

Marek JABŁOŃSKI¹
Katarzyna KLEMM²

WYKORZYSTANIE SYMULACJI NUMERYCZNEJ DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW PRZEPIYU POWIETRZA

W pracy przedstawiono procedurę wyznaczania podstawowych parametrów wpływających na profil prędkości wiatru tj. współczynnika szorstkości i prędkości tarciowej w oparciu o dane uzyskane z analiz symulacyjnych. W celu uchwycenia wpływu zabudowy na zmianę parametrów kształtujących profil prędkości wiatru przeprowadzono symulację numeryczną w oparciu o turbulencyjny model realizabile $k - \epsilon$. Analizę przeprowadzono dla prostego przypadku obiektu w kształcie walca o wymiarach $\phi=10$ m i $h=10$ m zlokalizowanego w terenie otwartym o szorstkości podłoża $z_o=0,02$ m. Korzystając z uzyskanych danych określono średnie wielkości prędkości u i dyssypacji energii ϵ , na trzech analizowanych wysokościach (2, 12, 16 m), w odległości 0, 21, 42 i 63 m od wlotu. W pierwszym wariancie współczynnik szorstkości i prędkość tarciową wyznaczono korzystając z profilu logarytmicznego prędkości wiatru, przyjmując przemieszczenie płaszczyzny zerowej z_d zgodnie ze wzorem zaproponowanym w pracy [1]. W drugim wariancie wielkości u_x i z_o określono przyjmując założenie, że wystąpił pomijalnie mały efekt turbulencji termicznej $Q_H = 4,7$ W/m². Główną bazą rozważań były równania wynikające z podobieństwa Monina Obukhova i bezwymiarowej funkcji $\Phi_\epsilon(\zeta)$. Wielkości uzyskane w ramach wariantu pierwszego są możliwe do zaakceptowania. Natomiast wyniki otrzymane w wariancie drugim w odległości do 40m od wlotu wielokrotnie przewyższają poziom realny.

Słowa kluczowe: współczynnik szorstkości, prędkość tarciowa, CFD

1. Wprowadzenie

Obszary miejskie charakteryzują się znacznym osłabieniem przepływu powietrza dochodzącym do 30% w stosunku do terenów niezabudowanych [2]. Zasadniczym czynnikiem wpływającym na zaburzenie przepływu jest szorstkość

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Marek Jabłoński, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; tel. 426313560; marek.jablonski@p.lodz.pl

² Katarzyna Klemm, Politechnika Łódzka, Zakład Gospodarki Przestrzennej i Geomatyki, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; tel. 426313512; katarzyna.klemm@p.lodz.pl

podłoża, wywołana obecnością zabudowy. Z punktu widzenia kształtowania korzystnych warunków aerosanitarnych w mieście istotną rolę odgrywają korytarze przewietrzające. Coraz częściej jednak obserwujemy zjawisko zagęszczania zabudowy i zabudowywania tych cennych dla miasta stref. Wprowadzenie nawet pojedynczych budynków w obrębie korytarza może w zasadniczy sposób wpłynąć na wzrost szorstkości podłoża, a w efekcie spowodować zmiany w profilu prędkości wiatru.

Jednocześnie w zwartych strukturach miejskich coraz istotniejszym parametrem staje się temperatura powietrza i podłoża wpływająca na wzrost turbulencji termicznej. Uwzględnienie zarówno mechanicznego jak i termicznego oddziaływania wiatru ma istotne znaczenie z punktu widzenia komfortu człowieka. Aby wspomóc proces planowania musimy dysponować szczegółowymi informacjami na temat parametrów kształtujących przepływ powietrza. Narzędziem często stosowanym w analizach przepływu powietrza między budynkami jest symulacja numeryczna.

W pracy przedstawiono procedurę wyznaczania podstawowych parametrów wpływających na profil prędkości wiatru tj. szorstkości podłoża i prędkości tarciowej w oparciu o dane uzyskane z analiz symulacyjnych.

