

Barbara LIPSKA
Politechnika Śląska

MODELOWANIE PRZEPLYWU POWIETRZA W POMIESZCZENIACH WENTYLOWANYCH ZA POMOCĄ PROGRAMU KOMPUTEROWEGO CFD VORTEX-2

Streszczenie. Program komputerowy Vortex-2 jest programem inżynierskim wykorzystującym technikę CFD do prognozowania przepływów powietrza w pomieszczeniach wentylowanych. Bazuje on na standardowym dwurównaniowym modelu turbulencji k-ε. W artykule scharakteryzowano program, opisując równania modelu, sposób ich rozwiązania i metody zadawania warunków brzegowych. Zaprezentowano sposób modelowania oraz graficznej interpretacji wyników dla przypadku pomieszczenia klimatyzowanego z nawiewem zimnego powietrza i pomieszczenia ze źródłem emisji zanieczyszczeń przy wentylacji tłokowej.

AIRFLOW NUMERICAL SIMULATION IN VENTILATED ROOMS WITH VORTEX-2

Summary. Vortex-2 code is a user-friendly programme for engineers using CFD technique to model airflow in ventilated rooms. The code is based on the traditional k-ε turbulence model. The paper characterises the programme and describes the governing equations, numerical method and boundary conditions. The ways of the modelling and visualisation of predicted airflow in a room with air conditioning with cold air supply and in a room with contaminant source by displacement ventilation are presented.

Przy obecnym stanie techniki komputerowej możliwe jest już dość szerokie praktyczne wykorzystanie modelowania przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych metodą numerycznej mechaniki płynów (CFD). Obok kosztownych komercyjnych pakietów badawczych do obliczeń za pomocą stacji roboczych lub komputerów dużej mocy, pojawiły się też znacznie tańsze, a przez to dla nas dostępne, komercyjne pakiety CFD o charakterze inżynierskim, przeznaczone wyłącznie do prognozowania przepływów w pomieszczeniach wentylowanych. Są to programy o ograniczonych możliwościach, zawierające jedynie podstawowe opcje modelowania CFD, dzięki czemu za ich pomocą można wykonywać

obliczenia na komputerach PC. Mogą być one wykorzystywane do badań i w projektowaniu rozdziału powietrza wentylacyjnego.

1. Charakterystyka programu Vortex-2

Przykładem programu komercyjnego CFD o charakterze inżynierskim jest zakupiony wangielskiej firmie Flowsolve pakiet Vortex -2 autorstwa H.B. Awbiego [1]. Przeznaczony jest on do obliczania rozkładów parametrów powietrza w pomieszczeniach wentylowanych w kształcie prostopadłościanu, w warunkach przepływu ustalonego lub nieustalonego.

Wykorzystany w programie model matematyczny bazuje na układzie równań ciągłości przepływu, Naviera-Stokesa, energii i dyfuzji dla uśrednionych w czasie parametrów powietrza, zamkniętym za pomocą równań transportu wynikających z standardowego modelu turbulencji: energia kinetyczna turbulencji k - szybkość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ϵ . W równaniach tych zmiennymi niezależnymi są współrzędne rozpatrywanego punktu przestrzeni \mathbf{x}_i , czyli x,y,z oraz czas t , a wyznaczyć z nich można rozkłady wartości zmiennych zależnych Φ : składowych wektora prędkości średniej \mathbf{w}_i , ciśnienia p , temperatury powietrza T , koncentracji zanieczyszczeń gazowych c oraz energii kinetycznej turbulencji k i szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ϵ w modelowanej przestrzeni. Wszystkie t równania układu przedstawić można w zapisie tensorowym w postaci ogólnej równania różniczkowego cząstkowego eliptycznego [2]:

$$\boxed{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho w_i \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi} \quad (1)$$

ZMIANA
W CZASIE

KONWEKCJA

DYFUZJA

CZŁON
ŹRÓDŁOWY

Układ ten rozwiązywany jest numerycznie. Do dyskretyzacji równań różniczkowych wykorzystana jest metoda objętości kontrolnej (FVM). Stosowana jest siatka dyskretyzacji ortogonalna we współrzędnych kartezjańskich. Rozwiązanie przeprowadzane jest przy użyciu algorytmu SIMPLE metodą iteracji.

