

Barbara KNOBLOCH
Stanisław MIERZWIŃSKI

Instytut Ogrzewnictwa, Wentylacji
i Ochrony Powietrza
Politechnika Śląska

EKSPERYMENTALNY DOBÓR WARUNKÓW BRZEGOWYCH
PRZY MODELOWANIU ROZDZIAŁU POWIETRZA WENTYLACYJNEGO

Streszczenie. Do modelu matematycznego rozdziału powietrza wentylacyjnego w pomieszczeniu wprowadzono eksperymentalne warunki brzegowe dla silnie gradientowej strefy kształtowania się strugi nawiewanej, starając się tą drogą poprawić realność obliczeń.

Przedstawiono zakres pomiarów i sposób określania parametrów na brzegu tej strefy. Porównano wyniki obliczeń z eksperymentalnie uzyskanymi warunkami brzegowymi z wynikami przy stosowaniu znanych sposobów zadawania tych warunków.

W ramach badań dotyczących możliwości poprawienia wyników matematycznego modelowania rozdziału powietrza w pomieszczeniu wentylowanym zajęto się doбором warunków brzegowych.

Przedmiotem przeprowadzonej analizy był model matematyczny ruchu powietrza dla parametrów uśrednionych w czasie, w przypadku przepływu ustalonego, dwuwymiarowego i obejmujący równania:

- ciągłości przepływu:

$$\frac{\partial \bar{w}_1}{\partial x_1} = 0 \quad (1)$$

- ruchu Reynoldsa

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \tau} + w_j \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial x_j} = & -\beta_0 g_1 (\bar{T} - T_0) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \nu_0 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial x_j^2} + \\ & + \nu_t \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{w}_1}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial x_1} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

- energii

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{w}_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\lambda_0}{\rho_0 c_{p0}} \frac{\partial T}{\partial x_j^2} - \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

Układ ten zamykany jest za pomocą równań charakteryzujących turbulencję przepływu, zgodnie z 2-parametrową półempiryczną teorią turbulencji k-ε; są to równania transportu:

- energii kinetycznej turbulencji k:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{w}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \nu_t \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{w}_j}{\partial x_i} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{Pr} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] - \epsilon + g_j \beta_0 \frac{\nu_t}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \end{aligned} \quad (4)$$

- szybkości dysypacji energii kinetycznej turbulencji ε:

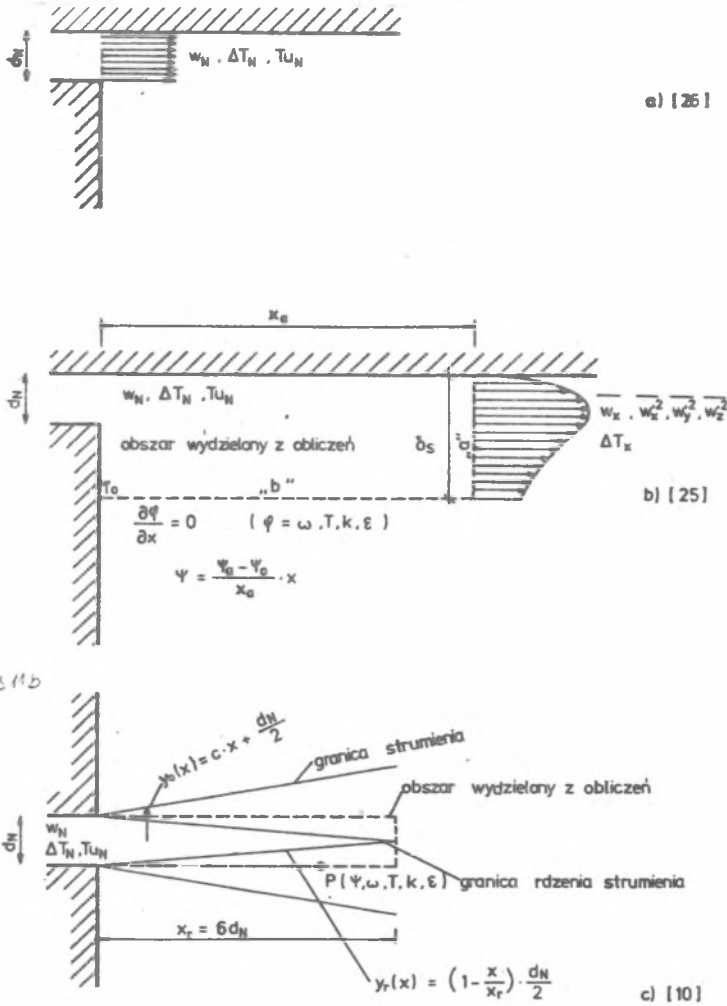
$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{w}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= C_1 \frac{\epsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{w}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_j} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} + C_3 \frac{\epsilon}{k} g_j \beta_0 \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

