Seria: INŻYNIERIA SANITARNA z. 29

Nr kol. 1000

D.M. LIPIŃSKI K. SOSNOWSKI

Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechnika Warszawska

MODEL ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ WOKÓŁ HAL PRZEMYSŁOWYCH

> Streszczenie. Zagadnienie właściwego umiejscowienia czerpni lub wyrzutni powietrza w halach przemysłowych jest ściśle powiązane z polem prędkości i rozkładem zanieczyszczeń powietrza opływającego **tę** hale. Niniejszy artykuł prezentuje matematyczny model zjawiska opływu budynku przez wiatr oraz transportu zanieczyszczeń gazowych w tym strumieniu. Podstawę modelu matematycznego stanowią eliptyczne równania transportu masy, pędu, energii i koncentracji zanieczyszczeń, uzupełnione dwurównaniowym modelem turbulencji k-6. Podkreślić należy, że wiele stałych czy zależności funkcyjnych omawianego modelu pochodzi z eksperymentu, tak więc konkretne ich wartości, przyjęte przez autorów, w sposób istotny rzutują na wyniki otrzymane za pomocą tego modelu. Całkowania różniczkowych równań transportu dokonano metodą różnic skończonych opartą na objętości kontrolnej (CVFDM). Przedstawiono w skrócie stosunkowo nowy i obiecujący schemat różnicowy SIMPLEST. Omówiono program komputerowy ogólnego przeznaczenia ACFES2/R (dla dwuwymiarowych przepływów eliptycznych), który stanowi realizację ww. modelu matematycznego. Podstawowymi problemami jakie stwarza ww. model, są trudności w określeniu współczynników dyfuzji laminarnej i turbulencji występujących w równaniach transportu. W artykule dokonano przeglądu metod określania współczynników dyfuzji dla równania koncentracji zanieczyszczeń. Jako przykład obliczeniowy wybrano problem określania pól prędkości i stężeń zanieczyszczeń gazowych przy opływie dużej hali przemysłowej, o emitorze zanieczyszczeń zlokalizowanym na dachu tej hali. Wyniki otrzymane za pomocą programu ACFES2/R porównano z danymi literaturowymi i uzyskano przynajmniej jakościową zgodność. Konkluzją autorów jest twierdzenie, że model numeryczny opływu hal przemysłowych może stanowić bardzo dużą pomoc w pracach projektowych z wentylacji przemysłowej.

1. WSTĘP

Zagadnienie właściwego usytuowania czerpni i wyrzutni powietrza dla instalacji wencylacyjnych lub klimatyzacyjnych, a także lokalizacji wylotów odciągów miejscowych jest problemem rozwiązywanym przez projektantów w sposób raczej intuicyjny. Istnieją wprawdzie pewne przepisy [21], które określają wzajemne usytuowanie czerpni i wyrzutni powietrza zanieczyszczonego, jednakże brak jest w literaturze krajowej głębszej analizy zjawisk zachodzących przy opływie budynku przez wiatr. Zjawiska te powinny być rozpatrywane w dwóch aspektach:

- oddziaływania ciśnienia dynamicznego wiatru na zakłócenia przepływów powietrza w instalacjach wentylacji mechanicznej, grawitacyjnej i niekontrolowanym przepływie przez nieszczelności obiektu (infiltracja i eksfiltracja powietrza),
- 2) rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wokół bryły budynku.

Podejmowane były próby podania zasad rozwiązania powyższych problemów dla celów projektowania, ale często wyraża się zastrzeżenia co do ich ograniczeń, poza którymi owe zależności nie obowiązują.