Warunki brzegowe na ścianach stałych zadawane są w sposób następujący:

- przyjmuje się zerowe wartości prędkości, stężenia zanieczyszczeń gazowych, energii kinetycznej turbulencji oraz szybkości dyssypacji tej energii,

– można zadawać temperaturę ściany bądź strumienie ciepła konwekcyjnego i promienistego, przepływające od ściany do pomieszczenia, istnieje też możliwość wprowadzenia temperatury powietrza zewnętrznego wraz z częściowym współczynnikiem przenikania ciepła k przegrody pomieszczenia.

Warunki brzegowe w warstwie przyściennej zapisane są w postaci standardowych, logarytmicznych funkcji przyściennych.

Warunki brzegowe w otworach nawiewnych zadawane są bezpośrednio w tych otworach, które mogą mieć wyłącznie kształt prostokąta (kwadratu, szczeliny) i być usytuowane na ścianach otaczających pomieszczenie. W nawiewnikach o zadanych wymiarach i lokalizacji podaje się wartość prędkości w kierunku prostopadłym do otworu, temperaturę, stężenie zanieczyszczenia powietrza i intensywność turbulencji Tu . Na podstawie znajomości prędkości i intensywności turbulencji wyznacza się energię kinetyczną turbulencji oraz szybkość dyssypacji tej energii .

W programie nie ma możliwości zadawania wartości parametrów w otworach wywiewnych. Podaje się jedynie ich lokalizację i wymiary. Prędkość i temperaturę powietrza usuwanego oraz stężenie zanieczyszczeń w nim zawartych wyznacza się z praw zachowania, odpowiednio, pędu, energii i masy. Program składa się z trzech części: preprocesora do przygotowania danych, procesora do obliczeń i postprocesora Flowvis do wizualizacji wyników.

2. Modelowanie wybranych przypadków przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych za pomocą programu Vortex-2

W celu zbadania możliwości obliczeniowych programu Vortex-2 zamodelowano za jego pomocą wybrane typowe przypadki przepływu powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniach. Prognozowano obrazy przepływu w przypadku m.in.: nawiewu turbulენტnej strugi ciepłego powietrza przy wentylacji mechanicznej, nawiewu turbulენტnej strugi zimnego powietrza przy klimatyzacji pomieszczenia, nawiewu strugi quasi-laminarnej przy wentylacji wyporowej - tłokowej, naturalnego napływu powietrza przez szczelinę przyokienną przy wentylacji grawitacyjnej oraz symulacji rozwoju pożaru w pomieszczeniu [3]. Wykorzystano też zawartą w programie opcję obliczeń rozkładu wartości wskaźników komfortu cieplnego PMV i PPD. Następnie zaprezentowano niektóre wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą komputera Pentium I 100Mhz z pamięcią RAM 32Mb.

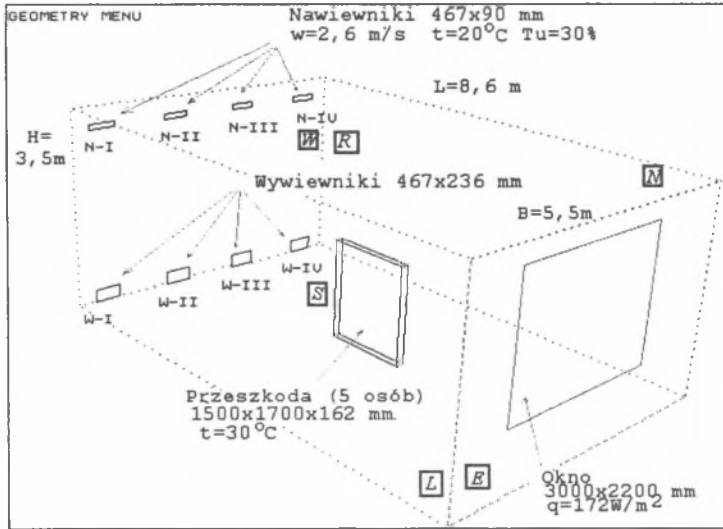
2.1. Modelowanie przepływu w pomieszczeniu klimatyzowanym przy nawiewie zimnego powietrza

