

Barbara LIPSKA
Politechnika Śląska

WYKORZYSTANIE EKSPERYMENTU DO POPRAWY WYNIKÓW OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH PRZEPIYU POWIETRZA W POMIESZCZENIU WENTYLOWANYM

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki eksperymentalnej weryfikacji obliczeń numerycznych za pomocą programu komputerowego CFD Vortex-2 przepływu powietrza w wentylowanym modelu hali sportowej w Monachium (Niemcy). Artykuł odpowiada na pytanie, w jaki sposób można skorygować prognozowany obraz średniej prędkości powietrza wykorzystując do tego celu dane eksperymentalne.

USING EXPERIMENT TO CORRECT PREDICTED AIRFLOW PARAMETERS IN VENTILATED ROOM

Summary. The paper presents experimental verification of numerical prediction of airflow in the physical scale model of the sport hall in Munich (Germany) by means of CFD code Vortex-2. The question how to correct the predicted mean velocity fields by using experimental data is also answered.

Mimo ciągłego udoskonalania techniki CFD modele matematyczne przepływów powietrza w pomieszczeniach wentylowanych, na których bazują obecnie programy komputerowe, są nadal uproszczonym opisem rzeczywistości. W związku z tym wiarygodność tych programów musi być sprawdzona poprzez porównanie rezultatów obliczeń numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych odpowiednich rzeczywistych przepływów. W wielu ośrodkach badawczych zajmujących się techniką CFD w zastosowaniu do wentylacji dostrzeżono w ostatnich latach taką potrzebę. Porównania tego typu były przedmiotem prac w Aneksie 26 IEA [1], w trakcie którego przebadano obiekty wentylowane różnego przeznaczenia w ramach tzw. Case Study. Ponieważ pomiary parametrów powietrza wentylacyjnego prowadzone były najczęściej w warunkach in situ, sprawdzenie

eksperymentalne wyników obliczeń tych wielkości za pomocą programów komputerowych bazujących na technice CFD miało charakter fragmentaryczny, jak to np. pokazano już w [5]. Nie wypracowano więc dotąd pełnej metodyki takich badań porównawczych. Konieczność uwiarygodnienia wyników obliczeń poprzez sprawdzenie eksperymentalne występuje zwłaszcza w przypadku posługiwania się programami komputerowymi o charakterze inżynierskim. Programy takie zawierają jedynie podstawowe opcje techniki CFD i zmuszają korzystających z nich do wprowadzania szeregu założeń upraszczających modelowany obiekt i przepływ.

W prezentowanym artykule przedstawiono sprawdzenie eksperymentalne obliczeń przepływów powietrza w modelu pomieszczenia wentylowanego za pomocą inżynierskiego programu CFD Vortex-2 [6]. Celem artykułu było też wskazanie na przykładzie tego obiektu, w jaki sposób, stosując ograniczone środki dostępne w programie inżynierskim, można poprawiać wyniki obliczeń numerycznych, wykorzystując przy tym uzyskane z pomiarów dane.

1. Opis badanego obiektu

Za pomocą programu Vortex-2 dokonano prognozowania przepływu powietrza wentylacyjnego w znajdującym się w laboratorium Katedry OWiTO modelu fragmentu hali sportowej w Monachium w skali 1: 1,75. W modelu tym przeprowadzone zostały również badania eksperymentalne w celu identyfikacji turbulentnego przepływu powietrza.

Schemat modelowanego trójwymiarowego obiektu przedstawiono na rys.1. Obliczenia i pomiary wykonano w nim dla następujących geometrycznych warunków brzegowych:

- wymiary geometryczne modelu hali:

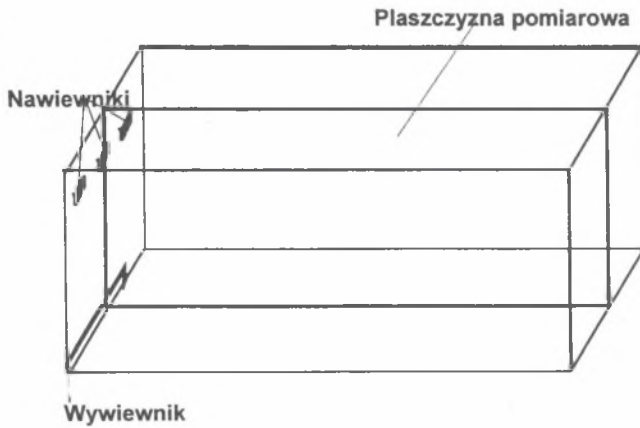
długość: 8,57 m, szerokość: 5,64 m, wysokość: 3,165 m,

