

WPLYW PARAMETRÓW EKRANU WIATROWEGO NA KSZTAŁTOWANIE PRZEPLYWU W STREFIE RECYRKULACJI

Katarzyna KLEMM*

*Politechnika Łódzka, Instytut Architektury i Urbanistyki
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawione zostały wyniki analiz symulacyjnych przepływu powietrza w strefie recyrkulacji między ekranem wiatrowym a budynkiem. Odległość między ekranem a budynkiem była stała, podobnie jak wymiary samego budynku zmianie podlegała wysokość ekranu oraz jego porowatość. W celu określenia warunków wiatrowych w strefie między ekranem a budynkiem dokonano analizy prędkości w dziesięciu równo oddalonych od siebie punktach, wzdłuż 6 linii usytuowanych prostopadle i równoległe do rozpatrywanego układu.

Słowa kluczowe: Osłona wiatrowa, symulacja numeryczna.

1. WPROWADZENIE

Zwiększona szorstkość podłoża obszarów miejskich prowadzi do ogólnego osłabienia przepływu powietrza. Obecność wysokich budynków, tworzących zwarte struktury zabudowy może doprowadzić do zmniejszenia prędkości wiatru w centrum miasta nawet o 30%. Z drugiej jednak strony układ budynków niekiedy wywołuje wzrost prędkości i burzliwości przepływu powietrza, prowadząc do niekorzystnych zjawisk takich jak: dyskomfort pieszych, uniesienie zanieczyszczeń czy straty ciepłe w budynkach.

Aby zniwelować ten negatywny wpływ stosowane są różnego rodzaju narzędzia mające na celu świadome kształtowanie klimatu wietrznego. Do najczęściej stosowanych elementów mających na celu ograniczenie prędkości przepływu można zaliczyć zieleń i osłony przeciwwiatrowe jak również samą bryłę budynku. W wielu przypadkach modyfikacje bryły budynku są niemożliwe. Jedynym rozwiązaniem może być wówczas kształtowanie warunków wiatrowych poprzez zastosowanie osłon wiatrowych.

2. OSŁONY WIATROWE

Osłony wiatrowe mogą być budowane różnymi technikami i za pomocą różnych materiałów. Najbardziej popularne to osłony naturalne, złożone z odpowiednio usytuowanych drzew i krzewów. Obecność zieleni wysokiej w formie liniowej w osiedlu, obniża prędkość wiatru o około 25÷35% [1]. Wśród osłon sztucznych na uwagę zasługują płoty, palisady, ściany czy wały ziemne. Oprócz swojej podstawowej funkcji jaką jest osłabienie przepływu powietrza, wykazują również wpływ na inne elementy mikroklimatu, tj. temperaturę, wilgotność, parowanie. Nie bez znaczenia jest również ochrona przed rozprzestrzeniającymi się zanieczyszczeniami czy śniegiem.

Strefa maksymalnej osłony zlokalizowana jest po stronie zawietrznej ale również po stronie dowietrznej zarysowuje się rejon zredukowanej prędkości przepływu. Generalnie należy stwierdzić, że strefa oddziaływania ekranu sięga na odległość równą 30 wysokościom ekranu po stronie zawietrznej i około dziesięciu po stronie dowietrznej. Prędkość wiatru zmienia się stopniowo, aż w pewnej odległości powraca do swej początkowej wartości. Jednocześnie w pobliżu krawędzi ekranu pojawiają się strefy o zwiększonych gradientach przepływu. W przypadku osłon pełnych notowane w nich prędkości osiągają wyraźnie wyższe wartości [2].

Efektywność osłon wiatrowych determinują głównie takie czynniki jak: wysokość, szerokość, długość, gęstość i perforacja, układ i orientacja. Wysokość jest najbardziej istotnym czynnikiem ze względu na zasięg oddziaływania osłony. Zwiększenie wysokości ekranu pociąga za sobą zwiększenie strefy osłoniętej. Stosunkowo istotnym czynnikiem jest również ciągłość osłony. Przerwanie osłony może doprowadzić do silnego przepływu powietrza w otwartej przestrzeni. Aby wyeliminować ten efekt poszczególne frag-