Obliczenia numeryczne przepływu powietrza klimatyzującego przeprowadzono dla pomieszczenia, którego schemat wraz z wymiarami pokazano na rys.1. Były w nim dwie ściany zewnętrzne, w tym jedna z oknem i stropodach. Wyposażono go w oświetlenie elektryczne o intensywności 500 lx, przebywało w nim 5 osób wykonujących pracę lekką w pozycji stojącej. Koncepcja rozdziału powietrza wentylacyjnego przewidywała nawiew powietrza do pomieszczenia przez 4 kratki nawiewne zlokalizowane u góry na jednej z bocznych ścian, a wywiew przez 4 kratki u dołu tej samej ściany.

Warunki brzegowe do obliczeń programem Vortex-2 opracowano na podstawie projektu budowlanego obiektu oraz wyników obliczeń bilansu ciepło-wilgotnościowego pomieszczenia, strumienia objętości powietrza nawiewanego i jego parametrów, doboru wielkości oraz lokalizacji otworów nawiewnych i wywiewnych. Warunki te przedstawiono na rys.1. Zadano geometryczne warunki brzegowe w postaci: wymiarów pomieszczenia, lokalizacji okna, lokalizacji i zastępczych wymiarów otworów nawiewnych uproszczonych ze względu na ograniczone możliwości programu do prostokąta oraz otworów wywiewnych, a także warunki aerodynamiczne, czyli parametry powietrza nawiewanego: prędkość i intensywność turbulencji. Termiczne warunki brzegowe na ścianach otaczających pomieszczenie zadano w postaci jednostkowych strumieni ciepła konwekcyjnego wnikających od każdej z przegród do powietrza wewnątrz, zestawionych w tabeli pod rys.1. W strumieniach tych uwzględniono zyski ciepła przez przegrody, zyski od nasłonecznienia, a dla sufitu wliczono także dla uproszczenia zysk ciepła od oświetlenia. Warunek termiczny w otworach nawiewnych to temperatura powietrza nawiewanego. Ludzi pracujących w pomieszczeniu w uproszczeniu potraktowano jako przeszkodę o wymiarach podanych na rys.1, będącą źródłem ciepła w temperaturze powierzchni skóry człowieka. Obliczenia przeprowadzono dla przebiegu ustalonego w czasie. Wykorzystano siatkę dyskretyzacji nierównomiernie zagęszczoną przedstawioną na rys.2 z $50*45*40=90\ 000$ oczek. Wykonano 1680 iteracji w czasie 21 h 45 min., otrzymując rozwiązanie z względnym błędem masowym 5,48%.

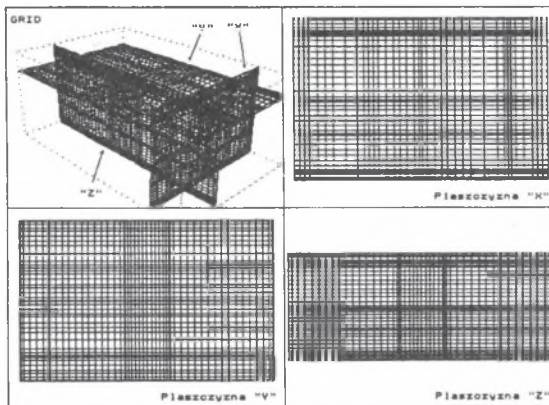
Wyniki obliczeń mają postać rozkładów parametrów powietrza w pomieszczeniu klimatyzowanym, np.: prędkości średniej, temperatury. Interpretacja graficzna wyników za pomocą post-procesora Flowvis pozwoliła na wizualizację badanego przepływu, co pokazano na rys. 3 i 4. Na podstawie obliczonych wartości tych parametrów łącznie z rozkładem

średniej temperatury promieniowania i zadanymi danymi odnośnie do odzieży i metabolizmu znajdujących się w pomieszczeniu ludzi określono rozkład wskaźnika komfortu cieplnego PMV w modelowanym pomieszczeniu, pokazany na rys.5.

