

KORELACJA PRZESTRZENNA CIŚNIENIA WIATRU NA ŚCIANACH BOCZNYCH OBIEKTÓW PROSTOPADŁOŚCIENNYCH

Tomasz LIPECKI

*Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę korelacji przestrzennej ciśnienia powierzchniowego wywieranego przez oddziaływanie wiatru na wysokie budynki prostopadłościenne. Analizowano zależności pionowe i poziome na ścianach bocznych budynków. Pomiary ciśnienia powierzchniowego wykonano w skali modelowej w tunelu aerodynamicznym na obiektach prostopadłościennych reprezentujących budynki wysokie w skali rzeczywistej. Przyjęto napływ 3D, odpowiadający atmosferycznemu, w 6 znacznie różniących się wariantach oraz 5 modeli o stosunku boków przekroju poprzecznego $D/B = 1:2$ (3 modele) oraz $D/B = 1:4$ (2 modele).

Słowa kluczowe: Współczynnik korelacji, oddziaływanie wiatru, tunel aerodynamiczny, ciśnienie powierzchniowe, atmosferyczna warstwa przyścienna.

1. WPROWADZENIE

Większość badań korelacji ciśnienia dotyczy przepływów płaskich ze stałą prędkością i intensywnością turbulencji. Ponadto, większość odnosi się do modeli o przekrojach kwadratowych [1–4]. Pomiary korelacji wykonywano również dla przekrojów prostokątnych, głównie wydłużonych w kierunku napływu [3–5]. Większość z wymienionych prac koncentrowała się na zależności między ciśnieniami na ścianach bocznych, równoległych do napływu, wzdłuż ich szerokości i wzdłuż długości modeli. Eksperymenty takie są wykonywane na modelach prostopadłościennych, zamocowanych poziomo w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego między dużymi, w stosunku do przekroju poprzecznego tunelu, płytami zapewniającymi napływ dwuwymiarowy. W takim przypadku pomiary wzdłuż szerokości ściany są wykonywane w kierunku średniej prędkości wiatru, zaś pomiary wzdłuż długości modeli, w kierunku prostopadłym do średniej prędkości i polegają na określeniu korelacji między ciśnie-

niem w punkcie centralnym i punktami oddalającymi się od środka w kierunku zamocowania. Badania takie pozwalają określić głównie wpływ intensywności i skali długości turbulencji na zależności korelacyjne. Dużo bardziej skomplikowane są eksperymenty w napływie 3D, który parametrami odpowiada atmosferycznej warstwie przyziemnej. Takie pomiary dotyczą obiektów, które umieszczone są pionowo w przestrzeni pomiarowej. Na wlocie tunelu symulowane jest pole wiatru o właściwościach zmieniających się wzdłuż wysokości. Metoda bierna symulacji (metoda Counihana) polega na ustawieniu na wlocie do tunelu barierki, iglic i innych elementów turbulizujących oraz klocków w przestrzeni pomiarowej, nadających odpowiednią chropowatość terenu i pozwalających uzyskać warstwę przyścienną odpowiadającą konkretnym kategoriom terenu. Założenia symulacji biernej podał Counihan [6], a współcześnie dokładny opis sposobu weryfikacji struktury wiatru przedstawiono w [7–12]. Pomiary korelacji ciśnienia na modelach w warstwie przyściennej są dużo bardziej skomplikowane, a interpretacja wyników jest często niejednoznaczna. Badania są wykonywane na modelach o przekrojach kwadratowych [13–15], rzadziej na prostokątnych [14, 16–17]. Badana jest przeważnie korelacja ciśnienia wzdłuż wysokości modeli oraz w przekrojach poziomych na wszystkich ścianach.

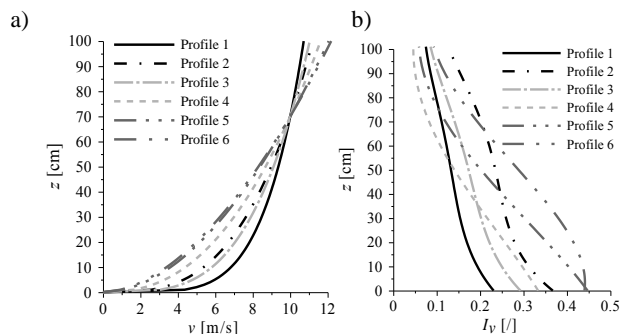
W niniejszej pracy podjęto próbę kompleksowego wyznaczenia korelacji ciśnienia na ścianach modeli o przekrojach prostokątnych, umieszczonych w tunelu aerodynamicznym, w warstwie przyściennej o zróżnicowanych parametrach, takich jak pionowy profil średniej prędkości, pionowy profil intensywności turbulencji, oraz funkcja gęstości widmowej mocy prędkości wiatru. Analizowano prostopadłościenny o następującym stosunku wymiarów: $D/B/H = 1:2:5$ (R1), $1:2:10$ (R3), $1:2:20$ (R5), oraz $1:4:10$ (R2), $1:4:20$ (R4), D, B – wymiary przekroju poprzecznego,

