

Zbigniew MODLIŃSKI

Adam WANIK

Mieczysław ZEMBRZUSKI

Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów
Politechnika Wrocławska

TRÓJWYMIAROWY PRZEPŁYW TURBULENTNY W SEPARATORZE CYKLONOWYM

Streszczenie: Przedstawiono model matematyczny trójwymiarowego przepływu turbulentnego w separatorze cyklonowym. Model oparto na uśrednionych po czasie równaniach zachowania zmiennych hydrodynamicznych i dwu równaniach modelu turbulencji $k-\epsilon$. Przeprowadzono obliczenia dla przepływu czystego powietrza w cyklonie prostym. Porównano spadek ciśnienia wyznaczony numerycznie z rezultatami metod klasycznych.

1. Wstęp

Separatory cyklonowe są najczęściej spotykanymi w technice urządzeniami odpylającymi. Są proste i tanie w budowie, mogą wychwytywać pyły do $5 \mu\text{m}$. Aczkolwiek stosowane są one od szeregu dziesiątków lat, to jednak dotąd nie wszystkie zjawiska zachodzące w cyklonach są wyjaśnione. Wobec niedostatecznych badań teoretycznych nad działaniem cyklonu, dobór tych urządzeń opiera się na podstawach empirycznych. Doprowadziło to do zastosowania w przemyśle najbardziej różnorodnych typów cyklonów.

Przy projektowaniu cyklonu zasadnicze znaczenie ma określenie spadku ciśnienia w cyklonie i tzw. ziarna granicznego /minimalnego ziarna wychwyconego w cyklonie/. Ustalenie związków między tymi wielkościami a parametrami konstrukcyjnymi cyklonu było przedmiotem wielu badań [1,2]. Większość jednak prezentowanych metod obliczeniowych ograniczona jest do wąskiego zakresu badanych cyklonów, nie uwzględniających dodatkowo specyficznych warunków termodynamicznych /wysoka temp. i ciśnienie/, jakie narzuca nowoczesna technologia [3].

W pracy przedstawiono adaptację metody Caretto [4] obliczania trójwymiarowej warstwy przyściennej do zagadnienia recyrkulacyjnego przepływu w cyklonie prostym. Dla przypadku przepływu czystego powietrza wyznaczono pola ciśnień i prędkości.

2. Opis modelu

Naturalnym układem współrzędnych dla cyklonu prostego /rys. 1/ jest

cylindryczny układ współrzędnych $/x, r, \theta/$. Równania zachowania masy i pędu w tym układzie można zapisać jako:

- równanie ciągłości

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (grV) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (gW) + \frac{\partial}{\partial x} (gU) = 0, \quad (1)$$

- równanie pędu w kierunku x

$$g \left(V \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{W}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + U \frac{\partial U}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \mu \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{r \partial \theta} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (2)$$

+ równanie pędu w kierunku r

$$g \left(V \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{W}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} + U \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{W^2}{r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [2r \mu \frac{\partial V}{\partial r}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\mu \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{W}{r} \right) + \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) \right] - 2 \frac{W}{r} \left(\frac{\partial W}{r \partial \theta} - \frac{V}{r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right], \quad (3)$$

- równanie pędu w kierunku θ

$$g \left(V \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{W}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta} + U \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{VW}{r} \right) = - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(r \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) \right] + \frac{W}{r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{W}{r} \right) + \frac{\partial V}{\partial \theta} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\mu \left(2 \frac{\partial W}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right]. \quad (4)$$

Dla przepływu burzliwego, występujące w (1) - (4) składowe wektora prędkości zastępowane są wartościami uśrednionymi w czasie, a laminarny współczynnik lepkości dynamicznej - współczynnikiem efektywnym μ_{ef} . W obecnej pracy przestrzenny rozkład efektywnego współczynnika lepkości dynamicznej określono wykorzystując model k- ϵ , oparty na równaniach kinetycznej energii turbulencji $/k/$

$$g \left(V \frac{\partial k}{\partial r} + \frac{W}{r} \frac{\partial k}{\partial \theta} + U \frac{\partial k}{\partial x} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x}) + G_k - g \epsilon \quad (5)$$

i szybkości jej dyssypacji $/\epsilon/$

$$g \left(V \frac{\partial \epsilon}{\partial r} + \frac{W}{r} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) + C_1 \frac{G_k}{k} G_k - C_2 \frac{g \epsilon^2}{k}, \quad (6)$$

gdzie $\Gamma_k = \mu_{ef} / G_k$, $\Gamma_\epsilon = \mu_{ef} / G_\epsilon$.

