MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-M/2012
ZESZYT 6
ROK 109
ISSUE 6
YEAR 109

RYSZARD WÓJTOWICZ[1]

SYMULACJE KOMPUTEROWE *CFD* PRZEPŁYWU GAZU W CYKLONIE PROMIENIOWYM

COMPUTER *CFD* SIMULATIONS OF GAS FLOW IN A RADIAL CYCLONE

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki komputerowego modelowania *CFD* przepływu gazu w odpylaczu odśrodkowym z wlotem stycznym (cyklonie promieniowym). Przedstawiono kolejne etapy prowadzenia symulacji tj. tworzenie geometrii modelu, dobór i generowanie siatki numerycznej oraz ustalanie warunków jednoznaczności. Opisano także sposób prowadzenia obliczeń i monitorowania ich rozwiązania. Wyniki opracowano w postaci wektorowych i konturowych map rozkładu podstawowych parametrów przepływu (prędkości, ciśnień etc.), ilustrujących ruch gazu w wybranych płaszczyznach przekroju odpylacza.

Słowa kluczowe: odpylanie, odpylacz, cyklon promieniowy, przepływ gazu, symulacje CFD

Abstract

In the paper are presented the results of the computer *CFD* modelling of the gas flow in a centrifugal cyclone separator with a tangential inlet. The successive stages of the simulation i.e. creating of a model geometry, selection and generating of the mesh and boundary conditions and also monitoring of solution are described. The results are presented in the form of vector and contour maps of main flow parameters (velocities, pressures etc.), describing the flow of gas in selected cutting planes of the separator.

Keywords: dust removal, separator, radial cyclone, gas flow, CFD simulations

[1] Dr inż. Ryszard Wójtowicz, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Odpylacze odśrodkowe zwane potocznie cyklonami stanowią liczną grupę urządzeń, powszechnie wykorzystywanych w wielu technologiach przemysłowych. Stosowane są przede wszystkim do wydzielania cząstek stałych z zapylonego gazu, np. w procesach ochrony środowiska [1, 2], rozdzielania zawiesin i emulsji [3], a także jako końcowe urządzenia separujące w instalacjach transportu pneumatycznego [1, 4]. Cyklony charakteryzują się prostą i zwartą budową, brakiem elementów ruchomych, nieskomplikowaną obsługą oraz uniwersalnością, w tym możliwością pracy w różnych, często niekorzystnych warunkach np. wysokiego ciśnieniu i temperatury.

Mimo iż konstrukcja cyklonu nie jest skomplikowana, profil przepływu gazu wewnątrz aparatu jest złożony i zależy od wielu parametrów, głównie od jego geometrii i wymiarów. Podstawowymi wielkościami rzutującymi na skuteczność działania i straty ciśnienia w cyklonie są jego średnica i wysokość, istotny wpływ wywierają również kształt i usytuowanie kanałów doprowadzającego zapylony gaz i odprowadzającego powietrze oczyszczone. Prawidłowa konstrukcja tych elementów pozwala wyeliminować występujące podczas pracy odpylacza zjawiska niepożądane, takie jak: przepływu gazu bezpośrednio z otworu wlotowego do wylotu cyklonu (tzw. krótkie spięcie) czy też – typowe dla błędnie zaprojektowanych aparatów – przenoszenie wirowego ruchu gazu do zasobnika pyłu.