H – wysokość. Zbadano korelacje na ścianach bocznych, w kierunku pionowym wzdłuż wysokości oraz w kierunku poziomym, przy napływie wiatru na ścianę dłuższą i krótszą. Zależności wyrażono za pomocą współczynników korelacji przestrzennej R_{ij} .

2. METODYKA BADAŃ

Badania modelowe wykonano w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. W ich trakcie symulowano sześć wariantów struktury wiatru, różniących się pod względem: profilu średniej prędkości, v , profilu intensywności turbulencji, I_v oraz funkcji gęstości widmowej mocy prędkości. Zmiany pionowe v i I_v pokazano na rys. 1. W dalszej części do oznaczenia wariantu napływu wykorzystano nazwy skrócone (p1, p2, itd). Warstwę przyścienną modelowano wykorzystując metodę bierną Counihana. Szczegółowy opis badań struktury wiatru przedstawiono w pracach [12, 18].

W warstwie przyściennej ustawiono modele prostopadłościennych o stosunkach wymiarów: $D/B/H = 1:2:5$ (R1), $D = 20$ cm, $D/B/H = 1:2:10$ (R3), $D = 10$ cm, $D/B/H = 1:2:20$ (R5), $D = 5$ cm, $D/B/H = 1:4:10$ (R2), $D = 10$ cm, $D/B/H = 1:4:20$ (R4). $D = 5$ cm.



Rys. 1. a) Pionowe profile średniej prędkości wiatru, b) pionowe profile intensywności turbulencji składowej podłużnej.
Fig. 1. a) Vertical profile of mean wind speed, b) vertical profile of turbulence intensity of the longitudinal component.

Modele zamocowano pionowo w centralnej części pomiarowej na stole obrotowym, umożliwiając obrót w zakresie kąta $\alpha_w = 0^\circ - 90^\circ$. W położeniu $\alpha_w = 0^\circ$ szerszy bok (A) był prostopadły do napływu. Ustawienie modeli, kąty natarcia wiatru i oznaczenia ścian pokazano na rys. 2a.

Na ścianach pionowych, na 16 poziomach zainstalowano czujniki ciśnienia. W przypadku modelu R1 wzdłuż obwodu umieszczono 28 punktów pomiarowych, po 7 przypadających na ścianę węższą i 7 na ścianę szerszą. Dla innych modeli było to odpowiednio: R3: 28, 7, 7, R5: 20, 3, 7, R2: 24, 5, 7, R4: 20, 3, 7. W przekrojach pionowych czujniki umieszczono w środku ściany oraz możliwie blisko obu krawędzi, a pozostałe na odcinkach między krawędziami

i środkiem. Pomiar zmiennego w czasie ciśnienia powierzchniowego odbywał się z częstotliwością 200 Hz (czyli z krokiem czasowym $\Delta t = 0.005$ s), w czasie 30 s, co dawało 6000 kroków czasowych. Szczegółowe informacje na temat pomiarów ciśnienia przedstawiono w pracach [19–20].

3. KORELACJA PRZESTRZENNA

Na podstawie pomiarów wyznaczono przestrzenną korelację wzajemną między ciśnieniem wiatru w dwóch różnych punktach na ścianach bocznych modeli. Jako miarę pozwalającą na porównywanie wyników przyjęto współczynnik korelacji Pearsona R_{ij} , określany na podstawie kowariancji, czyli miary współzależności między dwoma procesami zmiennymi w czasie, mierzonymi w różnych punktach w przestrzeni, obliczanej według:

$$\text{cov}(p_i, p_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [p_{i,k}(t) - \bar{p}_i][p_{j,k}(t) - \bar{p}_j], \quad (1)$$

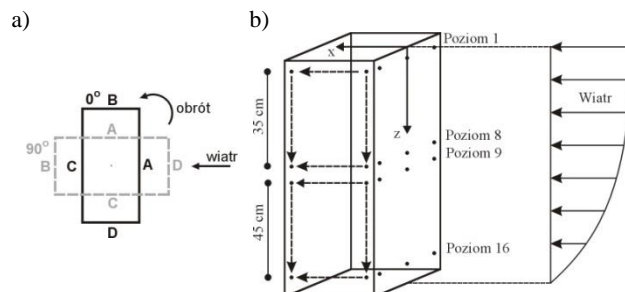
gdzie: $p_{i,k}(t)$ i $p_{j,k}(t)$ – przebiegi czasowe ciśnienia na powierzchni modeli, w dwóch punktach i oraz j , \bar{p}_i , \bar{p}_j – wartości średnie ciśnienia w czasie $t = 30$ s, n – liczba kroków czasowych w czasie t , $n = 6000$.

