

TURBULENTNY PRZEPLÝW STRUMIENIA POWIETRZA WOKÓŁ POWIERZCHNI CIAŁA LUDZKIEGO (ANALIZA NUMERYCZNA)

Katarzyna KLEMM*, Marek JABŁOŃSKI**

* Politechnika Łódzka, Instytut Architektury

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

** Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i MateriałóW Budowlanych

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: marek.jablonski@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę numeryczną przepływu strumienia powietrza o zmiennej prędkości i intensywności turbulencji wokół modelu ciała człowieka. Określono pola prędkości i ciśnienia wokół powierzchni ciała człowieka.

Słowa kluczowe: model K - ε, analiza numeryczna, prędkość napływu powietrza.

1. WPROWADZENIE

Wzrastające możliwości analizy pola prędkości wokół ciała ludzkiego przy wykorzystaniu rozwijających się metod CFD, były podstawą podjęcia badań w tym zakresie. Szczegółowe poznanie oddziaływania wiatru na człowieka jest interesujące zarówno od strony poznawczej jak i praktycznej. Przy projektowaniu środowiska zewnętrznego istotne stają się informacje na temat oddziaływania dynamicznego i termicznego wiatru na człowieka. Możliwość określenia ciśnienia wiatru wokół ciała człowieka, jego wpływu na układ oddechowy, jak również oddziaływania mechanicznego, prowadzącego niekiedy do utraty równowagi jest podstawą formułowania kryteriów dynamicznego oddziaływania wiatru. Nie bez znaczenia jest wpływ wiatru na straty ciepłne organizmu człowieka. Pełniejsze poznanie wpływów termicznych wiatru stanowi podstawę do sformułowania jednej z grup wymagań komfortu wietrznego.

2. ZAKRES ANALIZ NUMERYCZNYCH

W celu określenia oddziaływań termicznych i dynamicznych wiatru na ciało człowieka przy zmiennych warunkach wiatrowych przeprowadzona została analiza dla różnych prędkości i intensywności turbulencji napływającego strumienia powietrza. Bezpośrednim obszarem zainte-

resowania była strefa wokół ciała ludzkiego. Analiza numeryczna prowadzona była w domenie o kształcie i wymiarach odpowiadających rzeczywistym wielkościom tunelu, w którym prowadzone były badania eksperymentalne [1]. Prędkość średnia napływającego powietrza zakładano na poziomie 0,5m/s, 1,0m/s, 1,5m/s, 2,0m/s, 2,5m/s, przyjmując intensywność turbulencji 5, 7.5 i 10%. Rozpatrywane w pracy przypadki analiz numerycznych pola przepływu wokół ciała człowieka oraz przyjęte założenia podano w tablicy 1.

Tablica 1. Rozpatrywane przypadki i założenia analizy numerycznej

Table.1 Cases analysed

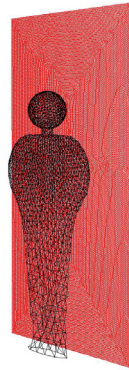
Przypadek	Wlot	Wylot	Prędkość	Intens. turbul.
Przyp. 1	Velocity inlet	Outflow	0.5m/s	5% 7.5% 10%
Przyp. 2	Velocity inlet	Outflow	1.0m/s	5% 7.5% 10%
Przyp. 3	Velocity inlet	Outflow	1.5m/s	5% 7.5% 10%
Przyp. 4	Velocity inlet	Outflow	2.0m/s	5% 7.5% 10%
Przyp. 5	Velocity inlet	Outflow	2.5m/s	5% 7.5% 10%

3. ROZWIĄZANIE ZADANIA

Analiza pola przepływu strumienia powietrza wokół ciała człowieka przeprowadzono korzystając z modelu K - ε.

Podstawowe równania modelu przedstawiono między innymi w pracach [2,3].

Warunki brzegowe przyjęte w płaszczyźnie napływu, tj. prędkość, energia kinetyczna turbulencji i dyssypacja energii były zgodne z odpowiednim profilem uzyskanym z badań eksperymentalnych [4]. W celu odzwierciedlenia geometrycznego kształtu sylwetki człowieka zdefiniowano model geometryczny i wygenerowano siatkę obliczeniową por. rys.1.