Człon generacyjny G_k ma postać:

$$G_k = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{r \partial \theta} + \frac{V}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{r \partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{r \partial \theta} + \frac{\partial W}{\partial r} - \frac{W}{r} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Rozkład współczynnika μ_{ef} uzyskuje się jako sumę współczynnika laminarnego i współczynnika turbulentnego u_t , gdzie:

$$\mu_t = C_D \rho k^2 / \epsilon \quad (8)$$

Zalecane stałe modelu $k-\varepsilon$ wynoszą odpowiednio [5]:

σ_k	σ_ε	C_D	C_1	C_2
1,0	1,3	0,09	1,43	1,92

Uzupełnieniem systemu równań (1)-(8) jest określony rozkład gęstości czynnika przyjęty w pracy jako stały.

Rozwiązanie równań (1)-(6) oparte jest na ogólnej metodzie rozwiązywania równań transportu, w której różnicową postać równań uzyskuje się przez całkowanie po objętości kontrolnej. Bliższe szczegóły rozwiązania równań (1)-(6) wraz z warunkami brzegowymi szeroko omawia literatura [1,5,6].

3. Przykład obliczeń

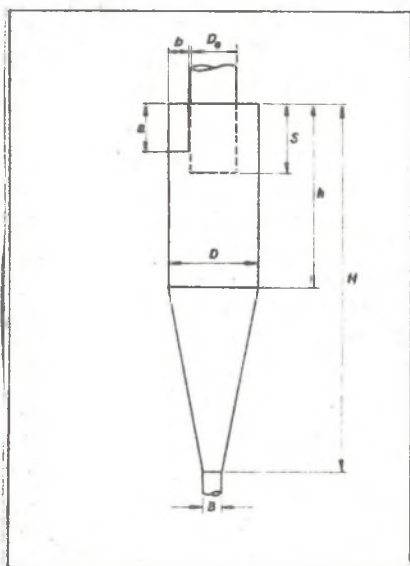
Przedstawiony model matematyczny wykorzystano do obliczeń przepływu czystego powietrza w cyklonie prostym /rys. 1/.

Dane konstrukcyjne:

- $a = 0,2 \text{ m}$
- $b = 0,24 \text{ m}$
- $D_e = 0,32 \text{ m}$
- $D = 0,88 \text{ m}$
- $B = 0,04 \text{ m}$
- $S = 0,4 \text{ m}$
- $h = 0,65 \text{ m}$
- $H = 1,7 \text{ m}$

Prędkość wlotowa 16 m/s.

Gęstość czynnika 1,21 kg/m³.



Rys. 1. Cyklon prosty

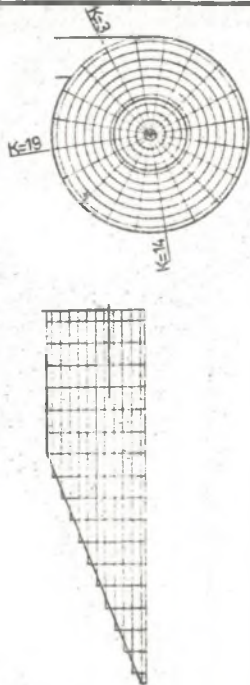
Zdolności obliczeniowe obecnych maszyn cyfrowych poważnie ograniczają wykorzystanie algorytmów trójwymiarowych w zagadnieniach technicznych. Symulacja złożonej geometrii istniejących urządzeń wymaga użycia dużej liczby węzłów siatki różnicowej, znacznie przekraczających w wielu przypadkach zasoby pamięci operacyjnej maszyn cyfrowych. Problem ten ze szczególną ostrością występuje w zagadnieniach przepływów recyrkulacyjnych,

w których istnieje konieczność utrzymywania w pamięci wielu tablic trójwymiarowych. Siatkę różnicową /19x13x21/ wykorzystaną do obliczeń ilustruje rys. 2. Program wykorzystywał 460 kb pamięci operacyjnej /R-32/ i niemożliwe było dalsze zagęszczenie siatki dla oszacowania błędu metody.