Współczynniki korelacji R_{ij} , można określać według:

$$R_{ij} = \frac{\text{cov}(p_i, p_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (2)$$

gdzie: σ_i , σ_j – odchylenia standardowe procesów.

Wartości R_{ij} należą do przedziału od -1 do 1, a ich interpretacja jest następująca: $R_{ij} = 0$ – brak zależności między procesami, $0 < R_{ij} < 0,2$ – praktycznie brak zależności, $0,2 < R_{ij} < 0,4$ – niska dodatnia zależność, $0,4 < R_{ij} < 0,7$ – umiarkowana dodatnia, $0,7 < R_{ij} < 0,9$ – silna dodatnia, $R_{ij} > 0,9$ – bardzo silna dodatnia, $R_{ij} = 1$ – pełna korelacja, przechodząca w zależność funkcyjną. Analogicznie interpretowane są wartości ujemne z tym, że wówczas należy mówić o zależności ujemnej.



Rys. 2. a) Oznaczenia ścian modeli i kątów natarcia wiatru α_w , b) kierunki obliczania współczynników R_{ij} wzdłuż szerokości (x) i wysokości ścian bocznych modeli (z).

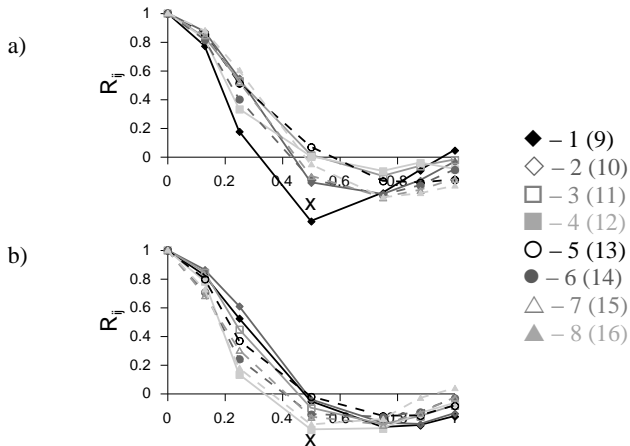
Fig. 2. a) Notations of walls and angles of wind attack α_w , b) chordwise (x) and spanwise (z) correlation coefficient R_{ij} on side walls.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono korelacje między punktami znajdującymi się na poszczególnych poziomach pomiarowych (kierunek x) i między punktami oddalonymi od siebie w kierunku pionowym wzdłuż wysokości modeli (kierunek z) – rys. 2b.

4. KORELACJA POZIOMA

W celu porównania wyników, dla różnych wymiarów ścian przyjęto bezwymiarową skalę na osi poziomej (x), liczoną od krawędzi wewnętrznej ($x = 0$) w kierunku zewnętrznej ($x = 1$). Aby zwiększyć przejrzystość, ściany podzielono na dwie części z poziomami 1–8 i 9–16.

Zmiany współczynników R_{ij} wzdłuż szerokości ściany, na poszczególnych poziomach pokazano na rys. 3–4, dla profilu p1 i modelu R1. W przypadku modelu R1 i ściany A ($\alpha_w = 90^\circ$) odległość między skrajnymi punktami wynosi: 32 cm, a ściany B – 16 cm ($\alpha_w = 0^\circ$).



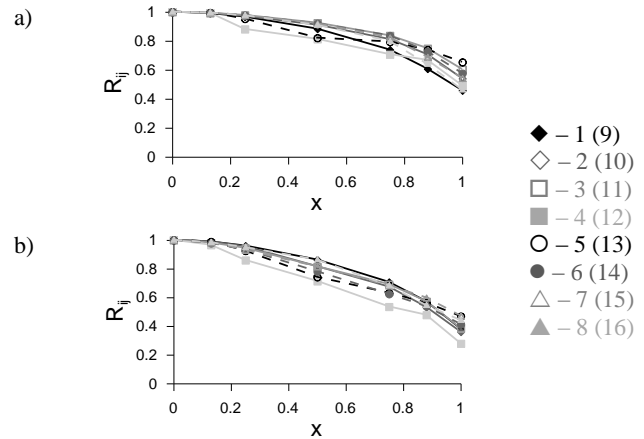
Rys. 3. Współczynnik korelacji R_{ij} , model R1, ściana A, $\alpha_w = 90^\circ$, profil p1, poziomy: a) górne 1–8, b) dolne 9–16. Oznaczenia poziomów górnych (dolnych) według legendy.