2. Symulacja numeryczna

W celu uchwycenia wpływu zabudowy na zmianę parametrów kształtujących profil prędkości wiatru przeprowadzono symulację numeryczną w oparciu o turbulencyjny model realizable $k - \epsilon$. W celu określenia parametrów przepływu w sąsiedztwie ścian budynku zastosowano model warstwy przyściennej zaproponowany przez Laundera i Spaldinga [3]. Analizę przeprowadzono dla prostego przypadku obiektu w kształcie walca o wymiarach $\phi=10$ m i $h=10$ m zlokalizowanego w terenie otwartym o szorstkości podłoża $z_o=0,02$ m. Wielkość przyjętej domeny obliczeniowej wynosiła 250 m x 200 m x 50 m i spełniała warunki zalecane w pracy [4]. Na wlocie określono profil prędkości wiatru przyjmując założenie, że $z_o = 0,02$ m, $z_{ref} = 10$ m i $u_{ref} = 4$ m/s. W płaszczyźnie wlotu zdefiniowano ponadto profil energii kinetycznej turbulencji i profil dyssypacji energii kinetycznej turbulencji. Profil dyssypacji energii kinetycznej turbulencji wyznaczono z równania:

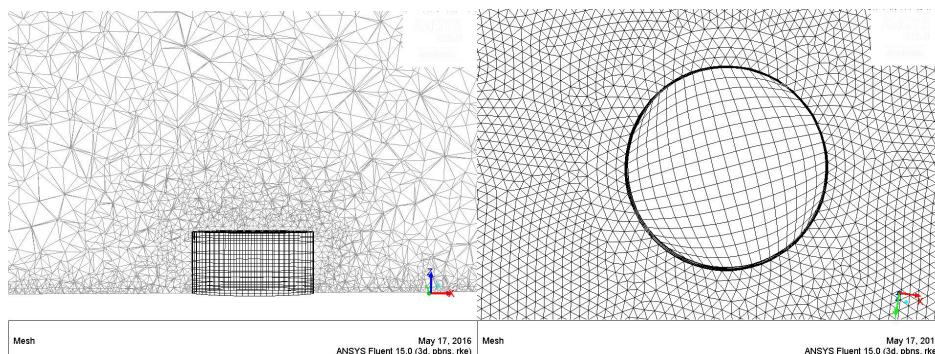
$$\mathcal{E} = \frac{u_x^3}{\kappa \cdot z} \quad (1)$$

gdzie: κ - stała Kármána 0,4,

u_x - prędkość tarciowa [m/s],

z - wysokość [m].

Siatka domeny obliczeniowej zawierała około 2 miliony komórek typu TETRA i HEXA (Rys. 1). Siatkę zagęszczono przy krawędziach modelu, w obszarze spodziewanego oderwania wirów oraz przy podłożu domeny. Zgodnie

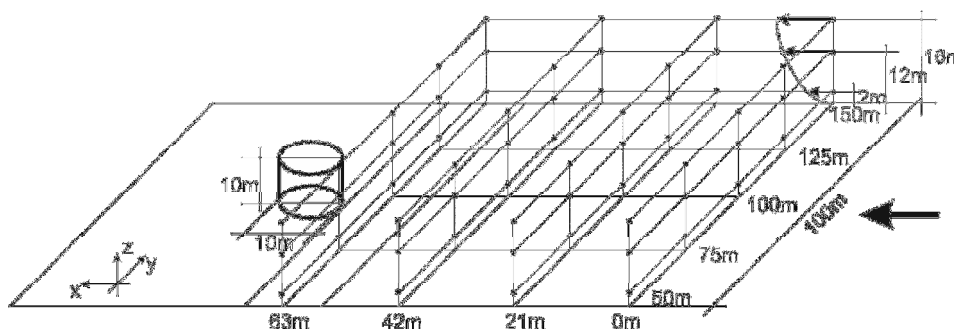


Rys. 1. Przyjęta siatka obliczeniowa

Fig. 1. Computational mesh

z zasadami tworzenia tego typu obiektów gęstość siatki była większa w rejonie większych gradientów prędkości, natomiast mniejsza w obszarach, gdzie przyrosty prędkości były niewielkie.