Model ten uzupełniony przez warunki brzegowe dla poszczególnych równań na ścianach stałych i w otworach wentylacyjnych, rozwiązuje się metodą numeryczną z wykorzystaniem techniki komputerowej. W wyniku otrzymuje się informacje o rozdziale powietrza wentylacyjnego w postaci obrazu ruchu powietrza i rozkładu jego parametrów: prędkości, wielkości turbulentnych i temperatury.

Obliczenia takie przeprowadzono dla różnych realnych fizycznie przypadków przepływu. Napotymano jednak na trudności z modelowaniem przepływów, w których struga nawiewana przestawała być w pełni swobodna już w swej początkowej strefie. Analiza przyczyn tego faktu wskazała na celowość eksperymentalnego uzupełnienia modelu, zwłaszcza w zakresie warunków brzegowych w strudze nawiewanej. Warunki te bowiem z uwagi na silnie gradientowy charakter zmian parametrów w strefie początkowej strugi miały decydujący wpływ na obliczane rozkłady parametrów w całym pomieszczeniu.

Obliczenia wstępne przeprowadzono, stosując znane dotychczas sposoby zadawania tych warunków, a mianowicie:

- bezpośrednio w płaszczyźnie otworu nawiewnego (rys. 1a) [1],
- na brzegu wydzielonego z obliczeń obszaru rozwoju strugi nawiewanej (rys. 1b). Sposób ten został rozwinięty przez Nielsena [2] jedynie dla



Rys. 1. Sposoby zadawania warunków brzegowych w strudze nawiewanej
 Fig. 1. The way in which boundary conditions are given in the supply jet

przypadku nawiewu przysufitowego, gdy możliwe było wykorzystanie uniwersalnych rozkładów parametrów powietrza dla strefy głównej strugi półograniczonej na brzegu pionowym strefy wydzielonej. Nie nadawał się więc on do analizowanego przypadku obliczeń,

c) na brzegu wydzielonego z obliczeń obszaru o długości rdzenia strugi i szerokości równej wysokości otworu nawiewnego (rys. 1c), gdzie parametry strugi ustalone zostały na podstawie uniwersalnych profili dla rdzenia strug płaskich [3].

Przy porównywaniu wyników obliczeń z pomiarami składowej osiowej prędkości dla wariantów a) i b) zadawania warunków brzegowych stwierdzono duże rozbieżności, co pokazano na rys. 2. Wynika stąd wniosek, iż w przypadkach, gdy występują indywidualne uwarunkowania geometryczne lub właściwości strugi, ich identyfikacja eksperymentalna jest nieodzowna dla pełnego odwzorowania dalszego przebiegu zjawiska. Tylko w niektórych sytuacjach może być ona zastąpiona przez bardzo silnie zagęszczoną siatkę dyskretyzacji w pobliżu otworu nawiewnego. Powoduje to jednak znaczne zwiększenie nakładów na obliczenia numeryczne, a niekiedy staje się wręcz niemożliwe do realizacji przy dostępnych komputerach.

W związku z tym zaproponowano sposób obliczeń, w którym zadawane byłyby warunki na brzegu wydzielonej z obliczeń strefy kształtowania się strugi nawiewanej na podstawie danych eksperymentalnych dla danej sytuacji geometrycznej nawiewnika oraz przyjętych parametrów strugi [4].

W celu uzyskania niezbędnych informacji eksperymentalnych należało dokonać pomiarów na brzegach strefy wydzielonej:

- składowych wektora prędkości średniej, potrzebnych dla obliczenia wirowości i funkcji prądu,
- wartości skutecznych fluktuacji prędkości do określenia energii kinetycznej turbulencji,
- makroskali długości do oszacowania wartości szybkości dyssypacji tej energii.