Fig. 3. Correlation coefficient R_{ij} , model R1, wall A, $\alpha_w = 90^\circ$, profile p1, levels: a) top 1–8, b) bottom 9–16. Top (bottom) levels notations according to a legend.

Na ścianie A (rys. 3) współczynniki szybko spadają już przed połową szerokości ściany ($x < 0,5$), zbliżają się do 0 lub zmieniają znak na "-" i następnie lekko rosną. Różnice między wartościami na kolejnych poziomach są dość znaczne, przekraczające 0,2, co świadczy o zależności korelacji od wysokości na której są obliczane. Na poziomie najwyższym zaznaczony jest wyraźnie efekt opływu swobodnego wierzchołka wprowadzający zaburzenia w korelacjach (rys. 3a). Na poziomach dolnych współczynniki maleją nieznacznie szybciej.

Współczynniki korelacji na ścianie B (rys. 4) osiągają dość wysokie wartości na końcu ściany, gdzie spadają do minimalnie 0,4 w częściach dolnych, ale na poziomach górnych przeważnie pozostają powyżej 0,6. Na każdym z poziomów

wykresy spadają początkowo dość powoli, a dla większych odległości między punktami spadek przyspiesza.



Rys. 4. R_{ij} , model R1, ściana B, $\alpha_w = 0^\circ$, profil p1, poziomy: a) górne 1–8, b) dolne 9–16.

Fig. 4. R_{ij} , model R1, wall B, $\alpha_w = 0^\circ$, profile p1, levels: a) top 1–8, b) bottom 9–16.

Porównując wykresy do uzyskanych na ścianie A można stwierdzić, że korelacje są na wyższym poziomie, jeśli weźmiemy pod uwagę odległość $x = 0,5$ na ścianie A (a więc odpowiadającą maksymalnej na ścianie B), gdzie wartości wahają się od 0,2 do -0,4. Widać więc wyraźnie efekt smukłości przekroju poprzecznego. Ponadto całkiem inny jest charakter zmian R_{ij} .

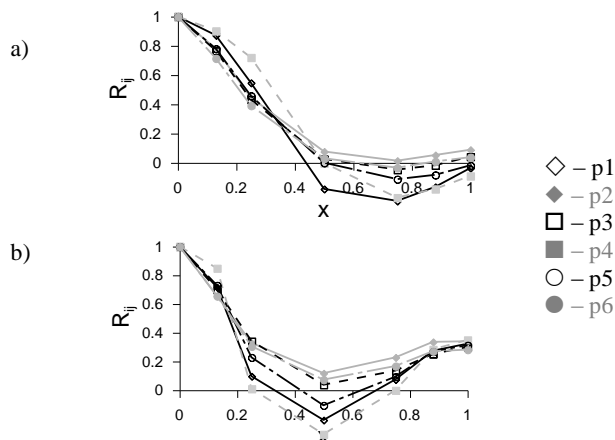
Zmiany współczynników R_{ij} wzdłuż szerokości ściany, na poziomie 2, dla modelu R1 ($D/B = 1:2$) i R2 ($D/B = 1:4$), w zależności od struktury napływu pokazano na rys. 5–6.

Analizując rys. 5 widać, że do odległości $x = 0,4$ – $0,7$ występuje spadek R_{ij} do wartości ujemnych, minimalnie do -0,4 i następnie wzrost do ok. 0 (R1) i 0,3 (R2), czyli braku lub bardzo niskiej korelacji. Brak jest dominującej tendencji w kolejności profili, największe korelacje uzyskano przy małych odległościach dla p1 i p4, ale ta kolejność na dolnych poziomach się zmienia. Ponadto, kolejność R_{ij} według profili może być różna wzdłuż szerokości ściany, głównie za sprawą profilu p1. Porównując rys 5a i b widać inny charakter zmian korelacji na ścianie o tej samej szerokości (40 cm). W przypadku modelu R2 (1:4) korelacje spadają szybciej i następnie też wyraźniej rosną.