Rys.1. Model ciała człowieka i siatka.
Fig. 1. Modeled human body and grid design

Gęstość siatki była większa w rejonach większych gradientów prędkości, mniejsza zaś w obszarach charakteryzujących się przepływem spokojnym. Generator siatki zawierał również algorytm do automatycznego tworzenia trójwymiarowej siatki obliczeniowej z uwzględnieniem modyfikacji na brzegu obszaru oraz funkcji gęstości elementów. Możliwe było wygenerowanie siatki zawierającej różne typy elementów.

Po zdefiniowaniu geometrii i siatki obliczeniowej podano warunki brzegowe i początkowe. Następnie opisano proces przez określenie równań modelu matematycznego i wybór metody ich rozwiązania.

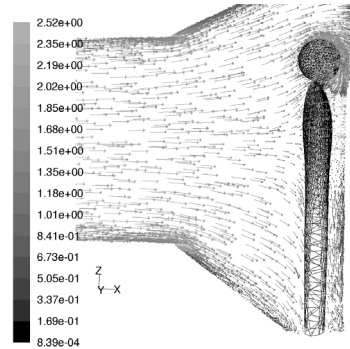
Przyjęty do rozwiązań numerycznych model pozwala dokonać analizy pola prędkości i ciśnienia wokół powierzchni ciała człowieka.

Opracowanie i wizualizacja wyników była możliwa dzięki modułowi postprocesora, który tworzy wykresy i trójwymiarowe obrazy rozkładów wartości parametrów (prędkości, ciśnienia, itd). Pełna trójwymiarowa grafika umożliwia dowolne obracanie i ustawienie obiektów na ekranie oraz analizę w dowolnych przekrojach.

4. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

W pracy rozpatrywane były różne przypadki kształtowania się pola prędkości i ciśnienia wokół powierzchni ciała ludzkiego przy różnych prędkościach strumienia powietrza w tunelu.

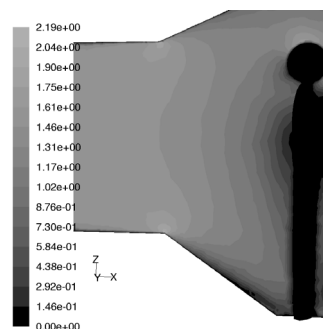
Analogicznie do rozkładu prędkości w pobliżu ściany dowiejtrzej budynku struga powietrza uderzając w ciało człowieka ulega zatrzymaniu na wysokości równej ok. 2/3 wysokości człowieka. W miejscu tym, zwanym punktem stagnacji następuje rozdzielenie strumienia. Część powietrza spływa wzdłuż ciała w kierunku stóp, gdzie przy zetknięciu z podłożem tworzy zawirowanie. Pozostała część, przepływając ku górze i na boki przyspiesza w rejonie głowy i ramion, z uwagi na zmiany w kształcie ciała człowieka. (Rys. 2)



Rys.2. Wektory prędkości wokół ciała człowieka.
Fig. 2. Vector velocity distribution around human body

Rozpatrując napływ powietrza z kierunku prostopadłego do modelu człowieka maksymalne prędkości przepływu notowane są nad głową, w pobliżu ramion (w szczególności między szyją a uszami) oraz po stronie zawiętrznej w dolnej części głowy. Istnienie tych stref związane jest odpowiednio ze wzrostem gradientów przepływu nad zaokrąglonym kształtem głowy oraz z silnym spływem powietrza w dół za głową. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne na rysunkach przedstawiającym wektory i pola prędkości wokół ciała ludzkiego (Rys.2 i Rys.3).

Ogólny obraz przepływu powietrza jest zbliżony we wszystkich przypadkach, niezależnie od prędkości i intensywności turbulencji strumienia na wlocie. Zmianom podlegają głównie wartości prędkości notowane w poszczególnych strefach przepływu.



Rys.3. Pola prędkości wokół ciała człowieka
Fig. 3. Velocity field around human body

Rozkład ciśnienia na ciele człowieka przedstawiono w postaci bezwymiarowego współczynnika ciśnienia, definiowanego jako:

$$C_p = \frac{(p - p_{ref})}{q_{ref}}$$

gdzie: p – ciśnienie statyczne

p_{ref} – ciśnienie referencyjne (przyjęte jako równe 0)