W wyniku przeprowadzonej analizy symulacyjnej uzyskano rozkład prędkości przepływu powietrza oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji w obrębie domeny obliczeniowej. W dalszej części skupiono się na danych z 60 punktów pomiarowych zlokalizowanych na wysokości 2, 12 i 16 m, w odległości 0, 21, 42 i 63 m od wlotu. Na Rys.2. przedstawiono szczegółową lokalizację punktów oraz podstawowe dane dotyczące analizowanego przypadku.



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych

Fig. 2. Location of measurement points

3. Analiza wyników

W tabelach 1 i 2 przedstawione zostały wartości prędkości przepływu powietrza oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji uzyskane na drodze symulacji numerycznej przy zadanych warunkach brzegowych.

Tabela 1. Prędkości przepływu powietrza [m/s] w strefie dowietrznej analizowanego obiektu uzyskane na drodze symulacji numerycznej

Table 1. Wind speeds [m/s] in an upwind zone of the analysed object obtained by numerical simulation

Wysokość z[m]	y[m]	Odległość od wlotu x [m]			
		0	21	42	63
2	150	2,93	2,77	2,78	2,81
	125	2,93	2,70	2,75	2,85
	100	2,93	2,71	2,55	1,02
	75	2,93	2,76	2,73	2,87
	50	2,93	2,71	2,79	2,90
12	150	4,07	4,07	4,04	4,12
	125	4,08	4,06	4,05	4,13
	100	4,08	4,06	3,99	3,83
	75	4,07	4,06	4,05	4,13
	50	4,08	4,05	4,09	4,08
16	150	4,25	4,26	4,27	4,30
	125	4,26	4,25	4,29	4,33
	100	4,25	4,27	4,20	4,32
	75	4,24	4,26	4,26	4,34
	50	4,25	4,26	4,28	4,30

Tabela 2. Dyssypacja energii kinetycznej turbulencji ϵ [m^2/s^3] w strefie dowietrznej analizowanego obiektu uzyskana na drodze symulacji numerycznej

Table 2. Turbulent kinetic energy dissipation ϵ [m^2/s^3] in an upwind zone of the analysed object obtained by numerical simulation

Wysokość z [m]	y[m]	Odległość od wlotu x [m]			
		0	21	42	63
2	150	0,349	0,027	0,016	0,015
	125	0,349	0,028	0,016	0,016
	100	0,350	0,027	0,018	0,060
	75	0,348	0,026	0,017	0,015
	50	0,349	0,028	0,016	0,013
12	150	0,060	0,030	0,018	0,012
	125	0,059	0,030	0,018	0,012
	100	0,059	0,030	0,018	0,012
	75	0,060	0,030	0,018	0,012
	50	0,060	0,030	0,018	0,012
16	150	0,046	0,027	0,018	0,013
	125	0,045	0,027	0,018	0,013
	100	0,046	0,026	0,018	0,015
	75	0,047	0,026	0,018	0,013
	50	0,045	0,027	0,018	0,013

Korzystając z przedstawionych powyżej danych określono średnie wielkości prędkości u i dyssypacji energii ε , na trzech analizowanych wysokościach. Uzyskane wartości podano w tabelach 3 i 4. W pierwszym wariancie wyznaczania podstawowych parametrów przepływu, tj. współczynnika szorstkości i prędkości tarciowej oparto się na profilu logarytmicznym prędkości wiatru.

$$\bar{U}(z) = \frac{u_x}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad (2)$$

Przemieszczenie płaszczyzny zerowej z_d przyjęto zgodnie ze wzorem zaproponowanym w pracy [1].

$$z_d = h(\lambda_p)^{0,6} \quad (3)$$

gdzie: h - średnia wysokość budynków

λ_p - współczynnik zagęszczenia zabudowy na powierzchni A_T ;
 $\lambda_p = A_p / A_T$,

A_p - powierzchnia zabudowy.