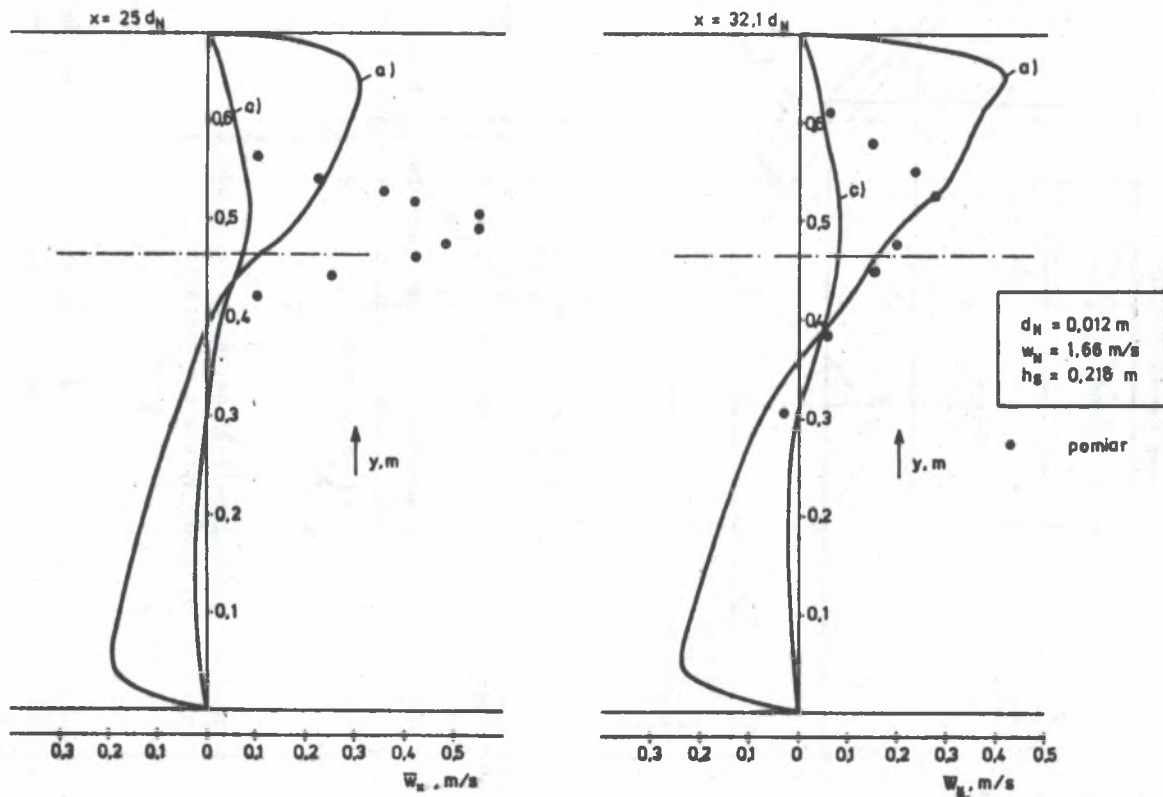
Specyfika tych pomiarów, ich wymagana dokładność wiązały się z koniecznością zastosowania skomplikowanych metod badawczych, które stały się możliwe do realizacji dopiero dzięki zastosowaniu cyfrowej rejestracji i przetwarzania wyników. O metodach tych traktuje odrębny referat [5].

Pomiary realizowane były w warunkach izotermicznego przepływu w pomieszczeniu modelowym, w którym przez odpowiednie ukształtowanie nawiewu i wywiewu wytworzono przepływ płaski. Pomiary można było więc ograniczyć do środkowego, reprezentatywnego przekroju pomieszczenia (rys. 3). Długość strefy wydzielonej z obliczeń określono jako odległość do miejsca, w którym zaczynało występować samopodobieństwo strugi, a szerokość odpowiadała szerokości strugi w tym przekroju.