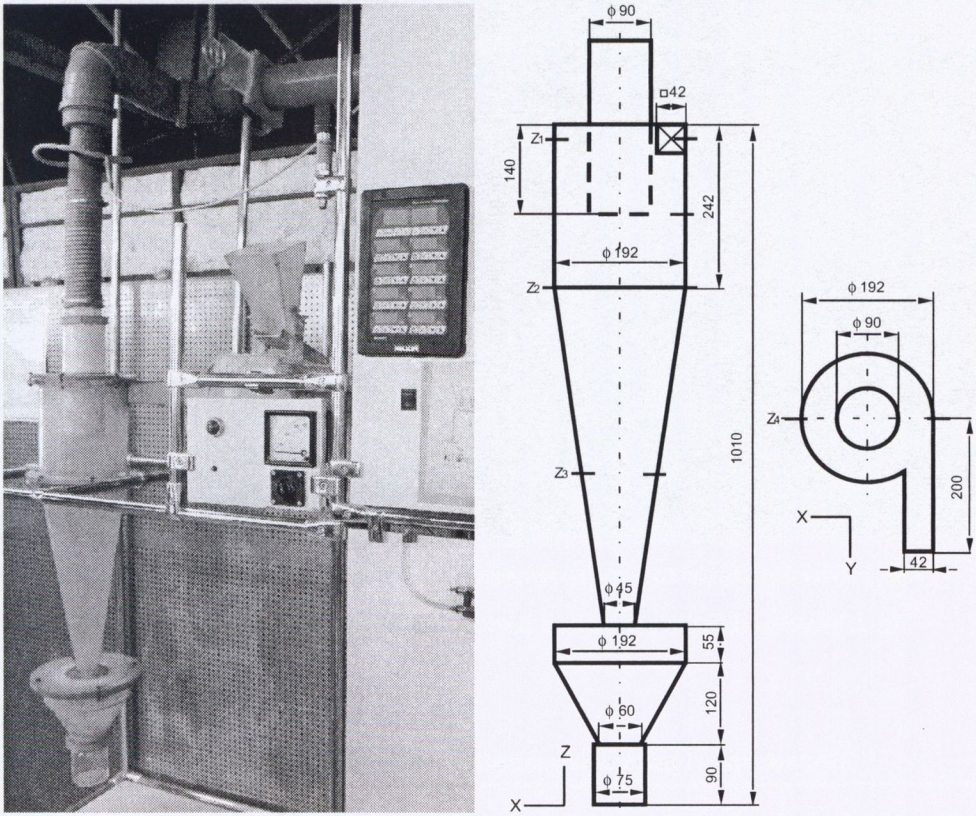
Użytecznym narzędziem, coraz częściej stosowanym w procesie projektowania urządzeń przemysłowych są komputerowe pakiety symulacyjne, bazujące podczas obliczeń na specjalnie tworzonych kodach numerycznej mechaniki płynów (*CFD*) [5, 6]. Mimo wielu istotnych zalet (uniwersalności, możliwości łatwej zmiany geometrii konstruowanego aparatu w wybranym zakresie parametrów procesowych, szerokich możliwości prezentacji uzyskanych wyników itd.) programy te podczas konstruowania odpylaczy cyklonowych są – jak dotychczas – mało popularne i nieczęsto wykorzystywane.

2. Zakres i metodyka prowadzonych symulacji

Symulacje przepływu gazu (układ jednofazowy) prowadzono dla cyklonu o średnicy $D = 0{,}192$ m i wysokości całkowitej $h = 1{,}01$ m, pokazanego na rys. 1. Gazem przepływającym przez cyklon było powietrze ($\rho = 1{,}225$ kg/m^3, $\mu = 1{,}7894 \cdot 10^{-5}$ Pa·s), jego prędkość na wlocie do aparatu wynosiła $u = 15$ m/s.

Analizę przepływu gazu wykonano w oparciu o wyniki modelowania numerycznego, wykorzystując jako preprocesor (tworzenie geometrii modelu, generowanie siatki numerycznej, wprowadzanie warunków jednoznaczności) generator siatek *GAMBIT* 2.4 [7]. Geometryczny model cyklonu wraz z naniesioną siatką numeryczną pokazano na rysunku 2. Jakość elementów siatki określano na podstawie znormalizowanego kryterium skośności *EquiAngle Skew* [7] – odstępstwa rzeczywistych kątów między krawędziami komórek od kąta modelowego, wynoszącego w przypadku elementów czworościennych $\theta_{eq} = 60^{\circ}$.

a) b)