- otwory nawiewne:

w modelu fizycznym 3 otwory okrągłe o średnicy 0,1 m każdy, w obliczeniach ze względu na ograniczenia w programie zastąpione 3 otworami kwadratowymi o takim samym polu powierzchni, czyli o wymiarze boku 0,093 m, zlokalizowane na jednej ścianie wzdłuż szerokości pomieszczenia na wysokości $h=1,8075$ m od podłogi,

- otwór wywiewny:

jeden otwór wywiewny usytuowany u dołu tej samej ściany, co otwory nawiewne, jego wymiar taki sam w modelu obliczeniowym, jak w fizycznym: długość: 4,03 m, wysokość 0,03 m.



Rys.1. Schemat pomieszczenia modelowanego numerycznie
Fig.1. Configuration of the modelling room

2. Metodyka porównywania wyników obliczeń numerycznych i pomiarów

Porównaniem objęto prędkość przepływu powietrza w wybranym przekroju podłużnym pomieszczenia, przechodzącym przez środek środkowego otworu nawiewnego (rys.1). W tym przekroju w siatce pomiarowej o $16 \cdot 14 = 224$ punktach zmierzono za pomocą anemometru sferycznego wartość średnią wypadkowej prędkości: $\overline{w_m} = \sqrt{\overline{w_x^2} + \overline{w_y^2} + \overline{w_z^2}}$ oraz wariancje fluktuacji prędkości. Za pomocą programu komputerowego Vortex-2 obliczono natomiast w węzłach siatki dyskretyzacji składowe wektora prędkości średniej $\overline{w_x}$, $\overline{w_y}$, $\overline{w_z}$ oraz energię kinetyczną turbulencji k . Nie było więc możliwości bezpośredniego porównania wyników pomiarów i obliczeń. Wobec tego porównywano wartości średniokwadratowe modułu prędkości, które mogły być wyznaczone zarówno na podstawie wyników obliczeń ze wzoru:

$$\sqrt{w^2} = \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2 + 2k} \quad (1)$$

jak i pomiarów na podstawie zależności:

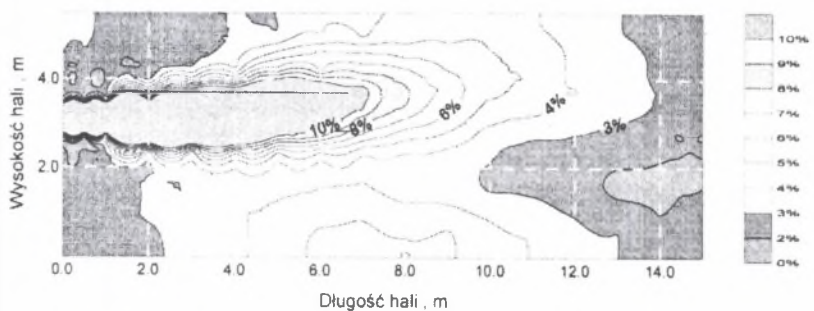
$$\sqrt{w^2} = \sqrt{w_m^2 + w_m'^2} \quad (2)$$

Wartości te obliczono posługując się arkuszem kalkulacyjnym Excel. Wyniki porównania przedstawiano w postaci obrazów przepływu powietrza w pomieszczeniu (izotach dla wartości średniokwadratowych modułu prędkości unormowanych przez prędkość w otworze nawiewnym), narysowanych za pomocą programu graficznego Surfer.

Na rys.2 przedstawiono obraz przepływu powietrza w środkowym przekroju modelowanego pomieszczenia w postaci izotach dla wartości średniokwadratowych modułu prędkości unormowanych przez prędkość w otworze nawiewnym, uzyskany w wyniku pomiarów dla następujących cieplnych i aerodynamicznych warunków brzegowych:

- średnia prędkość nawiewu powietrza $w = 3,62$ m/s,
- struga nawiewana izotermiczna, temperatura powietrza nawiewanego $t = 22^\circ\text{C}$, równa temperaturze otaczających pomieszczenie ścian.