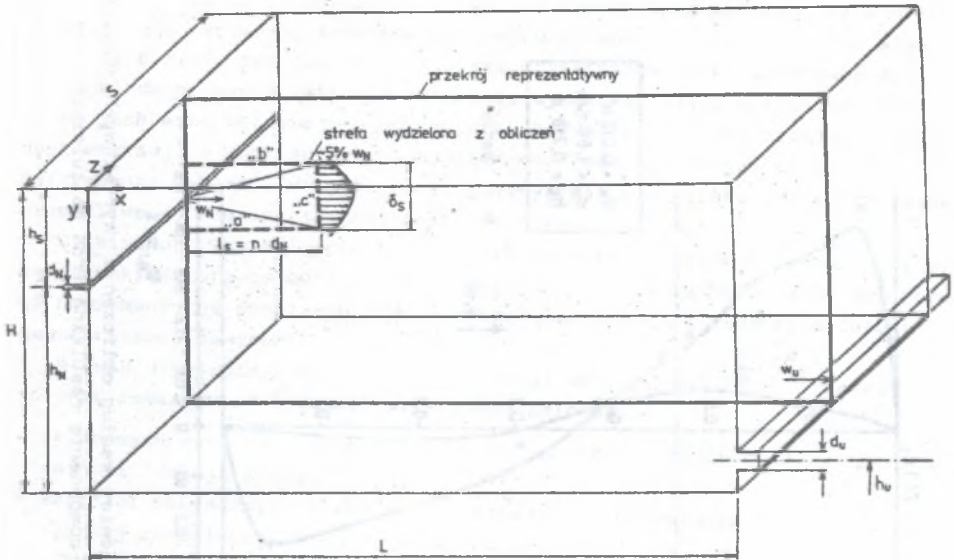
Wymiary te ustalono na podstawie dokładnych pomiarów składowej osiowej wektora prędkości średniej w szeregu przekrojach początkowych strugi (rys. 4). Długość tej strefy odpowiadała 25 wymiarom otworu nawiewnego. Jak wykazały późniejsze doświadczenia, potrzebna długość strefy zależy od lokalizacji otworu względem sufitu, którego obecność silnie wpływa na ukształtowanie się strefy początkowej, zwłaszcza strugi płaskiej.

Profile składowej osiowej prędkości średniej opisano drogą aproksymacji równania Abramowicza dla strugi płaskiej [6]:

$$\bar{w}_v(x, y) = w_{Ns} \left(\frac{d_N}{x}\right)^{1/2} \left[1 - \left(0,441 \frac{y}{y_p}\right)^{3/2}\right]^2 \quad (6)$$



Rys. 2. Porównanie wartości składowych wektora prędkości średniej według obliczeń i wryrkowych pomiarów
 Fig. 2. Comparison of the values of the mean velocity vector components resulting from calculations and
 . random measurements



Rys. 3. Schemat modelowego pomieszczenia wentylowanego z przekrojem reprezentatywnym dla przepływu płaskiego i strefą wydzieloną z obliczeń

Fig. 3. Diagram of the ventilated room model with the cross-section representative of flat flow and with the region excluded from calculations

Równanie to zostało zmodyfikowane przez odmienne określenie wartości promienia poławkowego y_p dla obu połówek strugi, z których tylko dolna rozwijała się swobodnie. Zatem dla dolnej części profilu prędkości:

$$y_p = bx \quad (7a)$$

Górna część profilu ograniczona była natomiast przez oddziaływanie sufitu, a więc promień poławkowy wyrażono w postaci:

$$y_p = (b - cx)x \quad (7b)$$

W zmodyfikowanej interpretacji równania (6) uwzględniono również odchylenie ku górze miejsca występowania maksimum prędkości w przekroju poprzecznym strugi:

$$y_0(x) = ay^2 \quad (8)$$

przyjmując, że w ten właśnie sposób przebiega skorygowana oś x . Występujące we wzorach (6), (7), (8) współczynniki A_g , a , b , c określono opierając się na zmierzonych profilach prędkości.

Na podstawie równania (6) obliczono wartości parametrów strugi na brzegach pionowym i poziomym strefy wydzielonej. Wartość funkcji prądu otrzymano drogą scałkowania równania definicyjnego osobno dla obu połówek strugi.

Istniała też możliwość obliczenia składowej poprzecznej wektora prędkości przez zróżniczkowanie funkcji prądu względem współrzędnej x . Wykorzystywano to, gdy wartości tej składowej były zbyt małe, aby zmierzyć je anemometrem.

Drogą analityczną określono również wirowość, obliczając odrębnie dla obu połówek odpowiednie pochodne wchodzące do wzoru definicyjnego:

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial x} y - \frac{\partial w}{\partial y} x \quad (9)$$

Obliczenia wartości funkcji prądu, składowych wektora prędkości oraz wirowości w dowolnym punkcie obszaru wydzielonego przeprowadzono za pomocą programu komputerowego. Obliczenia takie były możliwe dla dowolnych wartości eksperymentalnych współczynników oraz dowolnych wymiarów i lokalizacji względem sufitu otworu nawiewnego.