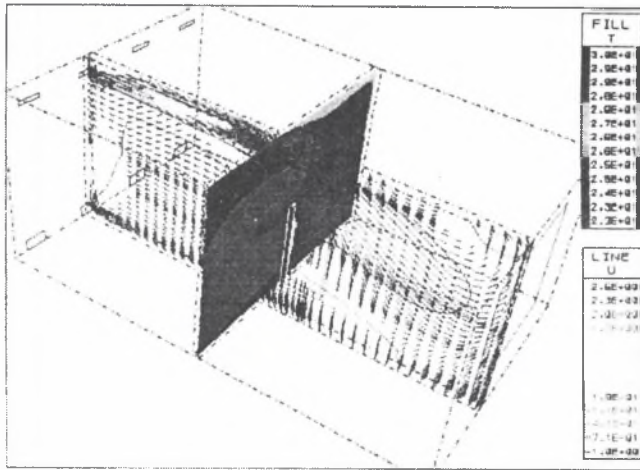


PRZEGRODA	α W/m ²	PRZEGRODA	α W/m ²
W	20.62	N	10.27
E	32.43	L	32.43
S	0.001	R	2.29

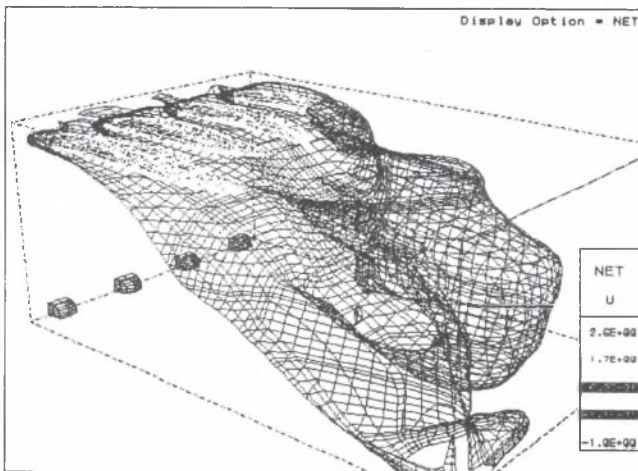
Rys.1. Geometryczne, aerodynamiczne i ciepłe warunki brzegowe dla pomieszczenia klimatyzowanego
 Fig.1. Geometric, aerodynamic and thermal boundary conditions for modelling room with air conditioning