Wszystkie prezentowane wyniki odniesiono do wymiarów obiektu rzeczywistego.



Rys.2. Obraz izotach dla wartości średniokwadratowych modułu prędkości unormowanych przez prędkość w otworze nawiewnym w środkowym przekroju modelowanego pomieszczenia uzyskany z pomiarów
 Fig.2. Measured velocity field (mean square of the velocity vector absolute value of normalised by inlet velocity) in central plane along the room

3. Wpływ zagęszczenia siatki dyskretyzacji na wyniki obliczeń numerycznych

Jednym z istotnych czynników decydujących o dokładności rozwiązania numerycznego jest dobór siatki dyskretyzacji. Dotyczy to zarówno struktury siatki, jak i jej zagęszczenia. Problematyka wyboru rodzaju siatki pośród siatek strukturalnych i niestructuralnych była szeroko reprezentowana w pracach Aneksu 26 IEA [1] i przedstawiano ją w [4]. Jest sprawą oczywistą, że ze wzrostem liczby węzłów siatki dyskretyzacji rośnie dokładność rozwiązania. Jednocześnie wzrastają również nieliniowo nakłady na obliczenia komputerowe. W związku z tym koszt uzyskania wyników dla siatki tak gęstej, że dokładność jest już niezależna od wielkości jej oczek, może stanowić przeszkodę dla przeprowadzania obliczeń. Dlatego też istotny jest taki dobór zagęszczenie siatki, aby zapewnić kompromis pomiędzy dokładnością rozwiązania a nakładami na obliczenia komputerowe. Droga do kompromisu prowadzi na pewno przez porównanie wyników obliczeń i badań eksperymentalnych. Do oceny wpływu liczby i wielkości oczek siatki na dokładność rozwiązania Borth i Suter [2] wprowadzili bezwymiarową liczbę G opisaną w [5]. Dla przypadków przebadanych numerycznie i eksperymentalnie wyciągnęli wniosek, że taką kompromisową wartością jest $N = 32\ 000$ węzłów siatki, co odpowiadało $G \approx 1,9$. Przy większych wartościach G można było uzyskać rezultaty poprawne jedynie w sensie jakościowym. W przypadku badanego pomieszczenia było tak przy około 4000 oczek, co odpowiadało wartości $G \approx 8$. Natomiast aby uzyskać bardziej dokładne wyniki obliczeń energii kinetycznej turbulencji wskazane jest zastosowanie wartości $G < 1$, co zostało stwierdzone na przykładzie siatki o 108 000 oczek.

Specyfika programu inżynierskiego, jakim jest analizowany program Vortex-2, ogranicza zagadnienie struktury do siatki ortogonalnej kartezjańskiej nierównomiernie zagęszczonej. Daje jednak możliwość zmian zagęszczenia siatki, przy czym w uniwersyteckiej wersji programu, którą dysponowano, występuje ograniczenie liczby węzłów do 90 000.

Dokonano badania wpływu zagęszczenia siatki dyskretyzacji na obliczony rozkład prędkości średniokwadratowej w modelowanym pomieszczeniu, dokonując obliczeń dla wybranej liczby: $5 \cdot 14 \cdot 29 = 2030$, $34 \cdot 30 \cdot 32 = 32640$ oraz $50 \cdot 45 \cdot 40 = 90\ 000$ oczek, co przy geometrycznych i aerodynamicznych warunkach brzegowych jak w modelu fizycznym pomieszczenia odpowiadało wartościom liczby G : 7,27; 1,14; 0,58. W przypadku pierwszej siatki uzyskano rezultaty w ogóle odbiegające od rzeczywistego obrazu przepływu. Wyniki obliczeń dla dwóch pozostałych przypadków przedstawiono na rys.3. Ich porównanie ze

zmierzonym w pomieszczeniu obrazem izotach (rys.2) wyraźnie pokazuje, że wzrost zagęszczenia siatki wpływa decydująco na poprawę dokładności uzyskanego rozwiązania. Obliczone obrazy przepływów nie potwierdzają w pełni wniosków Bortha i Sutera odnośnie do liczby G , zwłaszcza jej kompromisowej wartości przy około 32 000 oczek.