W tych samych co poprzednio przekrojach zmierzono rozkłady wartości skutecznych podłużnych i poprzecznych fluktuacji prędkości (rys. 5), które wykorzystano do obliczenia wartości energii kinetycznej turbulencji zgodnie z definicją:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{w_x'^2} + \overline{w_y'^2} + \overline{w_z'^2}) \quad (10)$$

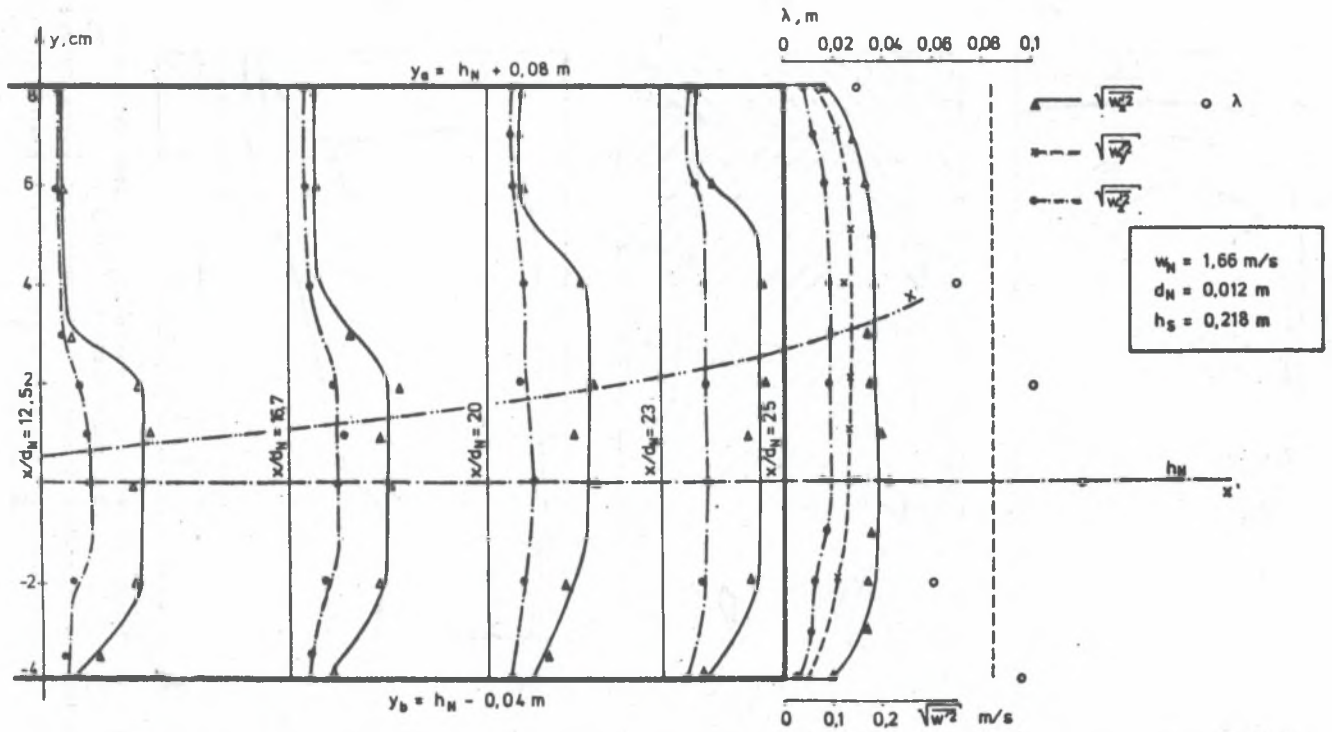
Szybkość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji określono z równania:

$$\epsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{l} \quad (11)$$

Długość drogi mieszania l oszacowano jako dziesiątą część makroskali długości Λ , której wartości zmierzono dla punktów położonych na brzegu pionowym strefy wydzielonej, a wyniki pomiaru pokazano na rys. 5.