Jako przykład może służyć amerykański poradnik projektanta [20], w którym omawiane są zagadnienia z 1 i 2 grupy. Prezentowane tam modele, oparte są w znacznej mierze na wynikach badań fizykalnych Halitsky'ego, Scorera i Barretta z lat 1962-63, Wilsona z lat 1960-79 [19]. Z innych opracowań należy wymienić prace: Eltermana z roku 1980 [3], poradnik projektanta z roku 1977 [22] i Lejkina z roku 1970 [7]. Te ostatnie prace poświęcone są głównie problemom rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wokół budynków przemysłowych, tutaj także główną bazę stanowią modele fizykalne. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że stężenia zanieczyszczeń powietrza na terenach zakładów przemysłowych nie są limitowane, tak jak ma to miejsce w przypadku stężeń dopuszczalnych na stanowiskach pracy (NDS), czy powietrza atmosferycznego poza strefami ochronnymi zakładów. Stężenia te szacowane są [7], na poziomie 30% wartości NDS, jednakże lokalnie mogą być znacznie większe. Ma to oczywisty wpływ na degradację środowiska naturalnego, niszczenie konstrukcji budynków i parku maszynowego na terenie zakładu pracy, a także, w wyniku przenoszenia recyrkulacyjnego systemami wentylacji mechanicznej i infiltracji, na stan powietrza wewnątrz obiektów. Ze względu na istotne oddziaływanie cieni aerodynamicznych na kształtowanie się smugi zanieczyszczeń obowiązujące w kraju wytyczne projektowania emitorów wolno stojących z 1981 r. 1 nie mogą w tym przypadku znaleźć zastosowania.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwości wykorzystania komputerowego modelu opływu budynku przez powietrze do obliczeń rozkładu stężeń zanieczyszczeń gazowych. Program komputerowy ogólnego przeznaczenia, ACFES2/R. o którym mowa, został z powodzeniem zastosowany do analizy różnorodnych zagadnień wentylacji, w tym także do opływu hal przemysłowych [12]; szczegóły mogą być odnalezione w pracy Lipińskiego [9]. Model numeryczny, który zostanie skrótowo przedstawiony dalej, pozwala na rozwiązywanie układów eliptycznych równań różniczkowych cząstkowych, opisujących transport masy, pędu, energii itp. w stanie ustalonym, w obszarze dwuwymiarowym. Ze względu na fakt stosunkowo niedawnego udostępnienia programu ACFES2/R w niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną wyniki pierwszej próby zastosowania go do problemów rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, dalsze wyniki będą sukcesywnie publikowane. W związku z trudnościami w dokładnym określeniu współczynników dyfuzji dla równania koncentracji zanieczyszczeń zaniedbano wpływ dyfuzji laminarnej, pominięto także efekt pochłaniania zanieczyszczeń przez omywane powierzchnie i odbijania smugi przez podłoże.

2. MODEL MATEMATYCZNY

2.1. Różniczkowe równania transportu

Podstawę modelu matematycznego stanowi układ równań różniczkowych cząstkowych, których typ i liczba zależą od specyfiki rozważanego problemu fizycznego, warunków brzegowych itp. W najprostszym przypadku proces rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w niezakłóconej smudze unoszonej wiatrem może być modelowany równaniami typu parabolicznego. W przypadku istnienia przeszkód na drodze przepływu smugi, np. w postaci budynków, należy brać pod uwagę strefy recyrkulacji powietrza, a więc istotne zakłócenia smugi. Dla takiego przypadku należy posłużyć się równaniami typu eliptycznego. Dla pełnego opisu zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w przepływach typu eliptycznego należy sformułować i rozwiązać następujące równania: ciągłości, ruchu, energii, modelu turbulencji oraz koncentracji zanieczyszczeń. Ogólna postać eliptycznego równania transportu dla zmiennej uogólnionej ϕ w stanie ustalonym, przy wykorzystaniu konwencji sumacji tensorowej, jest następująca:

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} (p U_{j} \phi) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} (\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_{j}}) + S_{\phi}$$
(1)

Współczynniki dla poszczególnych równań podaje, dla przypadku dwuwymiarowego, tabela nr 1.

Zastosowano dwurównaniowy model turbulencji k- ϵ , szczegóły podano w pracy Spaldinga [13]. Zmiennymi głównymi modelu k- ϵ są:

k - kinetyczna energia turbulencji,

e - predkość rozpraszania kinetycznej energii turb.

Tabela 1

ø	Гф	s _¢
1	0	0
U	heff	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial x})$
v	₽eff	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + p\beta_g \Theta$
т	$\mu_1/\text{Pr+}\mu_t/\text{G}_T$	0
k	µeff ^{∕6} k	$P_{T} + G_{T} - pe$
£	l ^µ eff ^{/6} €	$\epsilon / k [C_1 (P_T + G_T) - C_2 p \epsilon]$
с	µeff ^{∕6} c	0

Wartości 🗖 oraz So dla różnych równań

Podstawowym założeniem jakie poczyniono jest przyjęcie tzw. lepkości turbulentnej μ_t oraz założenia, że przepływ odbywa się przy dużej wartości liczby Reynoldsa. Efekty niskich liczb Reynoldsa uwzględniono przez sformułowanie specjalnych zależności, tzw. "funkcji przyściennych" (wg Spaldinga, [13]), które obowiązują w pobliżu ścian budynków i powierzchni ziemi. Zależność wiążąca lepkość turbulentną μ_t z k oraz ć jest następująca:

$$l^{\mu}_{t} = pC_{D}k^{2}/\epsilon$$
⁽²⁾

Efektywny współczynnik lepkości zdefiniowany jest jako suma współczynników laminarnego i turbulentnego:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_1 + \mu_t \tag{3}$$

Współczynniki dyfuzji dla transportu skalarów obliczane są przy założeniu stałej wartości turbulentnych liczb Prandtla-Schmidta, 🍫 , ze wzorów o następującej postaci:

$$\int \phi_{eff} = \mu_{eff} / \delta_{\phi} \tag{4}$$

Produkcja turbulencji na skutek naprężeń Reynoldsa dana jest dla przypadku dwuwymiarowego wzorem następującym:

$$\mathbb{P}_{\mathrm{T}} = \mu_{\mathrm{t}} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^{2} \right] + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^{2} \right\}$$
(5)