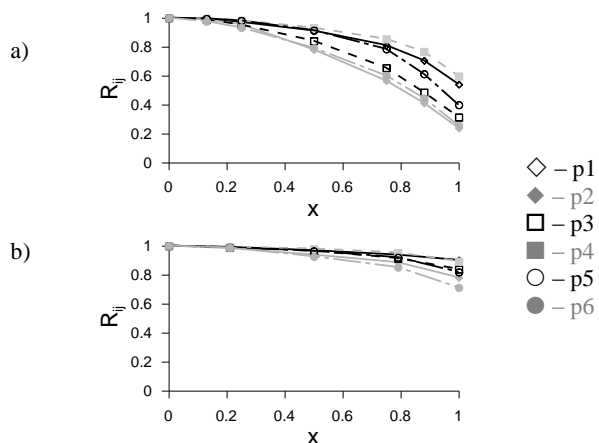
Korelacje na rys. 6 spadają do ok. 0,3–0,4 między punktami skrajnymi przy krawędziach w przypadku modelu R1, dla którego ściana ma szerokość 20 cm, do 0,8–0,85 dla R2, dla którego ściana ma szerokość 10 cm.

Charakter zmian jest inny niż w przypadku ściany szerszej A jako bocznej ($\alpha_w = 90^\circ$) – R_{ij} spadają wolniej przy małych odległościach i szybciej przy większych. Największe wartości uzyskano dla profili p4 i p1, najmniejsze dla p6 i p2, czasem p5. Różnice między profilami są znaczne wzdłuż całej wysokości, największe przy wierzchołkach

i podstawach. Ponadto, dużo większe rozbieżności występują na ścianie najdłuższej z analizowanych (20 cm na modelu R1), w porównaniu do innych modeli.



Rys. 5. R_{ij} , poziom 2, ściana A, p1-p6, $\alpha_w = 90^\circ$, a) R1, b) R2.
Fig. 5. R_{ij} , level 2, wall A, p1-p6, $\alpha_w = 90^\circ$, a) R1, b) R2.



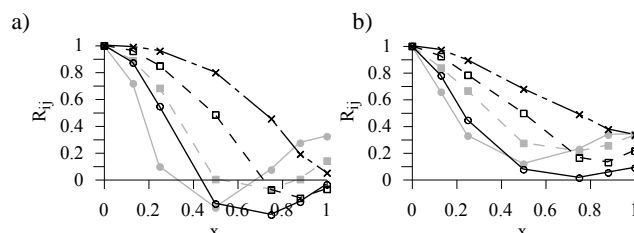
Rys. 6. R_{ij} , poziom 2, ściana B, p1-p6, $\alpha_w = 0^\circ$, a) R1, b) R2.
Fig. 6. R_{ij} , level 2, wall B, p1-p6, $\alpha_w = 0^\circ$, a) R1, b) R2.

Wydaje się, że różnice w korelacjach na ścianach bocznych wynikają z odrywających się na krawędziach zewnętrznych wirów. W przypadku szerszej ściany (rys. 5) oderwana na narożach warstwa przyścienna przylega do powierzchni ściany i tworzy obszar z dużymi zaburzeniami ciśnienia – stąd też bardzo niskie wartości korelacji R_{ij} . Gdy ściana węższa jest boczną (rys. 6) wiry odrywające się na krawędziach sypływają za konstrukcją nie przylegając do powierzchni ściany i nie powodują powstania obszarów o dużych fluktuacjach ciśnienia.

Zmiany współczynników R_{ij} wzdłuż szerokości ściany, na poziomie 2, dla profili p1 i p2, w zależności od modelu pokazano na rys. 7-8.

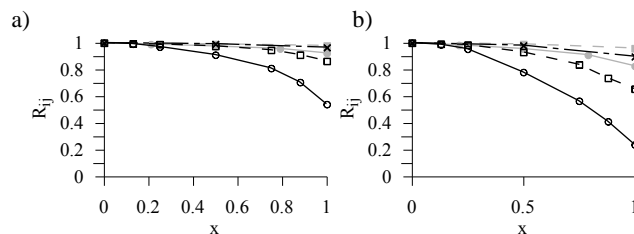
Rozbieżności w wartościach R_{ij} na ścianie A (rys. 7) między modelami występują wzdłuż całej jej szerokości i wysokości modeli. Przy krawędzi zewnętrznej wyznaczo-

no szybki spadek R_{ij} , nawet do wartości zmieniających znak na "-", szybszy w przypadku modeli 1:4, głównie R2. Osiągnięcie maksymalnej wartości ujemnej (ok. -0,4) występuje w dalszej części ściany dla modeli 1:2. W przypadku obiektów 1:4, po osiągnięciu maksymalnych wartości ujemnych następuje ponowna zmiana znaku aż do ok. 0,2-0,4. Dla obiektów 1:2 korelacje spadają wzdłuż całej szerokości ściany, osiągając wartości ujemne, tylko w przypadku modelu R1 zaczynają się ponownie zmieniać w kierunku dodatnich. Największe korelacje dodatnie osiągnięto dla modeli R5, R3 i R1 (1:2), następnie dla R4 i R2 (1:4). Oczywiście, wynika to z rozmiarów modeli, ale rozpatrując obiekty o tych samych wymiarach ściany bocznej R1 i R2 (40 cm) oraz R3 i R4 (20 cm) widać wyraźne różnice zależne od smukłości przekroju.