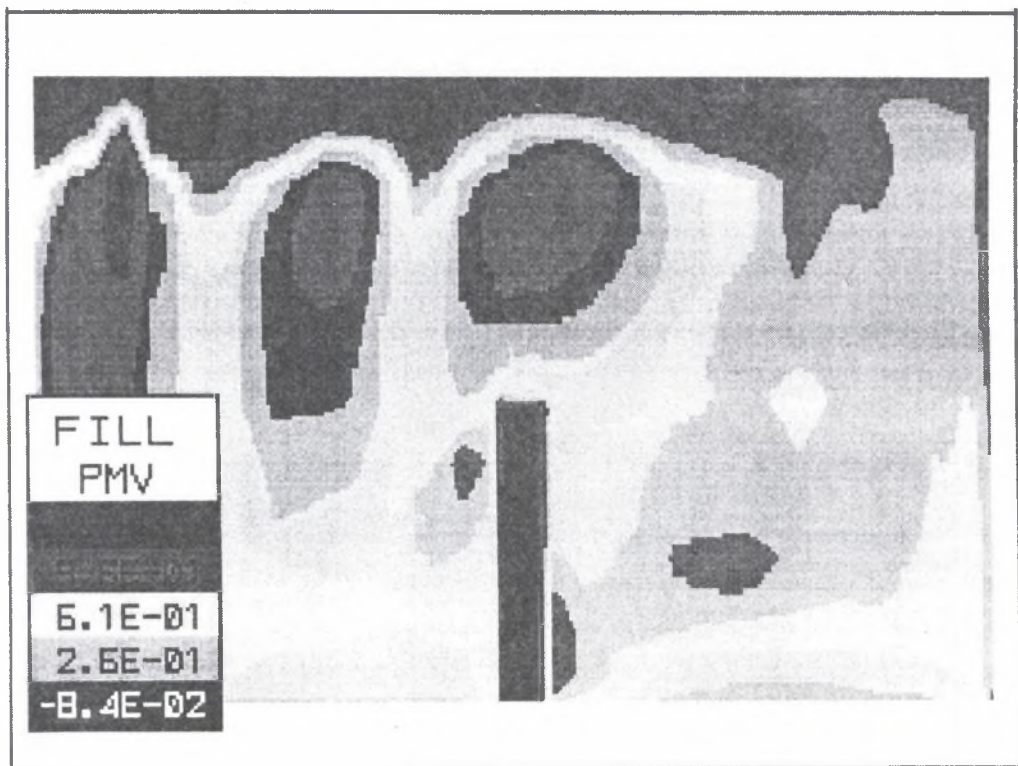
Rys.2. Siatka dyskretyzacji dla modelowania pomieszczenia klimatyzowanego
 Fig.2. Computational grid for modelling room with air conditioning



Rys.3. Wektory średniej prędkości przepływu powietrza w płaszczyźnie pionowej wzdłużnej przechodzącej przez otwór nawiewny N_{II} oraz rozkład izoterm w płaszczyźnie pionowej poprzecznej pomieszczenia
 Fig.3. Mean velocity in vertical plane along the room passed through the inlet N_{II} and temperature field in vertical plane across the room



Rys.4. Rozkład przestrzenny izolinii składowej w_x średniej prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniu
 Fig.4. Three-dimensional distribution of the isovel of air flow in room (component w_x of the mean velocity vector)



Rys.5. Rozkład wartości wskaźnika PMV w pionowej poprzecznej płaszczyźnie pomieszczenia
 Fig. 5. PMV index field in the vertical plane across the room

2.2. Modelowanie przepływu powietrza w pomieszczeniu ze źródłem emisji zanieczyszczenia przy zastosowaniu wentylacji tłokowej

W środku pomieszczenia wentylowanego na podłodze znajdowało się źródło zanieczyszczeń gazowych. Wymiary obiektu, podane na rys.6, wprowadzono jako geometryczne warunki brzegowe do obliczeń programem Vortex-2. Źródło zanieczyszczeń o emisji jak na rysunku potraktowano jako przeszkodę o wymiarach $0,02 \times 0,02 \times 0,02$ m. Zyski ciepła w pomieszczeniu pochodziły jedynie od źródeł zewnętrznych. Znając ich wartość określono cieplne warunki brzegowe w postaci jednostkowych strumieni ciepła przenikających do pomieszczenia przez ściany. Bilans cieplny łącznie z emisją zanieczyszczeń gazowych stał się podstawą do obliczenia strumienia masy powietrza wentylacyjnego i doboru otworów nawiewnych oraz wywiewnych. Przyjęta koncepcja rozdziału powietrza przewidywała wentylację tłokową; nawiew powietrza przez nawiewniki quasi-laminarne u dołu pomieszczenia przy ścianie, wywiew przez wywiewnik szczelinowy