Produkcja turbulencji na skutek wyporu termicznego:

$$G_{\rm T} = -p\beta g \frac{\partial t}{\partial {\rm T}} \frac{\partial}{\partial {\rm Y}} ({\rm T} - {\rm T}_{\rm R})$$
(6),

Przyjęte wartości stałych modelu k- ϵ , wg Laundera i Spaldinga [6], podaje poniźsza tabela:

Tabela 2

Wartości stałych modelu k- e

	с _D	c ₁	c2	ďk	GE	б _т	6 _c	
_	0,09	1,44	1,92	1,0	1,3	0,7/0,92	0,7	

 \mathbf{G}_{T} ma różną wartość w zależności od charakteru przepływu. Dla przepływu w sąsiedztwie ścian \mathbf{G}_{T} = 0,92, dla obszaru swobodnego przepływu \mathbf{G}_{T} = 0,7.

2.2. Metoda objętości kontrolnej

Układ równań różniczkowych postaci (1) został scałkowany numerycznie w oparciu o szczególną metodę różnic skończonych, tzw. "metodę objętości kontrolnej" (CVFDM). Metoda CVFDM została przedstawiona między innymi w pracach Patankara [10] oraz Spaldinga [14].

Na podstawie równania ciągłości otrzymano równanie "poprawki ciśnienia", które zapewnia, że składowe prędkości wyliczone z równań ruchu, uzupełnione o odpowiednie poprawki, spełniają równanie ciągłości. Ponadto poprzez akumulację poprawek ciśnienia określane jest pole ciśnienia statycznego. Powyższy zabieg to istotna cecha schematu SIMPLE, opracowanego przez Patankara i Spaldinga (szczegóły podano w pracy Patankara [10]). Schemat SIMPLE został zmodyfikowany przez Spaldinga [15]. Modyfikacja schematu odnosiła się do równań ruchu, w których człony transportu konwekcyjnego przeniesiono na prawą stronę równania (1), tj. do członu źródłowego. Zmodyfikowany schemat został nazwany SIMPLEST. W niniejszym artykule będą podane tylko sygnalne informacje o schematach różnicowych, dalsze wyjaśnienia podano w pracach Lipińskiego [8], [9].



Rys. 1. Siatka różnicowa – fragment Fig. 1. Difference grid – fragment

Na rys. 1 pokazano fragment siatki różnicowej, którą należy rozpiąć na całym obszarze całkowania równań transportu. Ściślej mówiąc są to trzy siatki różnicowe: dla skalarów (•), dla poziomej składowej prędkości U(►) oraz dla pionowej składowej prędkości V (▲); odpowiednie symbole identyfikują położenie węzłów siatki.

Zaleca się stosowanie siatki różnicowej o nierównomiernie rozłożonych węzłach wzdłuż każdej z osi. Ze względu na stabilność schematu różnicowego stopień nierównomierności siatki ξ powinien spełniać następujące równanie:



Na rys. 2 pokazano typową objętość kontrolną dla węzła P, otoczonego czterema węzłami W,E,S,N.

Jeśli oznaczyć przez J
i całkowity strumień konwekcyjno-dyfuzyjny zmiennej ϕ , przepływający przez dowolną ścianę objętości kontrolnej, czyli:

$$J_{i} = p U_{i} \dot{\phi} - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_{i}}, \qquad (8)$$

to scałkowane, na podstawie objętości kontrolnej z rys. 2, równanie (1) przyjmie postać:

$$(J_e^{-J_w}) \triangle y_p + (J_n^{-J_s}) \triangle x_p = S * \triangle x_p^{-\Delta y_p}$$

jest średnią wartością członu źródłowego w danej objętości kon-C# trolnej.

Strumienie konwekcyjny i dyfuzyjny dla dowolnej ściany objętości kontrolnej dane są następującymi zależnościami (przytoczono zależności przykładowe dla ściany "w"):

$$J_{cw} = (pU)_{w} \Delta y_{p} \tag{10}$$

$$J_{dw} = \frac{\Delta y_{p}}{(\frac{\delta x_{w}^{-}}{\Gamma_{w}} + \frac{\delta x_{w}^{+}}{\Gamma_{p}})}$$

Współczynnik dyfuzji jest uśredniany harmonicznie pomiędzy węzłami siatki różnicowej, stąd wzór (11); o zaletach uśredniania harmonicznego mowa jest w pracy Patankara [10].

Kombinowany efekt konwekcyjno-dyfuzyjny obliczany jest poprzez zastosowanie zależności zaproponowanej przez Patankara [10], zwanej "power-law scheme". Na przykład ściany "w" z rys. 2 zależność określająca a., ma postać następującą:

$$a_{w} = J_{dw} \{0,0, (1,0-0,1 | Pe_{w}|)^{\frac{3}{2}} \} + \{J_{cw}, 0,0\},$$
(12)

gdzie:

Pe, oznacza lokalną wartość liczby Pecleta,

{..., ...} oznacza maksimum spośród wymienionej listy wyrażeń.