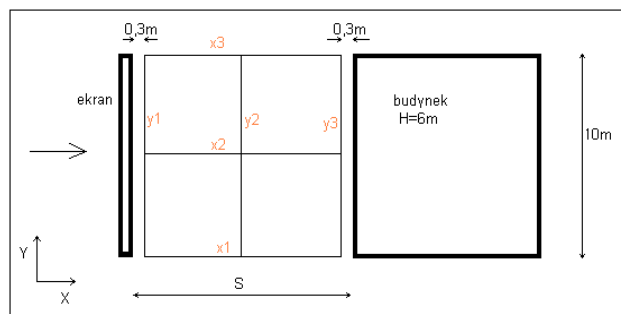
menty osłony powinny zachodzić na siebie. Kolejnym istotnym czynnikiem, wpływającym na warunki wietrzne za ekranem jest perforacja. Pełne osłony, o zerowej perforacji nie stanowią rozwiązania w pełni efektywnego z uwagi na wiry generowane po stronie zawietrznej. Strefa gwałtownych zawirowań rozciąga się na odległość równą w przybliżeniu pięciu wysokościami osłony.

Dobre efekty dają osłony, w tym pasy zieleni przy perforacji na poziomie 20-30%, przy poziomie 60% wzrasta prędkość przepływu oraz wzmagają się niekorzystne zawirowania [3].

3. PRZEPLÝW POWIETRZA WOKÓŁ OSŁONY O RÓŻNYCH PARAMETRACH

Przedmiotem analiz był przepływ powietrza między osłoną a budynkiem, przy zmiennej wysokości i perforacji osłony. Wymiary budynku i osłony nie ulegały zmianie i wynosiły odpowiednio: budynek $W=10\text{m}$, $L=10\text{m}$, $H=6\text{m}$; ekran $W=10\text{m}$, $L=0,3\text{m}$. Odległość między ekranem a budynkiem była stała i wynosiła $S=9\text{m}$. Do obliczeń przyjęto trzy różne wysokości ekranu: $H=4\text{m}$, 5m , 6m i sześć perforacji w zakresie od 0 do 50%. Otwory w ekranie przyjmowały formę prostokątów o wielkości równej 10% objętości osłony.

W celu określenia warunków wiatrowych w strefie między ekranem a budynkiem dokonano analizy prędkości w dziesięciu równo oddalonych od siebie punktach, wzdłuż 6 linii usytuowanych prostopadle i równoległe do rozpatrywanego układu. Na Rys.1. przedstawiono położenie linii pomiarowych.



Rys. 1. Usytuowanie linii pomiarowych [4].

Fig. 1. Location of the analysed lines

3.1. Symulacja numeryczna

Analiza numeryczna została przeprowadzona w oparciu o realizabile $k - \varepsilon$ model, zaproponowany przez Shih'a [5] w 1995 roku. Jest to pół-empiryczny model posiadający dwa równania transportu: energii kinetycznej turbulencji k i współczynnika dyssypacji energii kinetycznej turbulencji, ε .

Wymodelowane równania transportu k i ε przyjmują postać (1) i (2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2)$$

gdzie: $C_1 = \max \left[0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$.

W równaniach tych G_k reprezentuje produkcję energii kinetycznej turbulencji wywołaną średnim gradientem prędkości, obliczanym zgodnie z równaniem (3)

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

lub w przypadku wykorzystania zależności Boussinesq'a z równania (4)

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4)$$

gdzie:

$(-\overline{\rho u_i' u_j'})$ – tensor naprężeń Reynolds'a lub gęstość pędu;

μ_t – lepkość turbulentna;

u_i – składowa prędkości średniej;

x_i – współrzędna przestrzeni;

S – średnia wartość tensora naprężeń.

Występującą we wzorze (4) średnią wartość tensora naprężeń S można przedstawić następująco:

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

gdzie:

S_{ij} – naprężenie średnie

Podobnie jak w przypadku innych modeli $k - \varepsilon$, lepkość wirów wyliczana jest ze wzoru (7)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Różnica między modelem „realizabile $k - \varepsilon$ ”, a modelem standardowym polega na tym, że wartość C_μ nie jest już stałą, ale obliczana jest na podstawie wzoru (8)