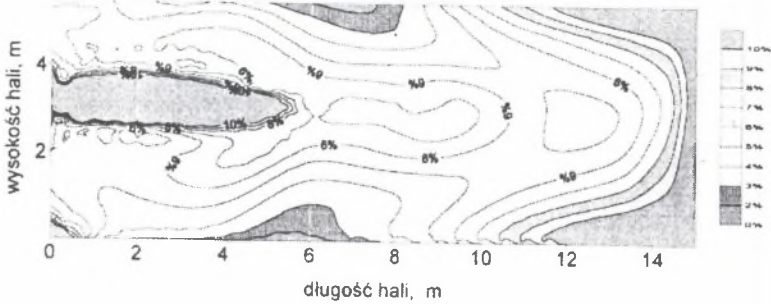
4. Wpływ warunków brzegowych w otworach nawiewnych na rezultaty obliczeń numerycznych

Z wcześniejszych doświadczeń wynika, że kolejnym czynnikiem mogącym mieć istotny wpływ na obliczony rozkład parametrów powietrza w pomieszczeniu jest sposób zadawania warunków brzegowych w otworze nawiewnym lub w strudze nawiewanej. W programie Vortex-2 są ograniczenia w tym zakresie, gdyż wprowadza się warunki brzegowe tylko bezpośrednio w otworze, przy czym istnieje możliwość korygowania parametrów powietrza nawiewanego, z ewentualnym wykorzystaniem przy tym danych eksperymentalnych. W badanym przypadku posłużono się przy zadawaniu warunków metodą szczelinową, dokonując zamiany otworu kołowego na kwadratowy przy zachowaniu efektywnego pola powierzchni oraz metodą stałego pędu [3, 4].

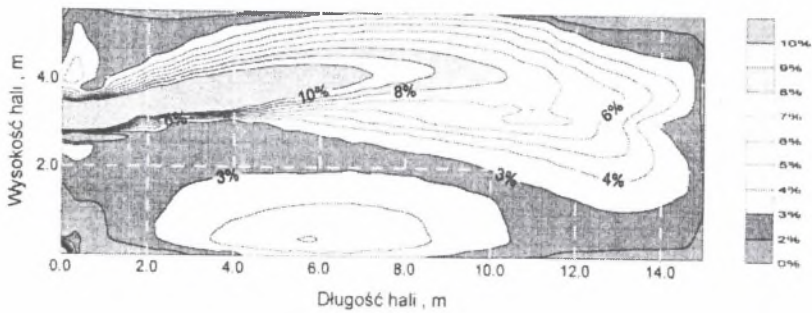
4.1. Badanie wpływu zadanej wartości intensywności turbulencji

Intensywność turbulencji powietrza wypływającego z otworu nawiewnego silnie oddziałuje na obraz przepływu strugi powietrza nawiewanego. Aby prawidłowo zamodelować numerycznie przepływ tej strugi, należy m.in. zadać odpowiednią wartość tego parametru w otworze nawiewnym. Zbadano wpływ zadanej wartości intensywności turbulencji, zmienianej w zakresie od 5 do 50%, na wyniki obliczeń rozkładów prędkości powietrza w badanym pomieszczeniu. Nie zmieniano przy tym innych warunków brzegowych oraz stosowano siatkę dyskretyzacji o maksymalnej liczbie oczek. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych pokazano na rys. 3b) dla $Tu=20\%$, 4a) dla 5% oraz 4b) dla 50%.

Z rezultatów obliczeń można wywnioskować, że zadana intensywność turbulencji ma wpływ na obliczony zasięg i szerokość strugi. Najbardziej zbliżony do zmierzonego w modelowanym obiekcie obraz przepływu powietrza (rys.2) uzyskano, gdy zadano intensywność turbulencji $Tu=20\%$. Jak się okazuje, jest to wartość odpowiadająca rzeczywistej dla tego typu nawiewnika.



a)



b)

w_N	T_u	F_N
m/s	%	m^2
3,62	20	0,008

Rys.3. Obrazy izotach dla wartości średniokwadratowych modułu prędkości unormowanych przez prędkość w otworze nawiewnym w środkowym przekroju modelowanego pomieszczenia dla siatek dyskretyzacji:

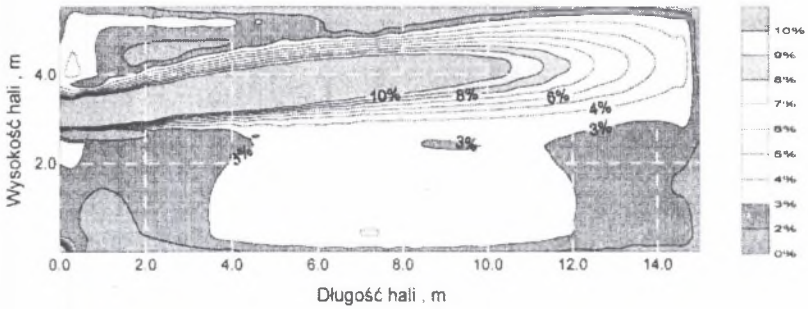
a) $34 \times 30 \times 32 = 32\ 640$ oczek,

b) $50 \times 45 \times 40 = 90\ 000$ oczek

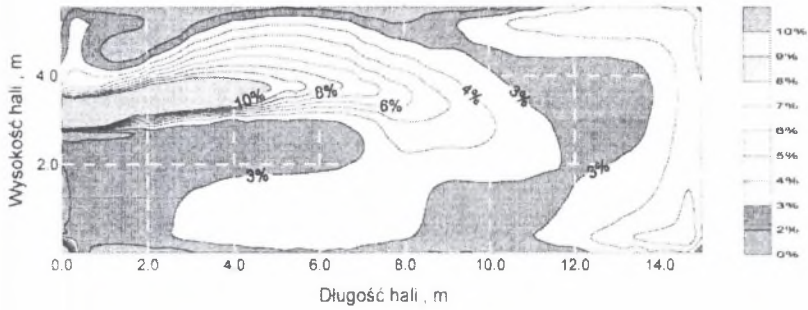
Fig.3. Predicted velocity fields (mean square of the velocity vector absolute value normalised by inlet velocity) in central plane along the room for the computational grids:

a) $34 \times 30 \times 32 = 32\ 640$ cells,

b) $50 \times 45 \times 40 = 90\ 000$ cells



a)



b)

	w_N	Tu	F_N
	m/s	%	m^2
a)	3,62	5	0,008
b)	3,62	50	0,008

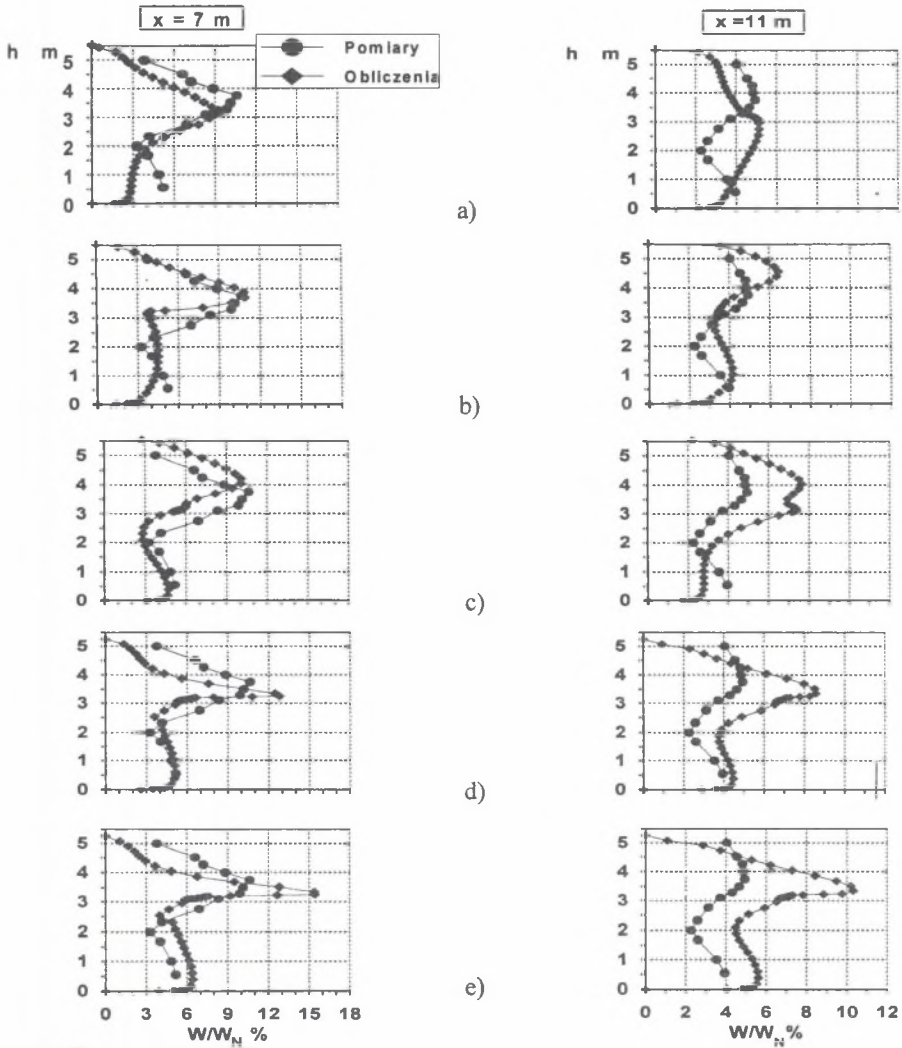
Rys.4. Wpływ intensywności turbulencji zadanej w otworze nawiewnym na obraz izotach dla wartości średniokwadratowych modułu prędkości unormowanych przez prędkość w otworze nawiewnym w środkowym przekroju modelowanego pomieszczenia