Wszelkie nieliniowe zależności, występujące w równaniach transportu, są linearyzowane w równaniach różnicowych, a zlinearyzowany człon źródłowy ogólnie zapisać jako:

 $S^* \Delta x_p \Delta y_p = S^*_c + S^*_p \phi_p$

Końcowa postać równania różnicowego dla zmiennej ϕ w węźle P może być zapisana następująco:

$$a_{p}\phi_{p} = \sum_{nb} (a_{nb}\phi_{nb}) + S_{c}^{*},$$
 (14)

qdzie sumowanie rozciągnięte jest na sąsiednie węzły (tj. W,E,S,N). Współujmują całkowity wpływ konwekcji i dyfuzji, natomiast współczynniki a, czynnik ap dany jest zależnością:

$$a_{p} = \sum_{nb}^{a} a_{nb} + S_{p}^{*}$$
(15)

(11)

Równania algebraiczne typu (14), które powstały ze scałkowanych po objętości kontrolnej zlinearyzowanych równań transportu, nazywane są w literaturze "Finite Domain Equations" (FDE). Dla równań ruchu współczynniki a_j , zgodnie ze schematem SIMPLEST, uzależnione są tylko od współczynników dyfuzji \lceil_j oraz wymiarów siatki różnicowej, strumienie konwekcyjne dodane są do członu źródłowego S_{ϕ} . Ponadto do bilansowania strumieni konwekcyjnych równań ruchu użyto centralnego schematu różnicowego (szczegóły w pracy Lipińskiego [9]), w odróżnieniu od stosowanych dotychczas schematów typu "weighted-upstream".

Układy równań liniowych typu (13) rozwiązywane są następująco:

- * dla równań ruchu jawny schemat Jacobiego
- * dla pozostałych równań blokowa metoda iteracyjna SIP (Strongly Implicit Procedure).

Metoda SIP została zaproponowana przez Stone [18], realizację algorytmu SIP podano w pracy Lipińskiego [8]. Należy podkreślić znaczną przewagę metody SIP w stosunku do metod typu SOR lub ADIP. Wektor residualny układu równań liniowych jest zmniejszany znacznie szybciej przez metodę SIP niż przez inne metody iteracyjne; odpowiednie porównania zamieszczono w pracy Lipińskiego [9].

Wszystkie zmienne, z wyjątkiem poprawki ciśnienia, poddawane są podrelaksacji w celu osiągnięcia zbieżności procedury iteracyjnej, czyli:

 $\phi_{\text{new}} = (1.0 - \alpha_{\text{R}})\phi_{\text{old}} + \alpha_{\text{R}}\phi_{\text{new}}$

Współczynniki podrelaksacji mają zmienne wartości w zależności od ϕ oraz numeru iteracji; pełniejsze informacje na ten temat zawiera praca Lipińskiego [9]. Opis stosunkowo nowej metody szacowania wartości współczynników podrelaksacji w każdym węźle siatki różnicowej, metody tzw. "Local Relaxation Coefficients", zawiera praca Schmitza [11].

2.3. Warunki brzegowe

Informacja o warunkach brzęgowych wprowadzana jest do FDE za pomocą odpowiedniej manipulacji współczynnikami a_j równania (13), modyfikacji wymaga także człon źródłowy. Program ACFES2/R umożliwia założenie 8 różnego rodzaju warunków brzegowych; są to warunki Dirichleta, Neumanna (w wersjach laminarnej i turbulentnej), ponadto charakterystyczne warunki brzegowe dla k i ϵ w pobliżu ścian, "obszary zablokowane" (np. wnętrza przeszkód) itd. - pełny opis znajdzie Czytelnik w pracy [9]. Przepływ turbulentny wymaga oddzielnego potraktowania, gdyż skorzystano ze specjalnych "funkcji przyściennych" (pełny opis podano w pracy Laundera i Spaldinga [6]). Naprężenie styczne T_w na powierzchni ściany wyliczane jest przy wykorzystaniu logarytmicznego rozkładu prędkości stycznej, tj.:

52

(16)

$$U_{*} = \frac{1}{K} \ln(Ey_{*}),$$

gdzie:

$$U_{*} = T_{w} / (pC_{D}^{25} k \cdot 5)$$

$$y_{*} = pC_{D}^{*25}k^{*5} y/\mu_{1}$$

gdzie:

- y jest odległością od ściany węzła siatki skalarów leżącego najbliżej ściany,
- K jest stałą von Karmana.

Korzystając z informacji o wielkości T_w określana jest generacja kinetycznej energii turbulencji przy ścianie. Dysypacja przy ścianie określana jest przy założeniu zależności pomiędzy drogą mieszania a odległością od ściany – szczegółowe informacje podano w pracy Spaldinga [14].