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (8)$$

gdzie: $U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$\overline{\Omega}_{ij}$ - oznacza średnią wielkość tensora rotacji widzianego w rotacyjnym układzie odniesienia z prędkością kątową ω_k . Stałe modelu A_0 i A_s wynoszą odpowiednio

$$A_0=4,04, A_s = \sqrt{6}\cos\varphi,$$

gdzie:

$$\varphi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right).$$

W modelu „realizable $k - \varepsilon$ ” wielkości: C_2 , σ_k oraz σ_ε są stałymi, a ich wartości przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Wartości stałych w modelu „realizable $k - \varepsilon$ ”

Table 1. Constants in „realizable $k - \varepsilon$ ” model

Stała modelu	Wartość
C_2	1,90
σ_k	1,00
σ_ε	1,20

Wielkość przyjętej do badań domeny obliczeniowej wynosiła $W = 111m, L = 70m, H = 30m$.

Analiza została przeprowadzona dla jednego kierunku wiatru tj. prostopadłego do ekranu, na wysokości 1,8m ponad poziomem gruntu. Wyniki symulacji zostały przedstawione w postaci bezwymiarowej, jako stosunek prędkości w rozpatrywanym układzie do prędkości niezakłóconej – $[V/V_0]$. Przy czym prędkość niezakłócona na wysokości 1,8m ponad gruntem wynosiła 1,89m/s.

Na wlocie zdefiniowano profil prędkości wiatru, profil energii kinetycznej turbulencji oraz profil dyssypacji energii kinetycznej turbulencji. Aby określić profil prędkości wiatru na wlocie należało uwzględnić zmianę szorstkości terenu w sąsiedztwie rozpatrywanego budynku w stosunku do terenu stacji pomiarowej. Obliczeń dokonano wykorzystując zależność Simiu [6], pozwalającą na powiązanie profili prędkości wiatru dla dwóch różnych terenów.

$$\frac{u_1^*}{u_2^*} = \left(\frac{z_{o1}}{z_{o2}}\right)^{0,0706} \quad (9)$$

gdzie: u_1^* i u_2^* oznaczają prędkości tarcia, zaś z_{o1} i z_{o2} współczynniki szorstkości.

Współczynnik szorstkości dla stacji meteorologicznej wynosił $z_{o1} = 0,03$. Wokół analizowanego obiektu przyjęto $z_{o1} = 0,25$.

Dla budynków wartość szorstkości wynosiła $z_o = 0,002$. Podłoże wokół obiektu stanowi głównie nawierzchnia betonowa dla której przyjęto $z_o = 0,01$.

Analizę przepływu wiatru przeprowadzono dla prędkości wiatru 5 m/s. Jest to prędkość na wysokości 10,00 m, w terenie otwartym, płaskim, czyli w warunkach standardowo przeprowadzanych pomiarów meteorologicznych wiatru.

4. WYNIKI ANALIZ SYMULACYJNYCH

Na rys.2. przedstawiono rozkład prędkości przepływu powietrza wzdłuż linii łączącej strefy narożników ekranu i budynku (x3 – por.rys.1.), dla trzech wysokości ekranu i sześciu perforacji. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach perforacje rzędu 40%, 50% i 30% powodują wyraźny spadek prędkości bezpośrednio za ekranem. Jednakże w miarę oddalania się od ekranu prędkość gwałtownie wzrasta, osiągając maksimum w pobliżu budynku. W pobliżu narożnika budynku V/V_0 osiąga wartości wyższe od 1.

Rozkłady prędkości dla perforacji mniejszych mają bardziej wyrównany charakter. Współczynniki V/V_0 przyjmują wartości od 0,2 do 0,7. Najbardziej skutecznej osłony dostarcza ekran o wysokości 6m i perforacji 10%.

W przypadku linii x1 uzyskano zbliżone wartości prędkości przepływu.

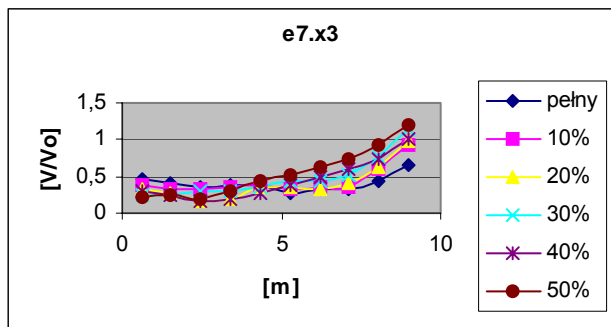
W strefie środkowej (linia x2 – por.rys.1) przepływ ulega większym zaburzeniom (Rys.3). Zwiększenie perforacji powoduje swobodny przepływ powietrza bezpośrednio za ekranem. W miarę oddalania się od ekranu prędkość wyraźnie spada, osiągając minimum przed budynkiem. W przypadku ekranów pełnego i o perforacji 10% strefa osłonięta jest mniejsza niż w pozostałych przypadkach. W połowie odległości między ekranem a budynkiem współczynnik V/V_0 wzrasta, szczególnie przy większych wysokościach ekranu.