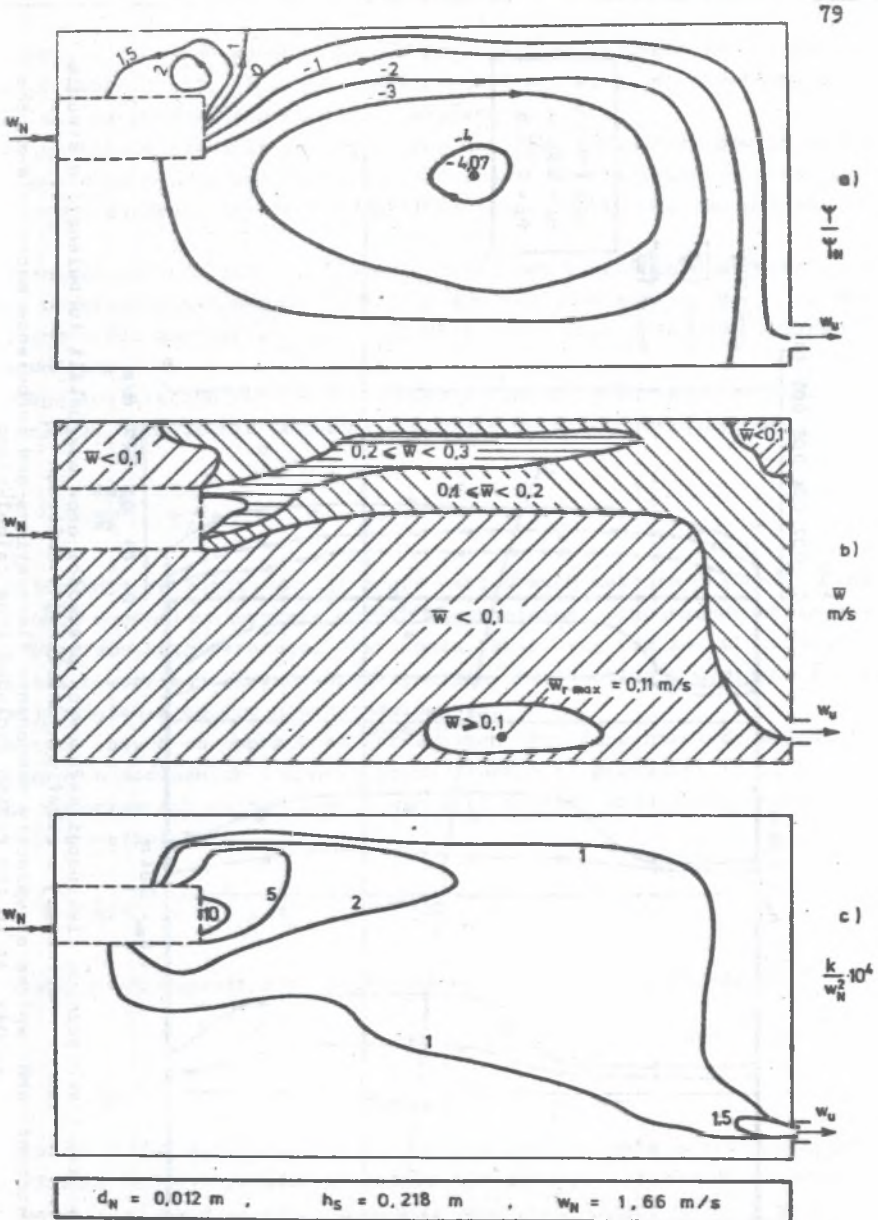
Wyniki pomiarów i obliczeń parametrów brzegowych wprowadzono jako warunki pierwszego rodzaju do rozwiązania numerycznego według odpowiednio zmodyfikowanego programu komputerowego do obliczania rozkładów parametrów powietrza. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 6.

Dla oceny efektów zastosowania proponowanego sposobu numeryczno-eksperymentalnego porównano uzyskane drogą obliczeń profile składowej osiowej



Rys. 5. Rozkład wartości skutecznych fluktuacji składowych prędkości oraz makroskali turbulencji w strudze nawiewanej w strefie wydzielonej z obliczeń