Fig.4. Effect of the turbulence intensity assumed in inlet on velocity field (mean square of the velocity vector absolute value normalised by inlet velocity) in central plane along the room

4.2. Wykorzystanie metody stałego pędu

W celu poprawy dokładności modelowania numerycznego strug nawiewanych w dalszej odległości od nawiewnika stosuje się w badawczych programach komputerowych CFD wprowadzanie do obliczeń parametrów powietrza w strefie głównej strugi nawiewanej np. metodą box lub metodą zadanej prędkości [4]. Nie dysponując w programie Vortex-2 taką możliwością, podjęto próbę obliczeniowego kształtowania parametrów strugi nawiewanej przez korektę warunków brzegowych w otworach nawiewnych metodą stałego pędu. Zmieniano mianowicie w zakresie $\pm 50\%$ zadawaną w nich prędkość nawiewu i zachowując stałą wartość pędu w wylotowym przekroju strugi nawiewanej, wyznaczano powierzchnię otworu nawiewnego. Badano, jak zmiana ta wpływa na obliczony rozkład parametrów powietrza w tej strudze w dalszej odległości od nawiewnika oraz w strefie przebywania ludzi w dolnej części pomieszczenia. Porównanie z eksperymentem wyników obliczeń dla różnych prędkości nawiewu i wymiarów otworu przy zachowaniu jego kwadratowego kształtu przedstawiono na rys.5 w postaci rozkładów na wysokości pomieszczenia obliczonych i zmierzonych wartości prędkości średniokwadratowych w odległości $x=7$ i 11 m od wylotu z nawiewnika

W zbadanych przypadkach nie udało się jeszcze uzyskać pełnej zgodności obliczonych i zmierzonych profili prędkości. Zaobserwowano jednak wyraźny wpływ zmiany parametrów w otworze na obliczony rozkład prędkości w dalszych częściach pomieszczenia. W strefie głównej strugi nawiewanej w odległości $x=7$ m i w strefie recyrkulacji w odległości 11 m najbardziej zbliżone do zmierzonego były rozkłady prędkości, gdy prędkość nawiewu stanowiła 80% prędkości średniej zmierzonej w nawiewniku (rys.5b). Zwiększanie prędkości powyżej tej wartości powodowało wzrost rozbieżności, obliczone wartości przekraczały znacznie zmierzone (rys.5d,e). Natomiast w dolnej części pomieszczenia w strefie przebywania ludzi najlepsze rezultaty uzyskano dla prędkości nawiewu większej o 20% od zmierzonej (rys.5d). Oznacza to, że przy korzystaniu z metody stałego pędu do korekty rozkładów prędkości powietrza w strudze nawiewanej powinno się dokonywać niewielkich w stosunku do wartości wyjściowej zmian prędkości nawiewu.



	w_N m/s	Tu %	F_N m ²
a)	1,81	20	0,034
b)	2,89	20	0,013
c)	3,62	20	0,008
d)	4,34	20	0,006
e)	5,34	20	0,003

Rys.5. Zmierzone i obliczone rozkłady wartości średniokwadratowych modułu prędkości unormowanych przez prędkość w otworze nawiewnym $w_N=3,62$ m/s na wysokości pomieszczenia w jego środkowym przekroju przy stosowaniu metody stałego pędu

Fig.5. Vertical profiles of velocity (mean square of the velocity vector absolute value normalised by inlet velocity $w_N = 3,62$ m/s) in central plane along the room used the momentum method

5. Wnioski

Przy stosowaniu inżynierskiego programu komputerowego CFD istnieje możliwość poprawienia zgodności wyników obliczeń z wynikami pomiarów w obiektach rzeczywistych.