2.4. Kolejność iteracji zmiennych

Kolejność iteracji zmiennych jest istotna z tego względu, że równania transportu są ze sobą sprzężone, uzależnione od siebie nawzajem. Tak np. gęstość zależna jest od temperatury (wpływ ciśnienia może być pominięty), strumienie konwekcyjne dowolnej zmiennej ϕ zależą od składowych prędkości, współczynniki dyfuzji wszystkich równań zależą od parametrów turbulencji k, ϵ , człony źródłowe różnych równań zawierają w sobie składniki związane z wyporem cieplnym, a więc zależą od równania energii, itd. Założono, że zanieczyszczenia powietrza można traktować jak "pasywne skalary", wobec tego równanie koncentracji zanieczyszczeń musi być rozwiązane <u>tylko raz</u>, po otrzymaniu-rozwiązania hydrodynamiki układu (pole ciśnienia statycznego + pola prędkości + turbulencja), ponadto dla iteracji p,U,V,k, ośrodek jest traktowany jako jednoskładnikowy.

Poniżej podany zostanie schemat iteracji zastosowany w programie - ACFES2/R.

- 1. Obliczenie współczynników FDE dla równań ruchu.
- 2. Rozwiązanie równań ruchu.
- 3. Obliczenie współczynników i rozwiązanie FDE dla poprawki ciśnienia.
- Dokonanie odpowiednich korekt składowych prędkości, tak aby spełnione było równanie ciągłości.
- 5. Korekta pola ciśnienia statycznego.
- 6. Obliczenie współczynników i rozwiązanie FDE dla temperatury.
- 7. Obliczenie współczynników i rozwiązanie FDE dla k.
- 8. Obliczenie współczynników i rozwiązanie FDE dla 🧧

(17)

(18)

(19)

9. Sprawdzenie wielkości źródła masy w układzie (człon źródłowy równania poprawki ciśnienia) jako identyfikatora zbieżności procedury. W przypadku zbyt dużego residuum masy w układzie należy powrócić do punktu 1.

3. PROGRAM KOMPUTEROWY ACFES2/R

Na podstawie przedstawionego <u>w zarysie</u> algorytmu został napisany program komputerowy ogólnego przeznaczenia ACFES2/R (<u>A</u> Code For Elliptic Situations 2-dimensional Revised version). Program ten stanowi rozwinięcie programów rodziny ACFES, opisanych w pracy [8]; zmiany poczynione w tej wersji programu odnoszą się nie tylko do realizacji, ale także do metody rozwiązania problemu. Program ACFES2/R został dokładnie opisany w pracy Lipińskiego [9]. Poniżej przedstawione zostaną w punktach jego najważniejsze cechy:

- Program umożliwia obliczanie eliptycznych przepływów w dowolnych dwuwymiarowych geometriach (nawet w obszarach niewypukłych), nie są wymagane <u>żadne</u> zmiany w programie, żądana geometria precyzowana jest tylko przez odpowiednio przygotowane dane (to samo dotyczy zadania warunków brzegowych).
- Nakładkowa struktura programu powoduje, że zajmuje on około 64K słów 60bitowych na komputerach firmy CDC.
- Wektorowy algorytm powoduje bardzo szybkie wykonanie programu, odpowiednie porównania przytoczone w pracy [9].
- 4. Dostępne są różnego rodzaju postprocesory umożliwiające wykonanie wydruków specjalnego typu (m.in. rysunki wektorów prędkości, izolinie dowolnych zmiennych, profile funkcji prądu, wirowości itp.).

4. OKREŚLENIE WSPÓŁCZYNNIKÓW DYFUZJI ZANIECZYSZCZEŃ

Jak już wspomniano we wstępie, napotyka się na duże trudności w określeniu wartości współczynników dyfuzji zanieczyszczeń w otoczeniu budynku omywanego przez wiatr.

Zależności przedstawione w monografiach związanych z ochroną powietrza atmosferycznego, jak np. w pracach Judy [5], Straussa [16], Détrie [2], Sterna [17] dotyczą analitycznych rozwiązań równań dyfuzji turbulentnej, opracowanych przez Pasquilla, Suttona, Bosanqueta i Pearsona, Caldera, opracowanych na przełomie lat 1950 i 1960. Najczęściej stosowane są zależności określające współczynniki dyfuzji przyjęte przez Pasquilla na podstawie statystycznej teorii turbulencji Taylora:

$$\delta_{\rm i} = \mathcal{P}(2k_{\rm i} x/\bar{\rm U}),$$

54

(20)

gdzie:

- δ współczynnik rozpraszania Pasquilla (zwany też współczynnikiem dyfuzji). Odpowiada on szerokości smugi zanieczyszczeń w danym kierunku, w przekroju odległym o x od emitora, m,
 - k współczynnik turbulencyjności (dyfuzji) powietrza wg Taylora, m²/s,
 - Ū średnia prędkość wiatru, m/s,
 - i indeks osi kartezjańskiego układu współrzędnych x,y,z; oś x skierowana jest wzdłuż kierunku rozprzestrzeniania się smugi.