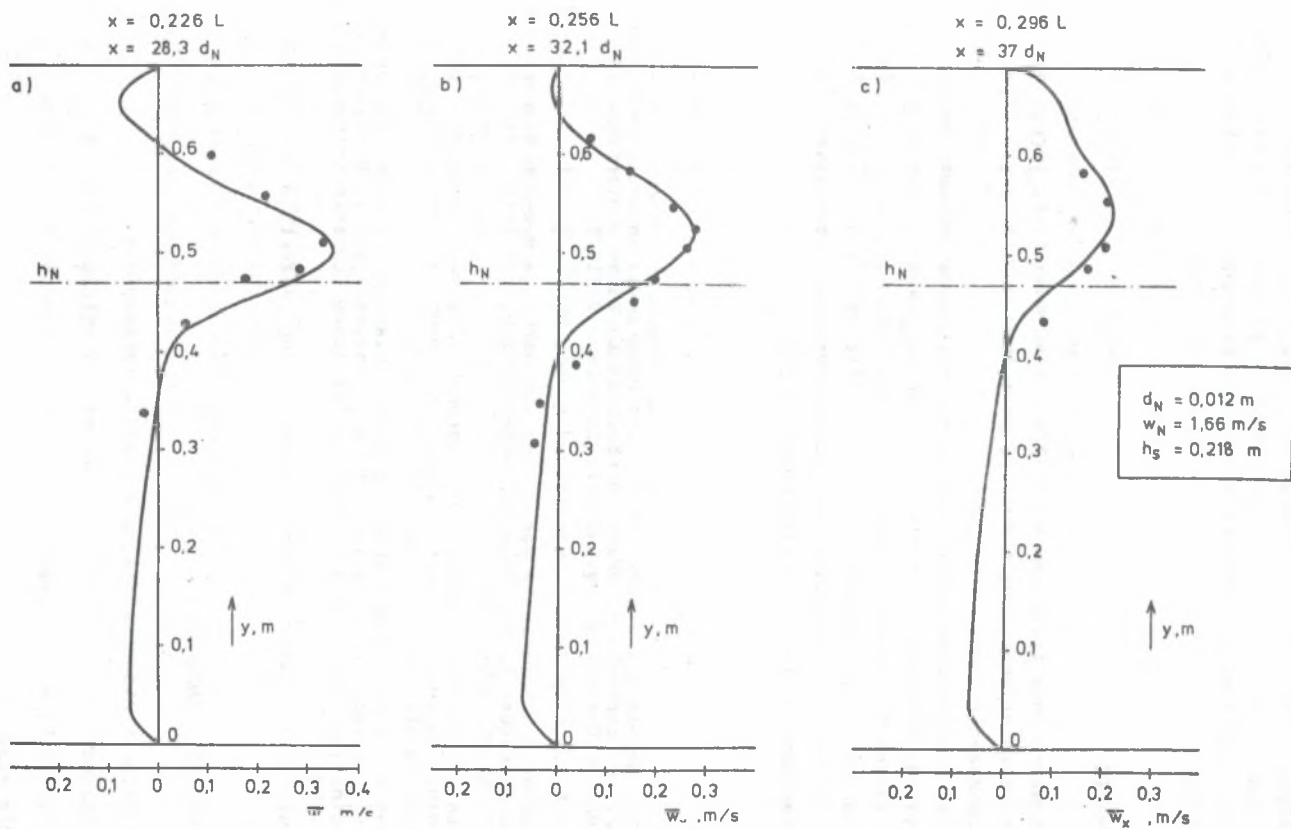
Fig. 5. Distribution of RMS values of velocity components fluctuations and turbulence macroscale in the supply jet in the region excluded from calculations



Rys. 6. Rozkład parametrów powietrza w pomieszczeniu modelowym według obliczeń numerycznych

a) funkcja prądu, b) prędkość średnia, c) energia kinetyczna turbulencji
 Fig. 6. Air parameters distribution in the room model obtained from numerical calculations

a) stream function, b) mean velocity, c) turbulence kinetic energy



Rys. 7. Wyniki sprawdzenia eksperymentalnego obliczeń numerycznych rozkładu prędkości w przekrojach poprzecznych pomieszczenia wentylowanego

Fig. 7. Results of experimental verification of numerical calculations of velocity distributions in cross-sections of the ventilated room

wektora prędkości średniej z wartościami zmierzonymi w wybranych przekrojach poprzecznych pomieszczenia modelowego (rys. 7). Stwierdzono, iż uzyskano znacznie lepszą zgodność wyników niż w przypadku obliczeń według znanych dotychczas sposobów zadawania warunków brzegowych, co wykazano na rys. 7 i 2.