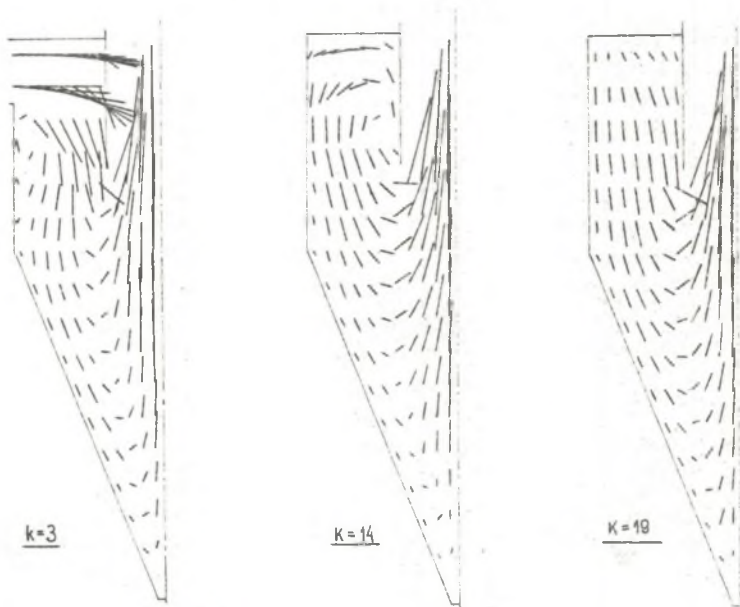
Na rys. 3 przedstawiono wyznaczone pole prędkości w trzech wybranych płaszczyznach. Interesujące jest powstawanie wtórnego przepływu w sąsiedztwie komina cyklonu /płaszczyzna $k = 14$ /, co może mieć znaczenie dla skuteczności odpylania w zakresie małych cząstek.

Spadek ciśnienia w cyklonie wyznaczony jako różnica średniego ciśnienia statycznego w przekroju wlotowym i wylotowym wyniósł 550 N/m^2 . Spadek obliczony klasycznymi metodami [1] przyjmował wartości od 690 do 890 N/m^2 .

Wydaje się, że istotny wpływ na odwzorowanie przepływu w cyklonie ma określenie



Rys. 2. Siatka różnicowa



Rys. 3. Pola prędkości w wybranych przekrojach cyklonu

brzegowego profilu prędkości. W przypadku obecnego algorytmu istnieje silne oddziaływanie pola przepływu na węzły, w których zadaje się wlotowe warunki brzegowe i trudno jest przed obliczeniami określić w nich rozkład ciśnień i prędkości.

Literatura

- [1] Leith, D., and Mehta, D.; Cyclone Performance and Design, *Atm. Environ.*, Vol. 7, p. 527 /1973/
- [2] Casal, J., Martinez-Benet, J.M.; A better way to calculate cyclone pressure drop, *Chem. Eng.*, Vol. 24, p. 99 /1983/
- [3] Parker, J., Jaun, R., Calvert, S., Drehmel, D., and Abbott, J.; Particle Collection in Cyclones at High Temperature and High Pressure, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 15, p. 451 /1981/
- [4] Caretto, L.S., Curr, R.M., Spalding, D.B.; Two Numerical Methods for Three-Dimensional Boundary Layers, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 1, p. 39 /1972/
- [5] Launder, B.E. and Spalding, D.B.; The numerical computation of turbulent flows, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 3 /1974/
- [6] Serag-el-din, M.A.S.; The Numerical Prediction of The Flow and Combustion Processes in The a Three-Dimensional Can Combustor, Ph. D. Thesis, University of London, 1977

ТРЕХМЕРНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК В ЦИКЛОННОМ СЕПАРАТОРЕ

Р е з ю м е

В статье представлен метод решения проблемы трёхмерного, турбулентного поля течения в циклонном сепараторе. В качестве модели турбулентности принимается модель, для которой энергия турбулентного движения и скорость её диссипации рассчитываются на основе соответствующих уравнений переноса, которые решаются совместно с уравнением для осредненного течения.

THE THREE - DIMENSIONAL, TURBULENT FLOW IN CYCLONE SEPARATORS

S u m m a r y

A mathematical model is presented for the prediction of the three-dimensional, turbulent flow in cyclone separators. The model makes use of the time-averaged forms of the governing conservation equations with two equation k- model for turbulent transport.

Calculations are performed for the flow of the pure air in conventional cyclone. Computation of pressure drop in cyclone are compared with classical method results.