Współczynniki powyższe często aproksymowane są zależnością:

$$\delta_{i} = a_{i} x^{bi}, \qquad (21)$$

gdzie stałe a_i, b_i wyznaczane są empirycznie na podstawie stanów równowagi atmosfery, związanych z pionowym rozkładem temperatury powietrza. Stosowane są także zależności Suttona powstałe również na podstawie teorii Taylora

$$C_{1}^{2} = \frac{4\sqrt[3]{(1-n)(2-n)4\overline{0}x}}{(1-n)(2-n)4\overline{0}x} (\overline{\omega})^{1/2}n,$$
(22)

gdzie:

> - współczynnik lepkości kinematycznej powietrza,

n - wykładnik meteorologiczny, zależny od stanów równowagi powietrza,

 $\overline{\omega} = \frac{U_i^2}{\overline{U}_i^2} - \text{średnia kwadratowa pulsacja prędkości powietrza w kierunku i (x,y,z).}$

Zależność Suttona i Pasquilla łączy następujący związek:

$$\delta_{i} = -\frac{1}{2} C_{i} x^{a}, \qquad (23)$$

gdzie: a=1-0.5n, oraz najczęściej przyjmowane jest n_i=n.

Wartości δ_i liczone w odległości x od 100-500 m, zmieniają się od ok. 4-100 m.

Taylor w 1962 r., w swojej statystycznej teorii turbulencji, przedstawił zależności służące do określania wartości, występujących w równaniach różniczkowych, współczynników turbulencji (lub dyfuzji) atmosferycznej w postaci:

$$k_{i} = \frac{1}{2} \frac{d \delta_{i}(t)}{dt}, \quad m^{2}/s$$

(24)

gdzie:

 droga mieszania (odpowiada współczynnikom Pasquilla), obliczona następująco:

$$\delta_{i}^{2}(t) = |1_{i}(t) - 1_{i}(0)|^{2},$$

gdzie:

- i kierunek dyfuzji x,y,z,
- 1 odległość rozpatrywanego przekroju w danym kierunku, m,
- t czas lotu cząstki w danym kierunku, s.

Rozwiązania analityczne uzyskiwane na podstawie powyższych zależności dotyczą mas powietrza w strefie niezakłóconej lokalnymi przeszkodami oraz dyfuzji turbulencyjnej i termicznej, uzyskanej głównie warunkami meteorologicznymi. Zawirowania powstające wokół budynku czy emitora utrudniają praktyczne wykorzystanie powyższych zależności.

Próbę opisu dyfuzji dla tych warunków przedstawili w 1962 r. Bierly i Hewson [17], analizując zjawisko tzw. "spłukiwania" smugi zanieczyszczeń w dół z komina o wysokości 100 m i prędkości wiatru 10 m/s. Zastosowali oni równanie Suttona, przyjmując współczynnik n = 0.2, $C_y = C_2 = 0.21 \text{ m } 1/10 \text{ dla}$ 3-minutowego czasu uśredniania i $C_y = C_2 = 0.41 \text{ m } 1/10 \text{ dla}$ godzinowego czasu uśredniania (odpowiada to wartościom $\delta_1 = \delta_2 = 9.3 \text{ m i}$ $\delta_y = \delta_2 = 18.2 \text{ m dla} \text{ x} = 100$).

Prace Wilsona, Cermaka, Halitsky'ego [19], dotyczące opływu budynków, opierają się w zasadzie na modelowaniu fizykalnym, a równania dyfuzji rozwiązywane są w postaci aproksymacji empirycznych i opisów z dużymi uproszczeniami, jak np. model Barretta i Scorera z 1962 r. związany z badaniami Halitsky'ego [17].

Podobny charakter, aczkolwiek o znacznie szerszym wachlarzu rozpatrywanych przypadków (wpływ sąsiednich budynków), dającym kilkanaście zależności analitycznych, umożliwiających określenie rozkładu stężeń zanieczyszczeń wokół budynku, mają opracowania radzieckie Eltermana i Lejkina, cytowane na wstępie. Na uwagę zasługuje zbiór zależności przedstawionych przez Konstantinową i Starowiełowa we wspomnianym już poradniku [22]. Jednak brak jest dostępu do źródeł, na podstawie których owe zależności przytoczono [23]. Zważywszy na przytoczone trudności w niniejszym opracowaniu obliczenia lokalnych współczynników dyfuzji $\int_{\phi, eff}$ oparto na założeniu stałości turbulentnej liczby Schmidta Sc, ktąrej wartość określona jest formułą:

$$Sc = \frac{\mu_{eff}}{\bar{l}\phi, eff}$$
(26)

Wartości liczbowe ${}^{\rm G}_{\phi}$ = Sc_{\phi}, przyjęte w niniejszej pracy, podano już uprzednio w tab. 2.