Najkorzystniejsze warunki notowane są w przypadku ekranu o perforacji 20 i 30%. Przepływ charakteryzuje się jednorodnością i brakiem zawirowań. Prędkość wiatru ulega osłabieniu, współczynnik V/V_0 osiąga wartości w granicach 0,2 – 0,6.

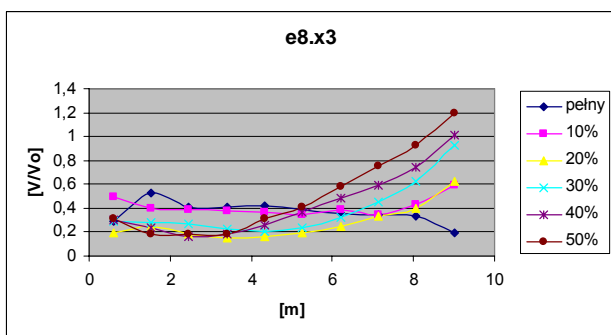
Analizując rozkład prędkości wzdłuż linii równoległej do ekranu i usytuowanej w strefie zawietrznej (y1 – por. rys.1.) należy zauważyć, że ekran pełny i o porowatości, do 30% dostarcza największej osłony por (Rys. 4). Wzdłuż całej ściany ekranu prędkości przepływu są niewielkie, a współczynnik V/V_0 osiąga wartości od 0,1

do 0,5. Otwory w ekranie kształtują przepływ, nadając mu jednorodny charakter.

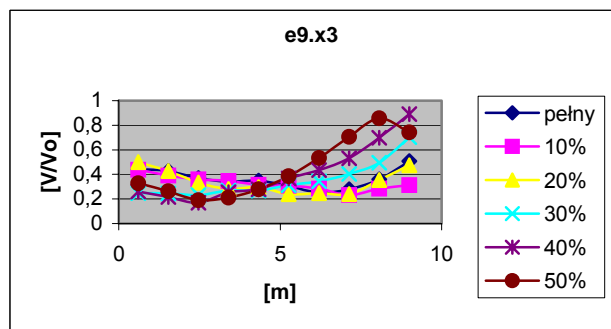
a) wysokość ekranu 4m



b) wysokość ekranu 5m



c) wysokość ekranu 6m



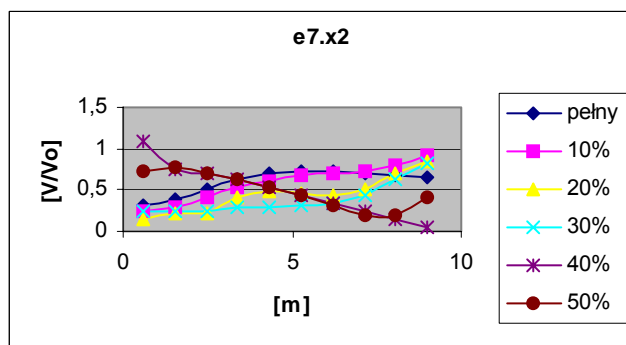
Rys. 2. Rozkład prędkości wiatru wzdłuż linii x3 i ekranów o wysokości 4, 5 i 6m

Fig. 2. Wind speed distribution along line x3 and for three wind screen's height 4, 5 and 6m.