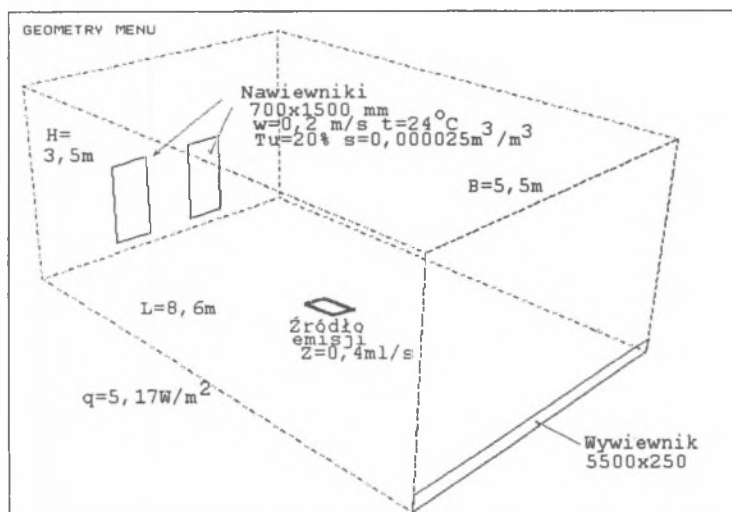
u dołu ściany przeciwległej. Ze względu na wymagania programu dobrane 2 nawiewniki laminarne uproszczono do otworów prostokątnych przy zachowaniu efektywnej powierzchni i prędkości nawiewu (rys.6). Obliczenia przeprowadzono dla przebiegu ustalonego w czasie. Wykorzystano siatkę dyskretyzacji nierównomiernie zagęszczoną z $40 \times 43 \times 28 = 48\,160$ oczek. Wykonano 3000 iteracji w czasie 19 h 30 min., otrzymując rozwiązanie z względnym błędem masowym 1,52%.

Obliczone rozkłady parametrów powietrza, zinterpretowane graficznie w postaci izol linii prędkości, temperatury i stężenia zanieczyszczenia w modelowanym obiekcie, przedstawiono na rys. 7 i 8.

3. Podsumowanie

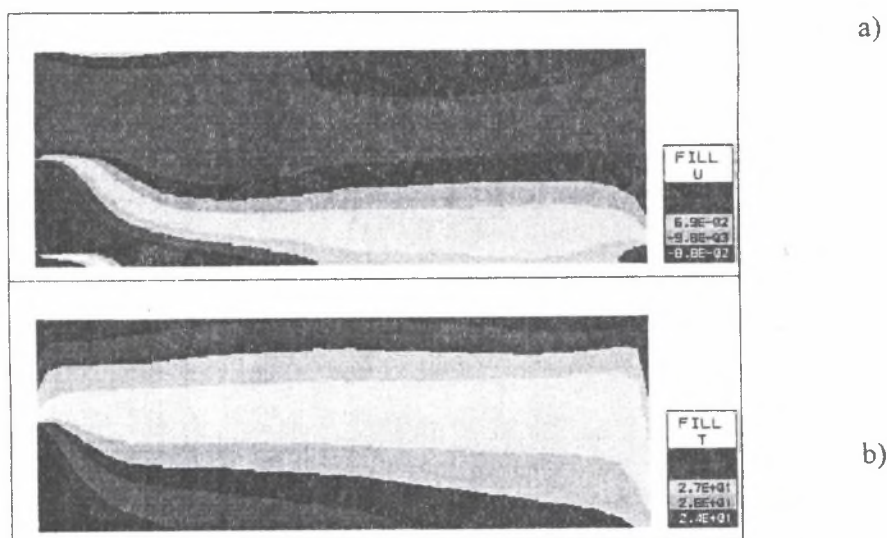
Doświadczenia z pracy z programem Vortex-2 wskazują na jego przydatność do praktycznych obliczeń rozdziału powietrza wentylacyjnego. Uwagi na temat niedoskonałości programu i utrudnień w korzystaniu z niego przekazano jego autorowi.