Tabela 3. Prędkość średnia u_z [m/s] w funkcji odległości x i wysokości z

Table 3. Average velocity u_z [m/s] in the function of distance x and height z

Wysokość z [m]	Prędkość średnia u_z Odległość od wlotu x [m]			
	0	21	42	63
2	2,93	2,73	2,72	2,48
12	4,08	4,06	4,04	4,06
16	4,25	4,26	4,26	4,32

Przyjmując logarytmiczny profil prędkości wyznaczono prędkość tarciową u_x oraz szorstkość podłoża dla czterech odległości od wlotu, $x=0$; 21; 42 i 63 m. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 4. Średnia wielkość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ε [m^2/s^3] w funkcji odległości x i wysokości z

Table 4. Average size of turbulent kinetic energy dissipation ε [m^2/s^3] in the function of distance x and height z

Wysokość z (m)	Dyssypacja energii kinetycznej turbulencji ε Odległość od wlotu x [m]			
	0	21	42	63
2	0,441	0,028	0,017	0,015
12	0,058	0,030	0,018	0,013
16	0,043	0,028	0,018	0,013

Tabela 5. Parametry terenu z_d , z_o i prędkość tarcia u_x (wariant I)Table 5. Terrain parameters z_d , z_o and friction velocity u_x (variant I)

Podstawowe parametry	Odległość od wlotu x[m]			
	0	21	42	63
Przesunięcie płaszczyzny zerowej z_d [m] według [1]	0,40	0,50	0,70	1,30
Prędkość tarcia u_x [m/s]	0,22	0,22	0,24	0,40
Szorstkość podłoża z_o [m]	0,010	0,007	0,013	0,190

W drugim wariantcie wielkości u_x i z_o określono przyjmując średnią dyssypację energii kinetycznej turbulencji ϵ , por. tabela 4. Przesunięcie płaszczyzny zerowej z_d określono podobnie jak w wariantcie I. Podane w tabeli 6. wielkości u_x i z_o zostały określone przyjmując założenie, że wystąpił pomijalnie mały efekt turbulencji termicznej $Q_H = 4,7 \text{ W/m}^2$.

Główną bazą rozważań były równania wynikające z podobieństwa Monina - Obukhova i bezwymiarowej funkcji $\Phi_\epsilon(\zeta)$

$$\frac{\epsilon \kappa (z - z_d)}{u_x^3} = \Phi_\epsilon(\zeta), \quad \zeta = (z - z_d)/z_L \quad (4)$$

gdzie: Φ_ϵ – funkcja empiryczna przyjęta według [5]

$$\Phi_\epsilon(\zeta) = [1 - 3\zeta]^{-1} - \zeta \quad (5)$$

oraz z_L – długość Monina – Obukhova [m].

Długość Monina – Obukhova ma postać

$$z_L = \frac{u_x^2}{\kappa g} \cdot \frac{T}{T_x} \quad (6)$$

gdzie: T – temperatura [K]

T_x - skala temperatury [K]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]

$$T_x = - \frac{Q_H}{\rho c_p u_x} \quad (7)$$

gdzie: Q_H – ciepło jawne [W/m^2],

ρ – gęstość powietrza [kg/m^3],
 c_p – ciepło właściwe [$\text{J}/(\text{kg K})$].