PODSUMOWANIE

Realne odwzorowanie przepływu w strefie kształtowania się strugi nawiewanej poprawia matematyczną symulację przepływu w pozostałych częściach pomieszczenia wentylowanego.

Na obecnym etapie rozwoju modelowania matematycznego sposób ten może być wykorzystany do symulacji różnych przypadków nawiewu. Pozwala on ograniczyć zakres fizykalnych badań modelowych rozdziału powietrza. Badania te przeprowadza się bowiem jedynie w strefie kształtowania strugi nawiewanej, określając następnie rozkład parametrów w pozostałych częściach pomieszczenia drogą obliczeń numerycznych.

LITERATURA

- [1] Hanel B., Scholz R.: Experimentelle und numerische Untersuchungen von stationären, isothermen, ebenen Strömungen in Räumen unterschiedlicher innerer Geometrie. Gesundheits-Ingenieur 99/1978.
- [2] Nielsen P.V.: Flow in air conditioned rooms. Nordborg 1976.
- [3] Rheinlander J.: Numerische Berechnung von vorwiegend durch Schwerkraft angetriebenen Raumströmungen. Dissertation, VDI Zeitschriften, Reihe 7, Nr 60. Düsseldorf 1980.
- [4] Knobloch B.: Eksperymentalny dobór parametrów strugi nawiewanej dla modelowania matematycznego ruchu powietrza wentylacyjnego. Praca doktorska Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
- [5] Knobloch B., Popiołek Z.: Sposób pomiaru składowych wektora prędkości średniej i parametrów turbulentnych w przepływach silnie burzliwych. III Seminarium "Zastosowanie Mechaniki Płynów w Ochronie Środowiska". Wisła 1988.
- [6] Abramowicz G.N.: Teorija turbulentnych strug. Fizmatgiz, Moskwa 1960.

SPIS OZNACZEŃ I INDEKSÓW

- A_s - współczynnik eksperymentalny w profilu Abramowicza
 a - współczynnik eksperymentalny we wzorze na położenie osi x
 b, c - współczynniki eksperymentalne we wzorze na promień półkowy
 c_p - ciepło właściwe
 d - wymiar otworu wentylacyjnego

- f - częstotliwość próbkowania
- g - przyspieszenie ziemskie
- h - wysokość położenia otworu wentylacyjnego nad podłogą
- h_s - oddalenie otworu nawiewnego od sufitu
- k - energia kinetyczna turbulencji
- l - długość drogi mieszania
- l_s - długość obszaru wydzielonego z obliczeń
- p - ciśnienie
- T - temperatura
- w - prędkość powietrza
- x,y,z - współrzędne punktów
- γ_p - promień połówkowy strugi
- β - współczynnik rozszerzalności objętościowej
- δ_s - szerokość obszaru wydzielonego z obliczeń
- ε - szybkość dysypacji energii kinetycznej turbulencji
- Λ - makroskala długości
- λ - współczynnik przewodzenia ciepła
- ν - współczynnik lepkości kinematycznej
- ρ - gęstość powietrza
- Ψ - funkcja prądu
- ω - wirowość

INDEKSY

- i,j - dotyczy współrzędnych w zapisie tensorowym
- N - dotyczy otworu nawiewnego
- O - dotyczy wartości odniesienia lub osiowej
- r - dotyczy rdzenia strugi
- t - dotyczy przepływu turbulentnego
- x,y,z - dotyczy współrzędnej punktu

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ДОБОР БЕРЕГОВЫХ УСЛОВИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА

Р е з ю м е

В математический модель распределения вентиляционного воздуха введено экспериментальные береговые условия для сильно градиентной зоны образования приточной струи, стараясь этой дорогой поправить реальность расчетов.

Представлено объем измерений и способ определения параметров воздуха на берегу этой зоны. Составлено результаты расчетов с экспериментально полученными береговыми условиями с результатами при применении известных до сих пор способов задавания этих условий.

EXPERIMENTAL CHOICE OF BOUNDARY CONDITIONS IN MODELS OF VENTILATION AIR FLOW

S u m m a r y

Mathematical model of ventilation air flow in a room has been completed with experimentally determined boundary conditions for high gradient zone of the supply air stream forming in order to increase the calculation accuracy.

The range of measurements and the way in which the parameters are determined on the boundary of this zone are presented. Calculation results obtained with the use of experimental boundary conditions are compared with the results for which the boundary conditions are given in usually applied ways.