(25)

Jak podaje Juda 5, wpływ dyfuzji molekularnej w procesie dyfuzji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym jest pomijalny. Współczynnik dyfuzji molekularnej przyjmują. dla gazów dyfundujących w powietrzu, wartości 1-2 10-5 m²/s [4], podczas gdy współczynniki dyfuzji turbulentnej - wartości od poniżej 1 m²/s do ponad 100 m²/s.

Jednakże dla obliczeń w warstwach przyściennych lub dla małej turbulencji wykorzystać można zależności stosowane w procesie dyfuzji molekularnej przy ruchu wymuszonym gazu, podane np. przez Hoblera [4].

5. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Jako przykład wykorzystania programu ACFES2/R przedstawione zostana wyniki obliczeń numerycznych stężenia zanieczyszczeń emitowanych przez wyrzutnię dachową, umieszczoną na dachu hali przemysłowej. Na rys. 3 przedstawiono geometrię obszaru całkowania różniczkowych równań transportu.

Warunki brzegowe

1. Strona nawietrzna - profile U,k, €, c=0, V=0.

$$U = U_{0}(Y/Y_{0})^{0.27}, U_{0} = 5 \text{ m/s}, Y_{0} = 10 \text{ m}$$
 (27)
 $Tu = 2.45 \text{ K}(Y/Y_{0})^{-0.25}$ (28)

Stąd na podstawie Tu (intensywność turbulencji) otrzymano profile k, ϵ . 2. Strona zawietrzna – warunki Neumanna, $\frac{\partial \Phi}{\partial v} = 0$.

3. Górna granica obszaru - swobodny strumień, $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$, ale V = 0.

4. Powierzchnie ziemi i hali - funkcje przyścienne.

5. Emitor - warunki Dirichleta, c = 1.

Obliczenia przeprowadzone dla izotermicznego przypadku wymagały 100 iteracji, tj. 165 sek. CPU komputera CYBER 73 (CDC-6400) dla programu ACFES2/R oraz dodatkowo 15 sek. CPU tego samego komputera dla programu SATEL1, który korzystając z wyników ACFES2/R wylicza rozkład stężeń zanieczyszczeń gazowych. Na rys. 3 i 4 przedstawiono wyniki obliczeń. Jakościowa analiza wyników wykazuje, że strefy recyrkulacji powietrza zostały przewidziane prawidłowo. Zarówno wir od strony nawietrznej hali, jak też układ wirów od strony zawietrznej i wir na krawędzi nawietrznej dachu co do rozmiarów zgadzają się z danymi zamieszczonymi w pracy Wilsona [19].

Rozmiary wirów (H - wysokość hali):

- 1) wir czołowy: wysokość ok. 0.75 H, długość ok. 1.0 H,
- 2) wir dachowy: długość ok. 2.5 H,
- 3) wir zawietrzny: długość ok. 6 H.

(28)



Rys. 3. Geometria obszaru i pole prędkości Fig. 3. Area geometry and velocity field



Rys. 4. Rozkład stężeń zanieczyszczeń gazowych Fig. 4. Distribution of gas polutions ratio

Model rozprzestrzeniania...

Na układ smugi zanieczyszczeń wpływ wywiera głównie lokalizacja emitora w obszarze wiru dachowego oraz deformacja pola prędkości wynikająca ze zbyt małej wysokości obszaru całkowania (23 m). Prawdopodobnie założenie swobodnego, niezakłóconego strumienia na wysokości ok. 30 m oraz gęstsza siatka różnicowa (w obliczeniach 30 14 węzłów) pozwolą na uzyskanie dokładniejszych wyników oraz przeprowadzenie ich analizy ilościowej czyli porównanie z eksperymentami. Wyniki, które przedstawiono na rys. 3 i 4 zgadzają się z dokładnością ok. 10% z empirycznymi zależnościami podanymi w pracy [22]. Obliczenia kontrolne polegały na porównaniu stężeń zanieczyszczeń na poziomie gruntu w różnych przekrojach za halą przemysłową, wyliczonych przez program i danych wzorami z pracy [22].