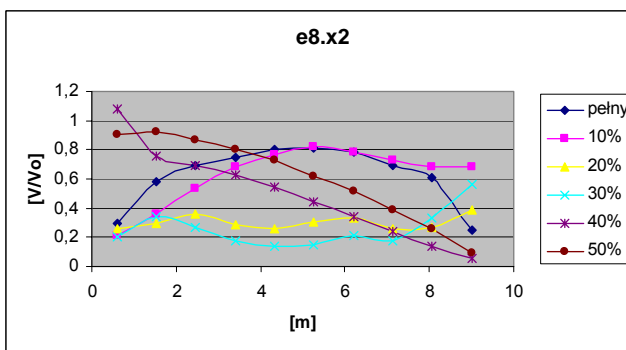
Zwiększenie porowatości powoduje powstanie zaburzeń przepływu. Mimo, iż prędkość przepływu ulega osłabieniu w stosunku do prędkości w strefie odsłoniętej to pojawiają się lokalne zawirowania mogące pogorszyć warunki komfortu pieszych. Szczególnie wyraźnie efekt ten jest widoczny w przypadku, gdy wysokość ekranu wynosi 5m i 6m.

W odległości 3m od narożników ekranu tworzą się dwa wiry i prędkość przepływu gwałtownie wzrasta. Ze względu na fakt, że analizowane prędkości zbierane są na wysokości 1,8m ogromne znaczenie w powyższej strefie odgrywa wysokość usytuowania otworów w ekranie.

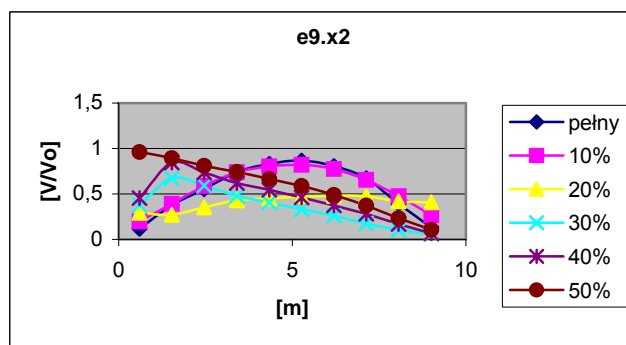
a) wysokość ekranu 4m



b) wysokość ekranu 5m



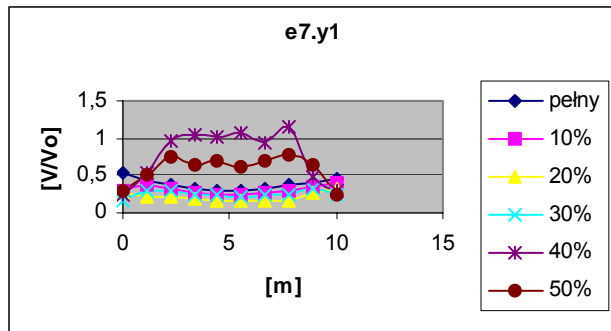
c) wysokość ekranu 6m



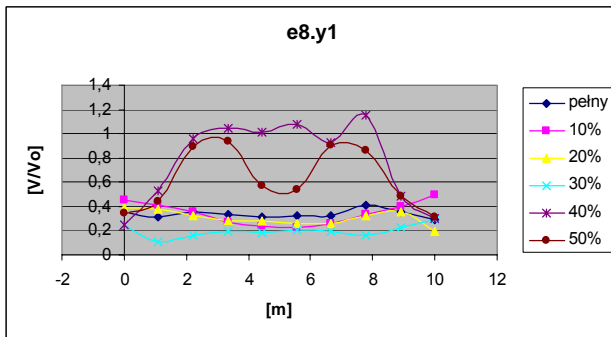
Rys. 3. Rozkład prędkości wiatru wzdłuż linii x2 i ekranów o wysokości 4, 5 i 6m.

Fig. 3. Wind speed distribution along line x2 and for three wind screen's height 4, 5 and 6m.

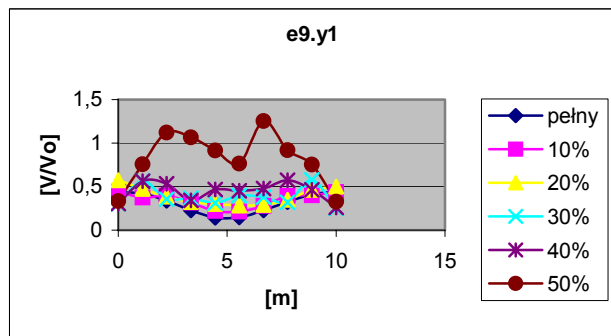
a) wysokość ekranu 4m



b) wysokość ekranu 5m



c) wysokość ekranu 6m



Rys. 4. Rozkład prędkości wiatru wzdłuż linii y1 i ekranów o wysokości 4, 5 i 6m.