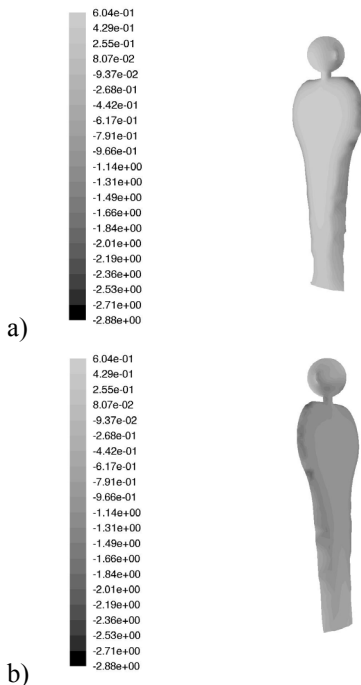
q_{ref} – referencyjne ciśnienie dynamiczne ($1/2\rho_{ref}V_{ref}^2$)

V_{ref} – 1 m/s

ρ_{ref} – 1,225 kg/m³

Na rys. 4a przedstawiono wartości współczynnika ciśnienia na dowieznej powierzchni ciała człowieka. Maksymalne wartości współczynnika notowane są w centralnej części ciała i na twarzy. W miarę oddalania się od środka tułowia współczynnik ulega zmniejszeniu i w pobliżu krawędzi ciała osiąga wartości minimalne.

Po stronie zawietrznej współczynnik przyjmuje wartości ujemne. Wyraźnie zaznacza się jednak strefa charakteryzująca się nieco wyższymi wartościami. Obejmuje ona górną część głowy. Poniżej tej strefy ciśnienie spada i poniżej uszu tworzy obszar charakteryzujący się najniższymi wartościami współczynnika. (rys.4b). Strefa niskiego ciśnienia obserwowana jest również w pobliżu ramion. W dolnej części ciała, w pobliżu nóg ciśnienie nadal utrzymuje wartości ujemne są one jednak nieco wyższe.

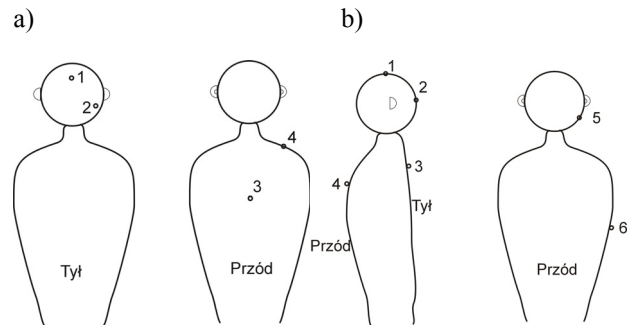


Rys.4. Rozkład ciśnienia na dowieznej (a) i zawietrznej (b) stronie ciała człowieka.

Fig. 4. Pressure fields on windward (a) and leeward (b) side of human body

W celu dokładniejszej analizy wpływu prędkości napływającego powietrza na rozkład prędkości i ciśnienia w pobliżu ciała człowieka dokonano zestawienia otrzymanych wartości dla wybranych punktów pomiarowych. Na rys. 5 przedstawiono lokalizację przyjętych punktów.

Wartości średnie współczynnika ciśnienia i prędkości wyznaczono dla poszczególnych prędkości napływającego powietrza i intensywności turbulencji od 5% do 10%. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tab.2 i Tab.3.



Rys.5. Punkty pomiarowe współczynnika ciśnienia (a) i prędkości przepływu (b)

Fig. 5. Measuring point of pressure coefficient (a) and wind speed (b)

Tab.2 Wartości średnie współczynnika ciśnienia w wybranych punktach dla różnych prędkości napływającego strumienia powietrza i przy intensywności turbulencji od 5%-10%

Tab.2. Mean values of pressure coefficient in selected points under different speed of approaching flow and turbulence intensity from 5% to 10%

Prędkość napływającego strumienia	Wartość średnia współczynnika ciśnienia			
	Punkty pomiarowe			
	1	2	3	4
0,5	-0,16	-0,64	0,20	-0,68
1,0	-0,50	-2,60	1,00	-1,92
1,5	-1,27	-5,42	2,00	-4,10
2,0	-1,67	-9,20	3,48	-5,17
2,5	-2,67	-11,93	5,58	-5,83

