roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 83 (1999) 251-261.
- 2 Uematsu Y., Moteki T., Hongo T. Model of wind pressure field on circular flat roofs and its application to load estimation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008) 1003-1014.
- 3 Fu J.Y., Li Q.S., Xie Z.N. Prediction of wind loads on a large flat roof using fuzzy neural networks. *Engineering Structures* 28 (2006) 153-161.
- 4 Stathopoulos T., Marathe R., Wu H. Mean wind pressures on flat roof corners affected by parapets: field and wind tunnel studies. *Engineering Structures* 21 (1999) 629-638.
- 5 Cao J., Tamura Y., Yoshida A. Wind pressures on multi-level flat roofs of medium-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 103 (2012) 1-15.
- 6 Pindado S., Meseguer J., Franchini S. Influence of an upstream building on the wind-induced mean suction on the flat roof of a low-rise building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 (2011) 889-893.
- 7 Richards P.J., Hoxey R.P. Flow reattachment on the roof of a 6 m Cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94 (2006) 77-99.
- 8 Richards P.J., Hoxey R.P. Wind loads on the roof of a 6m Cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008) 984-993.

- 9 Banks D., Meroney R.N., Sarkar P.P., Zhao Z., Wu F. Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 84 (2000) 65-85.
- 10 Wu F., Sarkar P.P., Mehta K.C., Zhao Z. Influence of incident wind turbulence on pressure fluctuations near flat-roof corners. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89 (2001) 403-420.
- 11 Banks D., Meroney R.N. A model of roof-top surface pressures produced by conical vortices: model development. *Wind and Structures* 4(3) (2001) 227-246.
- 12 Kawai H. Local peak pressure and conical vortex on building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (2002) 251-263.
- 13 Ono Y., Tamura T., Kataoka H. LES analysis of unsteady characteristics of conical vortex on a flat roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008) 2007-2018.
- 14 Tryggesson H., Lyberg M.D. Stationary vortices attached to flat roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98 (2010) 47-54.
- 15 Li Q.S., Hu S.Y., Dai Y.M., He Y.C. Field measurements of extreme pressures on a flat roof of a low-rise building during typhoons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 111 (2012) 14-29.
- 16 Counihan J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmospheric Environment* 3(2) (1969) 197-214.
- 17 Counihan J., Simulation of an adiabatic urban boundary layer in the wind tunnel. *Atmospheric Environment* 7 (1973) 673-689.
- 18 Bęc J., Lipecki T., Błazik-Borowa E. Research on wind structure in the wind tunnel of Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 318 (2011) 072003, doi: 10.1088/1742-6596/318/7/072003.
- 19 Lipecki T., Jamińska J. Influence of wind structure and aspect ratio of circular cylinders on mean wind pressure coefficient. *Task Quarterly* 16(3) (2012) 203-218.
- 20 Lipecki T., Błazik-Borowa E., Bęc J. Wind structure influence on surface pressures of rectangular cylinders at various angles of wind attack. *Proceedings of the 13th International Conference on wind Engineering*, Amsterdam, Holandia, 2011.
- 21 Lipecki T., Bęc J., Błazik-Borowa E. Surface pressures on rectangular cylinders – the dependence on aspect ratio, wind structure and angle of wind attack. *Proceedings of 7th International Symposium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*, Szanghaj, Chiny, 2012.

Wind action on flat roofs

Tomasz Lipecki

*Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

Abstract: The paper deals with the wind action on flat roofs of rectangular shapes which can be considered for medium-rise and high-rise buildings. Distributions of mean pressure coefficient C_p on flat roofs were measured. All analyses were based on model measurements which had been performed in the boundary layer wind tunnel in Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology. Vertical, fixed in the floor of the wind tunnel on the turn table rectangular prisms of the ratio of cross-section dimensions 1:2 and 1:4 were investigated. Measurements were carried out for the angle of wind attack in the range 0°-90°, every 15°. The influence of the wind structure on pressures was investigated in six different cases of the approaching wind.

Keywords: wind tunnel, model tests, wind action, aerodynamic coefficient of pressure, drag and lift, flat roofs