LITERATURA

- Chróściel S. i inni: Wytyczne obliczania stanu zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego. PZITS, Warszawa 1981.
- [2] Detrie J.P.: La Pollution Atmospherique. Paris 1969.
- [3] Elterman W.M.: Wientilacija chimiczeskich proizwodst. Izd. Chimija, Moskwa 1980.
- [4] Hobler T.: Dyfuzyjny ruch masy i absorbery. WNT, Warszawa 1976.
- [5] Juda J., Chróściel S.: Ochrona powietrza atmosferycznego. WNT, Warszawa 1974.
- [6] Launder B.E., Spalding D.B.: The Numerical Computation of Turbulent Flows, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. vol. 3, 269-289 (1974).
- [7] Lejkin I.N.: Projektirowanije wientilacionnych i promyszliennych wybrasow w atmosfieru. Izd. Chimija, Moskwa 1970.
- [8] Lipiński D.M.: Komputerowa symulacja ruchu płynu w przestrzeni dwuwymiarowej, rap. IOiW PW/01/84, Warszawa, luty 1984.
- [9] Lipiński D.M.: Further Progress in Development of ACFES Code Series. Tech. Univ. Denmark, Copenhagen, rep. LfV 85/15.
- [10] Patankar S.V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publ. Corp., Washington D.C., 1980.
- [11] Schmitz R.M.: Berechnung Turbulenter Raumluftstromungen bei Gekoppeltem Impuls-, Warme- und Stoffaustausch, praca doktorska w przygotowaniu, Rhein.-Westf. Techn. Hochsch., Aachen, 1985.
- [12] Sosnowski K., Lipiński D.M.: Influence of Air Infiltration on the Energy Consumption in the Large Industrial Halls. Proc. CLIMA 2000 Int. Conf., vol. 2, 133-138, Copenhagen 1985.
- [13] Spalding D.B.: Turbulence Models: a lecture course. Imp. Coll. Sci. Tech., CFDU/82/4, London 1983.
- [14] Spalding D.B.: Four Lectures on the PHOENICS Computer Code. Imp. Coll. Sci. Tech., CFDU/82/5, London 1982.
- [15] Spalding D.B.: Mathematical Modelling of Fluid-Mechanicx, Heat-Transfer and Chemical-Reaction Processes: a lecture course. Imp. Coll. Sci. Tech., HTS/80/1, London 1980.
- [16] Strauss W.: Air Pollution Control. J. Wiley, N.Y. 1971.
- [17] Stern A.C.: Air Pollution. Academic Press, N.Y. 1968.
- [18] Stone H.L.: Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations", SIAM J. Num. Anal., vol.5, 530-558 (1968).

- [19] Wilson D.J.: Contamination of Air Intakes from Roof Exhaust Vents. ASHRAE Trans. 1976.
- [20] ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1981.
- [21] Dziennik Ustaw PRL, 17/1980.
- [22] Sprawocznik projektirowszczika. Wientilacija i kondicionirowanije wozducha. Stroizdat, Moskwa 1977.
- [23] Rukowodstwo po rasczietu zagriaznienija wozducha na promyszlennych płoszczadkach. Stroizdat, Moskwa 1977.

модель распространения загрязнения вокруг промышленного цеха

Резюме

В настоящей статье даётся математическая модель явления обтекания здания ветром а также транспорта газовых загрязнений в этом потоке. Основу математической модели составляют элиптические уравнения транспорта массы, количества движения, энергии и концентрации загрязнений, дополненные моделью турбулентности к- с двумя уравнениями. Многие постоянные или функциональные зависимости являются экспериментальными, так что их конкретные величины приняты автором существенно влияют на результаты полученные этим методом. Интегрирование дифференциальных уравнений транспорта произведено методом конечных разностей. Коротко представлена относительно новая разностная схема СИМПЛЕСТ. Оговорена компьютерная программа общего назначения АСГЕS2/R для двухмерных элиптических потоков .

Основными проблемами применения оговориваемой модели являются получение коэффициентов ламинарной и турбулентной диффузии, имеющиеся в уравнениях транспорта.

В работе дан образ методов определения коэффициентов диффузии для уравнения концентрации загрязнений. В качестве расчётного примера показана проблема определения полей скорости и концентрации газовых загрязнений для обтекания большого промышленного цеха с эмиттером расположенным на крыше цеха.

Результаты полученные при помощи программы ACFES2/R сравнены с литературными данными и получено качественное согласие.

В заключении авторы утверждают, что цифровая модель обтекания промышленных цехов может существенно помочь в проектных работах по промышленной вентиляции.

A MODEL OF POLLUTANTS DISTRIBUTION AROUND INDUSTRIAL BUILDINGS

Summary

The problem of wind flow over industrial buildings (with significant gaseous pollutant sources) is dealt with in the paper. The mathematical model is based on governing elliptic partial differential equations (the Navier-Stokes equations) for mass, momentum, energy and concentration of pollutant. Differential two-equation model k- of turbulence has been chosen to account for turbulent effects. Various constants and formulas have experimental origin, therefore the performance of the model depends strongly on their values. To emphasise the problems connected with establishing values for diffusion coefficients, a discussion is provided on various calculation methods of diffusion coefficients for concentration equation. The mathematical model has been solved by numerical method, so called Control Volume Finite Difference Method (CVFDM). Relatively new numerical scheme, the SIM-PLEST scheme of Spalding, has been 'adopted. General purpose computer program ACFES2/R for elliptic flows, has been developed on a basis of the mentioned numerical model. Short characteristics of the code itself is provided in the paper. As an example of the performance of the model, results are presented for the case of wind flow over large industrial hall with roof-located exhaust vent. Vector plot of velocities and contour lines of concentration of gaseous pollutant are shown. The conclusion is that numerical models, such as the one presented, turn out to be baluable tool for designers of industrial ventilation branch.