Rys. 7. R_{ij} , ściana A, poziom 2, $\alpha_w = 90^\circ$ a) p1, b) p2. \circ – R1, \square – R2, \triangle – R3, \blacksquare – R4, \times – R5.

Fig. 7. R_{ij} , wall A, level 2, $\alpha_w = 90^\circ$ a) p1, b) p2. \circ – R1, \square – R2, \triangle – R3, \blacksquare – R4, \times – R5.



Rys. 8. R_{ij} , ściana B, poziom 2, $\alpha_w = 0^\circ$, a) p1, b) p2. Oznaczenia jak na rys. 7.

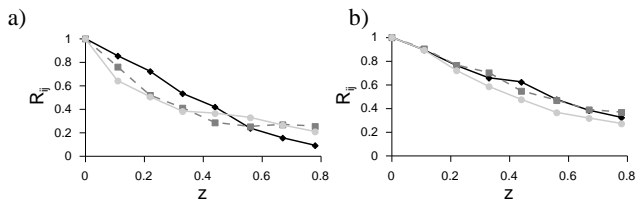
Fig. 8. R_{ij} , wall B, level 2, $\alpha_w = 0^\circ$, a) p1, b) p2. Notations like in fig. 7.

Największe współczynniki R_{ij} na ścianie B (rys. 8), bardzo zbliżone, wyznaczono dla modeli R5 i R4, następnie nieznacznie niższe dla R2 i R3, a najmniejsze dla R1. Większy spadek korelacji, głównie dla prostokątnianu R1, występuje przy podstawach. Ponadto, większe rozbieżności między modelami można zaobserwować w częściach dolnych. Rozpatrując ściany o tych samych wymiarach R2 i R3 (10 cm) oraz R4 i R5 (5 cm) widać mniejszy spadek R_{ij} na modelach o $D/B = 1:4$.

5. KORELACJA PIONOWA

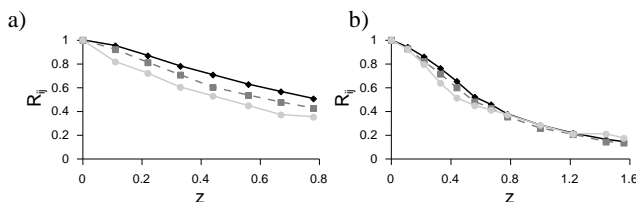
Zmiany pionowe korelacji wyznaczono wzdłuż 3 linii pionowych usytuowanych przy zewnętrznych krawędziach oraz w środku ściany. Za punkt odniesienia przyjęto punkt pomiarowy na najwyższym poziomie, a współczynniki korelacji obliczono oddalając drugi punkt w kierunku podstawy. W związku z tym, w przypadku modelu R1 wartość bezwymiarowa $x = 0,8$ oznacza odległość między poziomami 1 i 8 równą 35 cm.

Zmiany pionowe korelacji, dla profilu p1, modeli R1 i R2 w zależności od położenia przekroju pionowego przedstawiono na rys. 9–10.



Rys. 9. R_{ij} , przekroje pionowe, ściana A, profil p1, $\alpha_w = 90^\circ$, poziomy górne 1–8, a) R1, b) R2, \blacklozenge – krawędź nawietrzna, \blacksquare – środek, \bullet – krawędź zawietrzna.

Fig. 9. R_{ij} , vertical sections, wall A, profile p1, $\alpha_w = 90^\circ$, top levels 1–8, a) R1, b) R2, \blacklozenge – windward edge, \blacksquare – center, \bullet – leeward edge.



Rys. 10. R_{ij} , przekroje pionowe, ściana B, profil p1, $\alpha_w = 0^\circ$, poziomy górne 1–8, a) R1, b) R2. Oznaczenia jak na rys. 9.