W programach tego typu występuje ograniczenie liczby oczek siatki na średnim poziomie w stosunku do liczby stosowanej przy obliczeniach pakietami badawczymi. Ze względu na to w większości przypadków obliczeniowych, zwłaszcza dla dużych pomieszczeń, wskazane jest wykorzystywanie siatki dyskretyzacji o największym możliwym zagęszczeniu.

Aby poprawić wyniki obliczeń, zalecane jest wprowadzanie jako warunków brzegowych w otworach nawiewnych danych eksperymentalnych dotyczących intensywności turbulencji w przekroju wylotowym strugi nawiewanej dla nawiewników badanego typu. Celowe jest również wykorzystanie dokładnych danych pomiarowych dotyczących prędkości nawiewu powietrza. W przypadku badań przepływów nieizotermicznych dotyczy to także temperatury powietrza oraz temperatury otaczających pomieszczenie przegród lub strumieni ciepła wnikających od tych przegród do powietrza. Zagadnienie to jest przedmiotem prowadzonych obecnie badań.

Zgodność obliczonych i zmierzonych rozkładów parametrów powietrza wentylacyjnego w dalszej odległości od nawiewnika można również poprawić stosując korektę warunków brzegowych metodą stałego pędu. Wyciągnięte wnioski dotyczące zakresu zmian prędkości nawiewu zostaną wykorzystane w dalszych badaniach przy użyciu lepszej klasy komputera. Należy podkreślić, że taka metoda postępowania jest użyteczna zwłaszcza przy modelowaniu programem inżynierskim nawiewnika o skomplikowanej konstrukcji. Umożliwia bowiem stworzenie jego charakterystyki zastępczej, zapewniającej obliczeniowe odtworzenie zbliżonego do rzeczywistego rozkładu parametrów powietrza w strudze nawiewanej mimo zadawania warunków brzegowych w otworze nawiewnym o znacznie uproszczonej geometrii.

LITERATURA

1. Report IEA Annex 26: Ventilation of large spaces in buildings. Part3: Analysis and prediction techniques. 1998.
2. Borth J., Suter P.: Influence of Mesh Refinement on the Numerical Prediction of Turbulent Air Flow in Rooms. ROOMVENT '94, Kraków 1994.

3. Ewert M.: Simulation der Randbedingungen bei der numerischen Berechnung der Luftströmung in Räumen. Fortschritt berichte VDI. Reihe 7, Strömungstechnik. nr 233. Düsseldorf 1993.
4. Lipska B.: Rezultaty badawcze Annexu 26 IEA w zakresie prognozowania przepływów wentylacyjnych. Sympozjum Mechanika Płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska, Wisła 1997.
5. Lipska B.: Kompleksowe badania przepływu powietrza wentylacyjnego w Hali Sportowej w Monachium. Sprawozdanie z raportu IEA Annex 26. Sympozjum Mechanika Płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska. Wisła 1997.

Recenzent: Dr hab.inż. Stanisław Drobnik
Prof. Pol. Częstochowskiej

Abstract

The reliability of the results of the numerical model of airflow in ventilated rooms must be tested by the way of comparison of the calculation results with the measurement results in the simulated room. Numerical model ought to be also completed with experimental data. The paper presents experimental verification of numerical prediction of airflow in the physical scale model of the sport hall in Munich (Germany) by means of CFD code Vortex-2. The question how to correct the predicted mean velocity fields by using experimental data is also answered. The methodology used to compare the measured and predicted mean velocity of airflow (mean square of the velocity vector absolute value normalised by inlet velocity) is described. The influence of the number of cells in the computational grid on the predicted velocity fields was tested. The need of introducing experimental data to the boundary condition e.g. turbulence intensity value in supply jet in the inlet was confirmed. In order to correct the predicted velocity field momentum method was used.