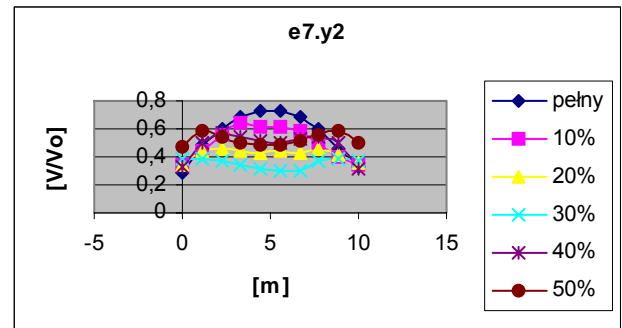
Fig. 4. Wind speed distribution along line y1 and for three wind screen's height 4, 5 and 6m.

W części środkowej, między ekranem a budynkiem (y2 – por. rys.1.) maksymalne prędkości przepływu notowane są w połowie szerokości ekranu por. Rys.5. Zbliżając się ku narożnikom wartości współczynnika V/V_0 ulegają obniżeniu. Trend powyższy jest szczególnie widoczny w przypadku ekranu pełnego i z perforacją 10%. Ekran o niższej wysokości (4m) wywiera mniejszy wpływ na osłabienie przepływu powietrza.

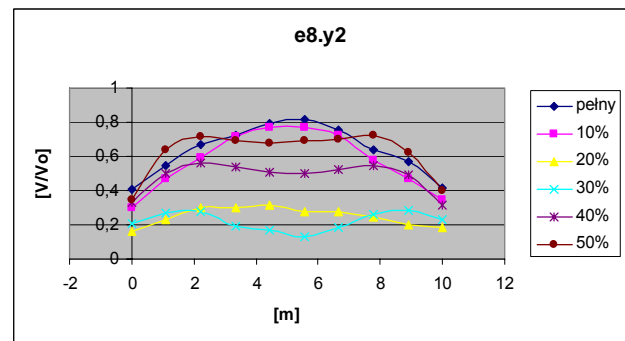
Najkorzystniejsze warunki osłony mają miejsce w przypadku ekranów o perforacji 20 i 30%. Praktycznie na całej długości ekranu V/V_0 przyjmuje zbliżone wartości, w grani-

cach 0,1 – 0,4. Szczególnie szczelną osłonę zapewniają wysokości ekranu 5m i 6m.

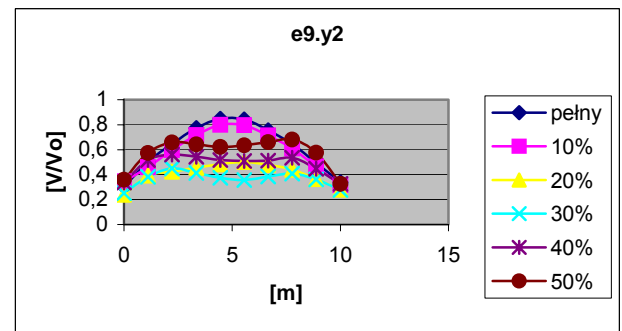
a) wysokość ekranu 4m



b) wysokość ekranu 5m



c) wysokość ekranu 6m



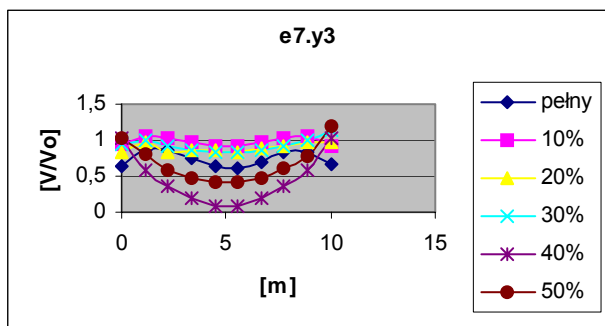
Rys. 5. Rozkład prędkości wiatru wzdłuż linii y2 i ekranów o wysokości 4, 5 i 6m.

Fig. 5. Wind speed distribution along line y2 and for three wind screen's height 4, 5 and 6m.