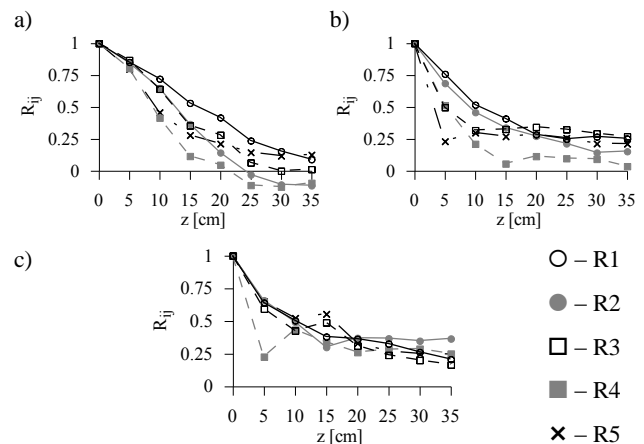
Fig. 10. R_{ij} vertical sections, wall B, profile p1, $\alpha_w = 0^\circ$, top levels 1–8, a) R1, b) R2. Notations like in fig. 9.

Korelacje na poziomach wyższych na ścianie A (rys. 9) spadają do ok. 0,2, przy maksymalnej odległości między punktami, w sposób niemal liniowy przy krawędzi nawietrznej i nieznacznie szybciej w środku i przy krawędzi zawietrznej. Dużo wyższe rozbieżności między wyznaczonymi wartościami występują na poziomach ułożonych w dolnych połowach modeli, gdy liczona jest korelacja od poziomu mniej więcej środkowego w kierunku podstaw. Inny jest charakter zmian R_{ij} – przy małych odległościach między punktami wartości spadają szybko, następnie występuje stabilizacja na niskim poziomie ok. 0,4–0,2. Na poziomach górnych również jest to widoczne (rys. 9). W przypadku modelu R2 (1:4) spadek jest bardziej liniowy i korelacje wyższe.

Analizując rys. 10 dla ściany B można stwierdzić, że korelacje w górnych częściach ścian spadają niemal liniowo

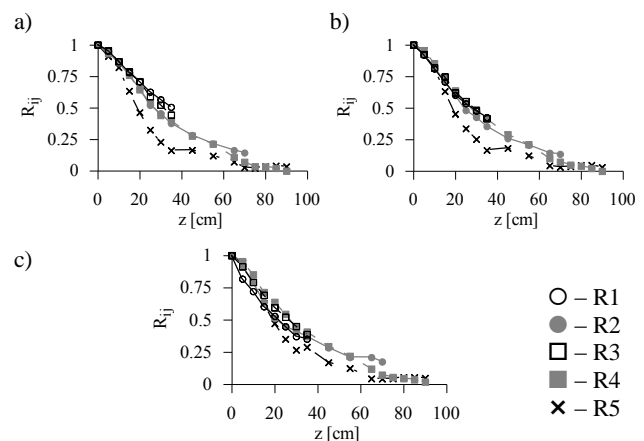
do poziomu ok. 0,5 (R1). W częściach dolnych spadek jest szybki dla małych odległości, a następnie się stabilizuje na poziomie ok. 0,2. Najwyższa korelacja w większości przypadków jest przy krawędzi nawietrznej, następnie w środku i najmniejsza przy krawędzi zawietrznej. Większe różnice między wartościami współczynników R_{ij} w przekrojach pionowych występują w dolnych częściach modeli. Spadek R_{ij} dla R2 ma inny charakter – najpierw jest liniowy do $x = 0,5$ –0,6, a następnie wolniejszy, do ok. 0,2.

Zmiany pionowe korelacji, dla profilu p1, w zależności od modelu pokazano na rys. 11–12, na których na osi poziomej przyjęto rzeczywiste odległości z , wynoszące maksymalnie 35 cm (rys. 11) i 92 cm (rys. 12). Różne odległości wynikają z innego oprzyrządowania ścian.



Rys. 11. R_{ij} , przekroje pionowe, ściana A, profil p1, $\alpha_w = 90^\circ$, a) krawędź nawietrzna, b) środek, c) krawędź zawietrzna.

Fig. 11. R_{ij} , vertical sections, wall A, profile p1, $\alpha_w = 90^\circ$, a) windward edge, b) center, c) leeward edge.



Rys. 12. R_{ij} , przekroje pionowe, ściana B, profil p1, $\alpha_w = 0^\circ$, a) krawędź nawietrzna, b) środek, c) krawędź zawietrzna.

Fig. 12. R_{ij} , vertical sections, wall B, profile p1, $\alpha_w = 0^\circ$, a) windward edge, b) center, c) leeward edge.

Na krawędzi nawietrznej korelacje spadają prawie liniowo, nieznacznie inaczej, wolniej przy dużych odległościach dla modeli o $D/B = 1:4$ (rys. 11). W środku i przy krawędzi zawietrznej występują znaczne zaburzenia R_{ij} .