Obliczone rozkłady parametrów w pomieszczeniu wentylowanym, w tym także w strefie przebywania ludzi, mogą być bardzo pomocne na etapie projektowania. Numeryczne prognozowanie obrazu przepływu powietrza w modelowanym obiekcie pozwala bowiem na ocenę wybranej koncepcji rozdziału powietrza lub pomaga w wyborze optymalnego



Rys.6. Geometryczne, aerodynamiczne i ciepłe warunki brzegowe dla pomieszczenia z wentylacją wyporową

Fig.6. Geometric, aerodynamic and thermal boundary conditions for modelling room with air conditioning

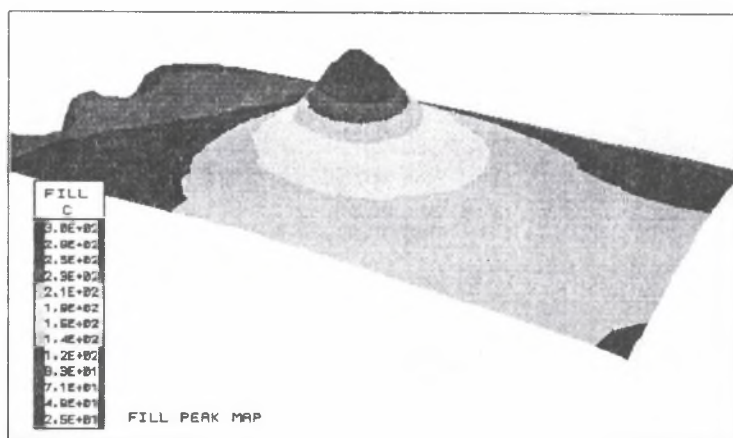


Rys.7. Rozkład parametrów w płaszczyźnie pionowej wzdłużnej pomieszczenia przechodzącej przez otwór nawiewny N_1 :

- a) składowej w_x średniej prędkości przepływu powietrza,
- b) temperatury powietrza

Fig.7. Airflow parameter fields in the vertical plane along the room passed through the inlet N_1 :

- a) the component w_x of the mean velocity vector,
- b) the temperature



Rys.8. Rozkład stężenia zanieczyszczenia w powietrzu, w płaszczyźnie poziomej pomieszczenia przechodzącej przez górną powierzchnię źródła zanieczyszczenia

Fig.8. Concentration field in horizontal plane of the room passed through the top plane of contamination source

rozwiązania bez każdorazowego wykorzystywania do tego praco- i czasochłonnych badań na modelach fizykalnych [4].

Należy jednak pamiętać, że w celu sprawdzenia wiarygodności tego programu, jak zresztą każdego programu CFD, wybrane przypadki obliczeń numerycznych powinny podlegać weryfikacji eksperymentalnej, a przy zadawaniu warunków brzegowych wskazane jest wykorzystywanie danych pomiarowych np. dotyczących parametrów powietrza w strugach nawiewanych do pomieszczenia.

LITERATURA

1. Awbi H.B., Ewer J.A., Patel M.K.: *Vortex[®] User Manual. Version 2.1.* Flowsolve Ltd, 1996.
2. Gan G., Awbi H.B. : *Numerical Simulation of the Indoor Environment. Building and Environment*, vol. 29, nr 4, 1994.
3. Jeleń I.: *Modelowanie przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych za pomocą programu Vortex-2.* Praca dyplomowa magisterska pod kierunkiem Lipskiej B., Katedra OWiTO, Politechnika Śląska, Gliwice 1998.
4. Martin P.: *CFD in Real Word.* ASHRAE Journal, pp.20-25. January 1999.

Recenzent: Dr hab.inż. Stanisław Drobnik
Profesor Politechniki Częstochowskiej

Abstract

Applying Computational Fluid Dynamic to airflow modelling in ventilated rooms has got more and more popular for the last few years. CFD has become a powerful tool for the research and the design of air distribution in rooms. Besides expensive and complex research codes also cheaper, user friendly CFD programmes for engineers are also available. They contain only basic options of CFD simulation and are destined to modelling airflow in rooms. Vortex-2 code is one of those programmes, basing on the traditional $k-\epsilon$ turbulence model. In this paper the programme is characterised, governing equations, numerical method and boundary conditions are described. Airflows in ventilated rooms of various types of are predicted. The ways of data preparation and the results of calculation performed for a room

with air conditioning by cold air supply and for a room with contaminant source at displacement ventilation are presented. The results of the predicted airflow visualisation by means postprocessor Flowvis are shown as well.