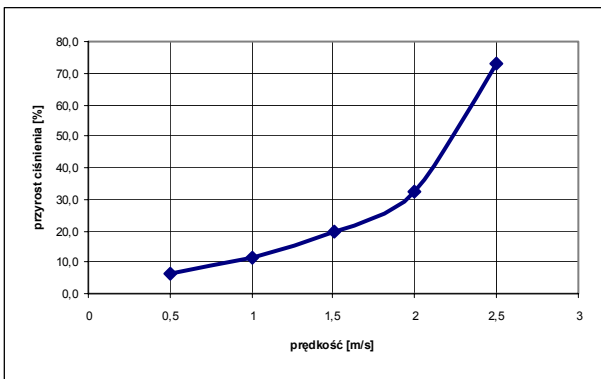
W kolejnym etapie zwiększano intensywność turbulencji napływającego strumienia powietrza i obserwowano zmiany współczynnika ciśnienia i prędkości przepływu w wyznaczonych wcześniej punktach kontrolnych. Analizując wpływ zmiany intensywności turbulencji (5%, 7,5%, 10% przy danej prędkości zbliżającego się przepływu) na rozkład ciśnienia i prędkości należy zauważyć, że jest on niejednakowy w obrębie ciała ludzkiego. Najwyraźniejsza zależność notowana jest w przypadku współczynnika ciśnienia na zawietrznej stronie ciała człowieka (punkty 1 i 2).

Tab.3 Wartości średnie prędkości przepływu w wybranych punktach dla różnych prędkości napływającego strumienia powietrza i przy intensywności turbulencji od 5%-10%

Tab.3 Mean wind speed in selected points under different speed of approaching flow and turbulence intensity from 5% to 10%

Prędkość napływającego strumienia	Wartość średnia prędkości					
	Punkty pomiarowe					
	1	2	3	4	5	6
0,5	0,61	0,61	0,02	0,06	0,53	0,32
1,0	1,17	1,26	0,04	0,12	1,55	0,62
1,5	1,72	1,80	0,06	0,17	2,22	1,09
2,0	2,31	2,37	0,07	0,18	2,92	1,39
2,5	2,82	2,83	0,20	0,40	3,61	1,72

Zwiększenie intensywności turbulencji strumienia powoduje wyraźny wzrost współczynnika ciśnienia, niezależnie od prędkości napływającego powietrza. Jedynie wielkość poszczególnych przyrostów jest zróżnicowana dla poszczególnych prędkości na wlocie i waha się od 6% do ponad 70%. W przypadku prędkości w punktach 1 i 2 tj. w strefach nad i za głową notujemy spadek wartości wraz ze wzrostem intensywności turbulencji. Jest on jednak niewielki i waha się w granicach kilku procent. W pozostałych punktach pomiarowych nie można zauważyć wyraźnych tendencji. W zależności od lokalizacji punktu pomiarowego zwiększenie intensywności turbulencji, przy danej prędkości strumienia głównego powoduje spadek lub wzrost notowanych wartości. Niekiedy zaznacza się zdecydowany brak wpływu na wielkość przepływu.



Rys.6. Zależność współczynnika ciśnienia od zmian intensywności turbulencji dla określonych prędkości napływającego powietrza w punkcie pomiarowym 2.

Fig. 6. Effect of changes in turbulence intensity on pressure coefficient for selected velocities of approaching flow in control point 2.

Na rys.6 przedstawiono zależność współczynnika ciśnienia od zmian intensywności turbulencji dla określonych

prędkości napływającego powietrza w punkcie pomiarowym 2.

5. WNIOSKI

W pracy przeanalizowano za pomocą turbulentnego modelu $K - \epsilon$ wpływ wiatru na ciało człowieka przy różnych warunkach wiatrowych. Otrzymane wyniki pozwalają na oszacowanie pola prędkości i ciśnienia wokół powierzchni ciała.

O dynamicznym wpływie wiatru na ciało człowieka decyduje nie tylko prędkość zbliżającego się strumienia powietrza ale również intensywność turbulencji.

TURBULENT AIRFLOW AROUND HUMAN BODY (NUMERICAL ANALYSIS)

Summary: The paper presents numerical simulation of wind flow around model of human body under various wind conditions. The influence of different speed and turbulence intensity of approaching flow were examined. The velocity and pressure fields around human body were computed in detail.

Literatura

- [1] Klemm K., Jabłoński M.: *Symulacja numeryczna ruchu powietrza w otoczeniu odsłoniętych części ciała człowieka*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce 2005 Tom I s.177-182
- [2] Launder B.E. and Spalding D.B.: *The numerical computation of turbulent flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, 1974 s.269-289
- [3] Klemm K., Jabłoński M.: *Effect of windbreak on the wind flow in a small existing urban structure*.: Proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics. Research in Building Physics. Antwerpen Belgium 2003 s. 973-980
- [4] Klemm, K., Konca, P.: *Pomiar prędkości i temperatury wokół ciała człowieka poddanego oddziaływani strumienia powietrza*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. Tom II, 2007