Tabela 6. Parametry terenu z_d , z_o i prędkość tarciova u_x (wariant II)Table 6. Terrain parameters z_d , z_o and friction velocity u_x (variant II)

Podstawowe parametry	Odległość od wlotu x[m]			
	0	21	42	63
Przemieszczenie płaszczyzny zerowej z_d [m] według [1]	0,40	0,50	0,70	1,30
Prędkość tarciova u_x [m/s]	0,65	0,56	0,47	0,38
Szorstkość podłoża z_o [m]	1,090	0,740	0,407	0,15

Z przedstawionych w tabelach 5 i 6 danych wynika, że wielkości uzyskane w ramach wariantu I są możliwe do zaakceptowania. Natomiast wyniki otrzymane w drugim wariantcie, w przypadku u_x i z_o wykazują wyraźne niezgodności w strefie zlokalizowanej w odległości do 40 m od wlotu. Prędkości tarcia u_x jak i szorstkości podłoża z_o uzyskane w ramach drugiego wariantu są wielkościami wielokrotnie przewyższającymi poziom realny. Należy jednocześnie zauważyć, że wynik uzyskany w odległości 63 m od wlotu jest zbieżny z wynikiem wariantu I.

4. Wnioski

Przedstawione w pracy dwa warianty wyznaczania podstawowych parametrów u_x i z_o , bazujące na analizie numerycznej mogą być przydatne w ocenie bardziej złożonej struktury zabudowy.

W wariantcie pierwszym pomimo uzyskania dobrego wyniku występuje problem nie uwzględnienia turbulencji termicznej. Wariant drugi stwarza pewne możliwości przybliżonej oceny wystąpienia efektów termicznych. Jednak istotne jest przyjęcie na wlocie właściwego profilu dyssypacji energii kinetycznej turbulencji. Zbyt uproszczona zasada przyjęcia danych powoduje, że z realnymi wielkościami mamy do czynienia dopiero w dalszej odległości od wlotu domeny. Powyższy fakt został potwierdzony w rozpatrywanym w pracy prostym przykładzie odnoszącym się do terenu płaskiego i zlokalizowanego na nim pojedynczego obiektu w kształcie walca.

Uzyskanie w miarę wiarygodnych wyników może nastąpić w przypadku, gdy poza rozwiązaniami numerycznymi przeprowadzone zostaną badania modelowe w celu uzyskania dodatkowych informacji o analizowanym przepływie.

Literatura

- [1] Bottema M., Mestayer P.G.: Urban roughness mapping – validation techniques and some first results, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 1998, pp.163-173.
- [2] Lewińska J.: *Klimat miasta. Zasoby, zagrożenia, kształtowanie*, IGPiK, Kraków 2000.
- [3] Launder B. E., Spalding D.B.: The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 1974, pp.269-289.
- [4] Franke J., Hirsch C., Jensen A.G, Krus H.W., Schatzmann M., Westbury P.S., Miles S.D., Wisse J.A., Wright N.G, *Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment*, Final report, 2004.
- [5] Thiermann V., Grassl H.: The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, *Boundary - Layer Meteorology*, 58, 1992, pp. 367-389.

APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION FOR DETERMINING PARAMETERS OF AIR FLOW

Summary

The paper presents the procedure of determining the basic parameters affecting the wind speed profile, i.e. roughness coefficient and friction velocity based on numerical simulation. In order to show the impact of development on changes in parameters influencing wind speed profile numerical simulation has been carried out based on realizable K- ϵ model. The analysis was conducted for the simple case of cylindrical object with dimensions $\phi=10$ m and $h=10$ m located in the open area with the roughness coefficient $z_0=0,02$ m. Based on obtained numerical results the average values of wind speed and energy dissipation were determined at three heights (2, 12, 16 m) in a distance of 0, 21, 42 and 63 m from the inlet. In a first variant roughness coefficient and friction velocity were determined using the logarithmic wind speed profile, assuming zero plane displacement in accordance with [1]. In the second variant, the size of u_x and z_0 was determined on the assumption that there was a negligible effect of thermal turbulence $Q_H = 4,7\text{W/m}^2$. The consideration were based on equation resulting from Monin Obukhov similarity and dimensionless function $\Phi_\epsilon(\zeta)$. Results obtained in the first variant are acceptable. In contrast, the results obtained in the second variant, at the distance of 40m from the inlet are several times higher than realistic level.

Keywords: roughness coefficient, friction velocity, CFD

DOI:10.7862/rb.2016.193

Przesłano do redakcji: 01.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.