Gdy węższa ściana B jest nawietrzną (rys. 12) korelacje spadają w mniejszym stopniu, prawie liniowo do odległości $z = 35\text{--}40$ cm, następnie spadek jest wolniejszy.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i obliczonych współczynników korelacji ciśnienia wydaje się, że wzrost turbulencji powoduje wcześniejsze przyleganie warstwy przyściennej do powierzchni ściany bocznej i większe zaburzenia korelacji ciśnienia. Korelacje pionowe w obrębie bąbla separacji przy krawędzi nawietrznej wydaje się nieznacznie większe niż w dalszych przekrojach. Korelacje pionowe są większe niż w przekrojach poziomych, w których duży wpływ ma pole wirowe.

WIND PRESSURE CORRELATION ON SIDE WALLS OF RECTANGULAR PRISMS

Summary: The paper deals with analyses of wind pressure correlation on side walls of rectangular prisms which can be considered as high-rise buildings. Spanwise as well as chordwise correlations on side walls were calculated. Pressure measurements were carried out in model-scale in a wind tunnel. Six different variant of boundary layer flows were adopted in the wind tunnel. Five prisms of rectangular cross-sections of the ratios of 1:2 (3 models) and 1:4 (2 models) were investigated.

Literatura

[1] Vickery B.J. *Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream*. Journal of Fluid Mechanics 25(3) (1966) 481–491
 [2] Lee B.E. *The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism*. Journal of Fluid Mechanics 69(2) (1975) 263–282
 [3] Miyata T., Miyazaki M. *Turbulence effects on aerodynamic response of rectangular bluff cylinders*. Cermak J.E. (Ed.), *Wind Engineering*, Proc. 5th ICWE, Fort Collins, USA, 1979, 631–642
 [4] Noda H., Nakayama A. *Free-stream turbulence effects on the instantaneous pressure and forces on cylinders of rectangular cross section*. Experiments in Fluids 34 (2003) 332–344
 [5] Li Q.S., Melbourne W.H. *The effects of large scale turbulence on pressure fluctuations in separated and reattaching flows*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 83 (1999) 159–169
 [6] Counihan J. *Simulation of an adiabatic urban boundary layer in the wind tunnel*. Atmospheric Environment 7 (1973) 673–689

[7] Iyengar A.K.S., Farell C. *Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations: roughness length and integral length scale determination*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89 (2001) 1059–1080
 [8] De Bortoli M.E., Natalini B., Paluch M.J., Natalini M.B. *Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) 281–291
 [9] Kozmar H. *Scale effects in wind tunnel modeling of an urban atmospheric boundary layer*. Theoretical and Applied Climatology 100(1–2) (2010) 153–162
 [10] Kozmar H. *Physical modeling of complex airflows developing above rural terrains*. Environmental Fluid Mechanics 12 (2012) 209–225
 [11] Varshney K., Poddar K. *Experiments on integral length scale control in atmospheric boundary layer wind tunnel*. Theoretical and Applied Climatology 106 (2011) 127–137
 [12] 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, 072003.
 [13] Kareem A., Cermak J.E. *Pressure fluctuations on a square building model in boundary-layer flows*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 16 (1984) 17–41
 [14] Liang S., Liu S., Li Q.S., Zhang L., Gu M. *Mathematical model of across-wind dynamic loads on rectangular tall buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) 1757–1770
 [15] Butler K., Cao S., Kareem A., Tamura Y., Ozono S. *Surface pressure and wind load characteristics on prisms immersed in a simulated transient gust front flow field*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 98 (2010) 299–316
 [16] Kareem A. *Measurements of pressure and force fields on building models in simulated atmospheric flows*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 36 (1990) 589–599
 [17] Kareem A. *Correlation structure of random pressure fields*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 69–71 (1997) 507–516
 [18] Lipecki T., Jamińska P. *Influence of wind structure and aspect ratio of circular cylinders on mean wind pressure coefficient*. Task Quarterly 16(3) (2012b) 201–216
 [19] Lipecki T., Bęc J., Błazik-Borowa E. *Surface pressures on rectangular cylinders – the dependence on aspect ratio, wind structure and angle of wind attack*. Proc. 7th BBAA, Szanghaj, Chiny, 2012
 [20] Lipecki T., Bęc J., Błazik-Borowa E. *Wpływ struktury wiatru na rozkład ciśnienia na powierzchni prostopadłościanu o wymiarach przekroju poprzecznego 10 cm x 20 cm*. Budownictwo i Architektura 10 (2012) 69–80