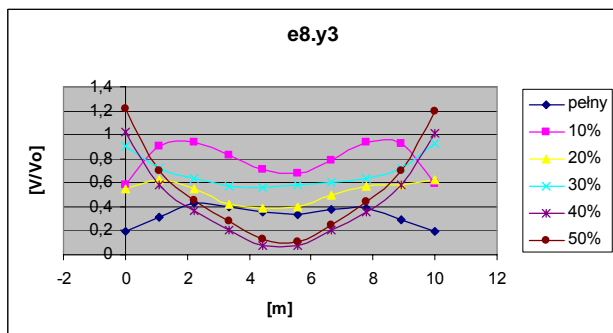
Na rys.6. przedstawiono rozkład prędkości wzdłuż linii równoległej do ekranu i usytuowanej w bezpośrednim sąsiedztwie osłanianego budynku (y3 – por. rys.1). Cechą charakterystyczną przepływu jest osłabienie prędkości w pobliżu centralnej części ściany budynku. Szczególnie wyraźnie cecha ta jest widoczna w przypadku ekranów o znacznej perforacji (30, 40 i 50%) i większej wysokości

(6m). W warunkach powyższych współczynnik V/V_0 osiąga wartość około 0,1. Jednocześnie w przypadku ekranu pełnego i ekranu o perforacji 10% w pobliżu narożników ściany efekt osłony ma wyraźnie mniejsze znaczenie.

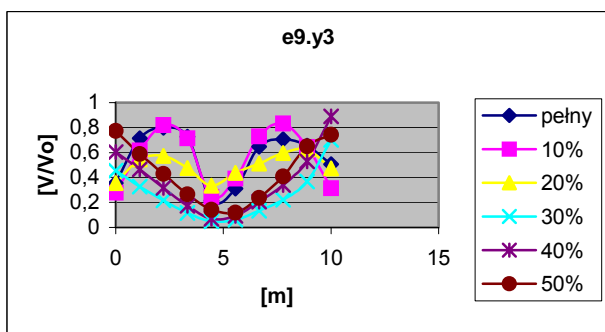
a) wysokość ekranu 4m



b) wysokość ekranu 5m



c) wysokość ekranu 6m



Rys. 6. Rozkład prędkości wiatru wzdłuż linii y3 i ekranów o wysokości 4, 5 i 6m.

Fig. 6. Wind speed distribution along line y3 and for three wind screen's height 4, 5 and 6m.

W przypadku niskiego ekranu, o wysokości 4m zwiększenie perforacji prowadzi do wyraźnego zmniejszenia prędkości przepływu w pobliżu ochranianego budynku. Ekran o wysokości 5m powoduje większe zaburzenia w przepływie. Wyraźnie zaznaczają się wpływy strumieni bocznych budynku, przejawiające się zwiększeniem gradientów prędkości w pobliżu narożników. Najlepsza osłona charaktery-

zuje ekrany o perforacji 20% i 30%. Wzdłuż ściany budynku panują podobne warunki wiatrowe a współczynnik V/V_0 kształtuje się w granicach od 0,4 do 0,6. Podobny obraz przepływu występuje przy zwiększeniu wysokości ekranu do 6m

5. WNIOSKI

Analizy symulacyjne przepływu powietrza w strefie między ekranem wiatrowym a budynkiem wykazały, że nawet niewielkie zmiany wysokości ekranu mają wpływ na charakter przepływu. W przypadku, gdy wysokość osłony była niższa niż wysokość budynku i wynosiła 4m, zasięg obszaru chronionego był zbyt mały. Natomiast przy wysokości 6m zanotowano silniejsze powstawanie wirów po stronie zawietrznej. Pięciometrowy ekran wydaje się być najkorzystniejszym rozwiązaniem, ze względu na dość szczelną osłonę i ograniczone powstawanie zawirowań.

Większe zróżnicowanie zaobserwowano w przypadku zmiennej perforacji ekranu. Ekran pełny, w każdym z wariantów ogranicza prędkość za osłoną. Jednakże bezpośrednio przed budynkiem prędkość ponownie wzrasta, czego powodem jest powstawanie wirów i prądów wstecznych w badanej strefie. Strumienie boczne są natomiast znacznie ograniczone co jest pozytywnym skutkiem.

Przy perforacji ekranu 10% charakterystyka przepływu nieznacznie się różni od przypadku ekranu pełnego. Strefa powstawania wirów ulega ograniczeniu, prędkości są nieco niższe, również strumienie boczne są znacznie ograniczone. Jednak niekorzystnym zjawiskiem jest powstawanie zawirowań, przepływ jest bardzo nierównomierny.

Perforacja 20%, czyli ekran z dwoma otworami wywołuje już znaczne różnice w parametrach przepływu. Prędkość ograniczona jest w analizowanych strefach w znacznym stopniu. Prądy narożne nie są znaczące, natomiast powstają niewielkie zawirowania, których położenie zależy od położenia otworów w osłonie. Generalnie przypadek ten charakteryzuje się dobrą efektywnością.

Przypadek z trzema otworami ma zbliżony charakter, z tym że prędkości w każdej strefie są jeszcze bardziej ograniczone. Jedynie w pobliżu narożników i tuż za osłoną prędkość lokalnie wzrasta. Przepływ staje się płynny, powietrze przenikające osłonę nie tworzy wirów, ale przepływa równoległe do podłoża, dodatkowo obniżając swoją prędkość wraz ze zbliżaniem się do budynku. Jest to wariant o bardzo dobrej efektywności, z pewnością najlepiej wpływałby on na pozytywne odczucia przechodniów.

Ekran o perforacji 40% daje mniej korzystne efekty, przepływ jest płynny, ale nieco szybszy i przez to tworzą się prądy narożne, zaś za osłoną prędkość wzrasta. Mimo tego przypadek z czterema otworami również jest stosunkowo korzystny, głównie z uwagi na brak zawirowań i ograniczenie prędkości w strefie przejścia i w strefie znajdującej się tuż przed budynkiem.

Przypadek 50% perforacji ekranu przypomina wcześniejszy, z tym, że niekorzystne cechy są bardziej spotęgowane. Przepływ jest płynny i równy, ale za to jego prędkość jest większa w całym interesującym nas obszarze, a szczególnie w części za osłoną, co jest naturalnym następstwem występowania dużej liczby otworów. Przypadek ten jest znacznie mniej efektywny niż poprzednie, jego efektywność zwiększa się wraz ze zwiększeniem wysokości osłony.

Podsumowując, najkorzystniejszym przypadkiem jest ekran o wysokości 5m i perforacji 30%. Powoduje on równomierne ograniczenie prędkości w każdej strefie i nie przyczynia się do powstawania zawirowań i turbulencji. Współczynnik zmiany prędkości V/V_0 zmienia się w zakresie od około 0,2 do 0,8. Słuszność tego przypadku potwierdzają również badania prowadzone przez innych autorów.

Wprowadzenie osłony wiatrowej niezależnie od przypadku daje pozytywne skutki. W każdym wariantcie obserwujemy zmniejszenie prędkości wiatru, które średnio sięga 30%. Należy także wziąć pod uwagę fakt, iż wraz ze zmniejszeniem prędkości w jeszcze większym stopniu zmniejsza się siła wiatru, tak więc nawet niewielkie ograniczenie prędkości może dawać znaczące efekty w odczuciach pieszych.

THE INFLUENCE OF WIND SCREEN PARAMETERS ON WIND FLOW CONDITIONS IN RECIRCULATION ZONE

Summary: The paper presents results of numerical simulation of wind flow in recirculation zone located between wind screen and a building. Distance between the screen and the building was constant, as the building's dimension. The height and porosity of the screen were variable. In order to determine wind conditions in the analysed area a number of simulations were carried out in ten equally spaced points along six lines situated perpendicularly and in parallel to the analysed complex.

Literatura

- [1] Klemm K., *Fizyka miasta*. Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Łódź, 1995.
- [2] Klemm K., Jabłoński M., *Effect of windbreak on the wind flow in a small existing urban structure*, Second International Building Physics Conference, Leuven, 2003, s.973-980.
- [3] Melaragno M., *Wind in architectural and environment design*, Nowy Jork, 1982.
- [4] Grudzień D., *Wpływ osłon wiatrowych na przepływ powietrza wokół budynku*, Praca magisterska, Politechnika Łódzka, Łódź, 2007.
- [5] Shih T.H, Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J., *A new $k - \epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows*. Computer Fluids, vol.24(4), 1995, 227 – 238.
- [6] Simiu E., *Wind effects on structures. An introduction to wind engineering*, John Wiley & Sons N.Y., 1986.