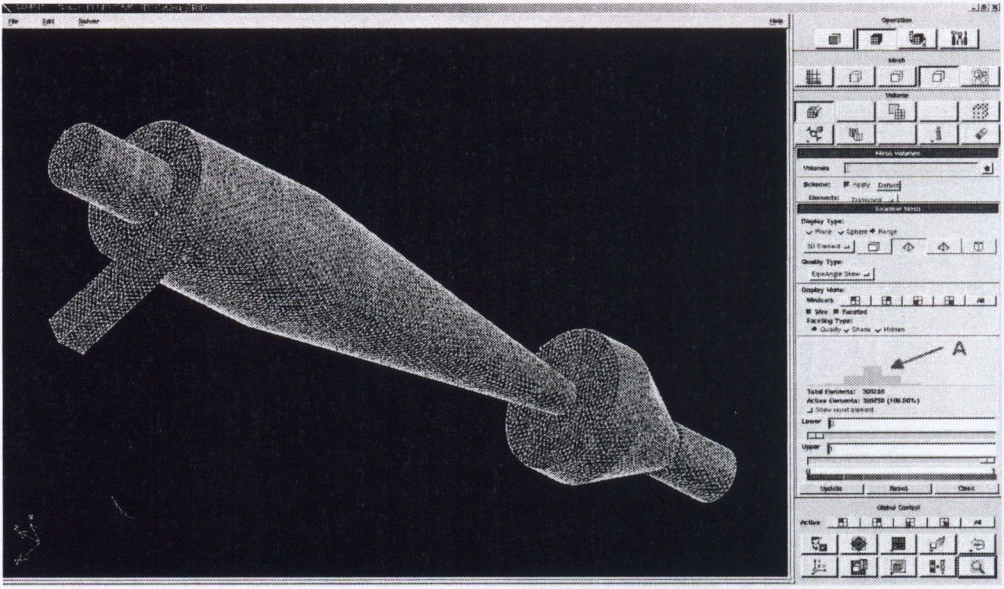


Rys. 1. Cyklon promieniowy a) widok b) geometria i podstawowe wymiary

Fig. 1. Radial cyclone a) real view b) geometry and overall dimensions

Histogram jakościowego rozkładu komórek numerycznych tworzony w oparciu o przyjęte kryterium pokazano na rys. 2(A), podstawowe parametry stosowanej siatki zestawiono w tabeli 1.

Jak wynika z analizy histogramu większość komórek to elementy dobrej jakości dla których wartości znormalizowanego kryterium skośności Q_{EAS} nie przekraczają 0,6. Jedynie nieliczne z nich (0,18% wszystkich elementów) cechuje nieznaczna degeneracja, jednak nawet i w ich przypadku $Q_{EAS} < 0{,}73$. Można zatem przyjąć, że jakość wygenerowanej siatki jest zadowalająca [7].



Rys. 2. Geometria modelu z siatką numeryczną (A – histogram rozkładu jakości komórek)

Fig. 2. Model geometry and numerical mesh (A – distribution of mesh elements quality)

Tabela 1

Geometryczne i jakościowe parametry stosowanej siatki numerycznej

Rodzaj komórek	Liczba komórek	Liczba węzłów	Wartość modalna Q_{EAS}	Wartość maksymalna Q_{EAS}
Czworościenne (Tetrahedral)	$3{,}09258 \cdot 10^5$	$5{,}8453 \cdot 10^4$	0,3 ÷ 0,4 (41,5%)	0,7 ÷ 0,73 (0,13%)

Obliczenia numeryczne prowadzono z wykorzystaniem solvera pakietu obliczeniowego *ANSYS FLUENT 12.0* [8], postprocesora tego programu użyto również do prezentacji uzyskanych wyników. Tok obliczeń monitorowano na podstawie obserwacji zmian reszt dla wyznaczanych wielkości (ciągłość, składowe prędkości, parametry burzliwości) podczas kolejnych iteracji, kryterium ich zbieżności ustalono na poziomie $10^{-5} \div 10^{-6}$.

Burzliwy przepływ gazu w odpylaczu opisano matematycznie za pomocą standardowych równań transportu masy i pędu Naviera-Stokesa (1-2), uśrednianych dalej metodą Reynoldsa (*RANS*):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u'_i u'_j}\right) \tag{2}$$

Zależność między naprężeniami Reynoldsa a średnimi gradientami prędkości opisuje hipoteza Bossinesq'a:

$$-\rho\overline{u'_i u'_j}=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \tag{3}$$

gdzie k określa energię kinetyczną burzliwości a μ_t lepkość burzliwą wyznaczaną z zależności:

$$\mu_t=\rho\cdot C_\mu\cdot\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

Jako metodę zamknięcia układu równań transportu (1 - 2) wybrano model burzliwości k-ε w wersji *RNG* (renormalization group) z dodatkową opcją uwzględniającą wirowość przepływu średniego (*Swirl Modification*), opisaną szczegółowo w [8]. Uzupełnia on układ równań podstawowych dwoma równaniami dodatkowymi – dla energii kinetycznej burzliwości k i szybkości dyssypacji energii ε:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k-\rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i\varepsilon)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_1\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-\frac{C_\mu\rho\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

gdzie: $\eta=S\frac{k}{\varepsilon}$; $S=\sqrt{2\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij}}$; $\overline{S}_{ij}=0{,}5\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$; $\eta_0=4{,}38$; $\beta=0{,}012$

Produkcja energii kinetycznej burzliwości G_k modelowana jest jako:

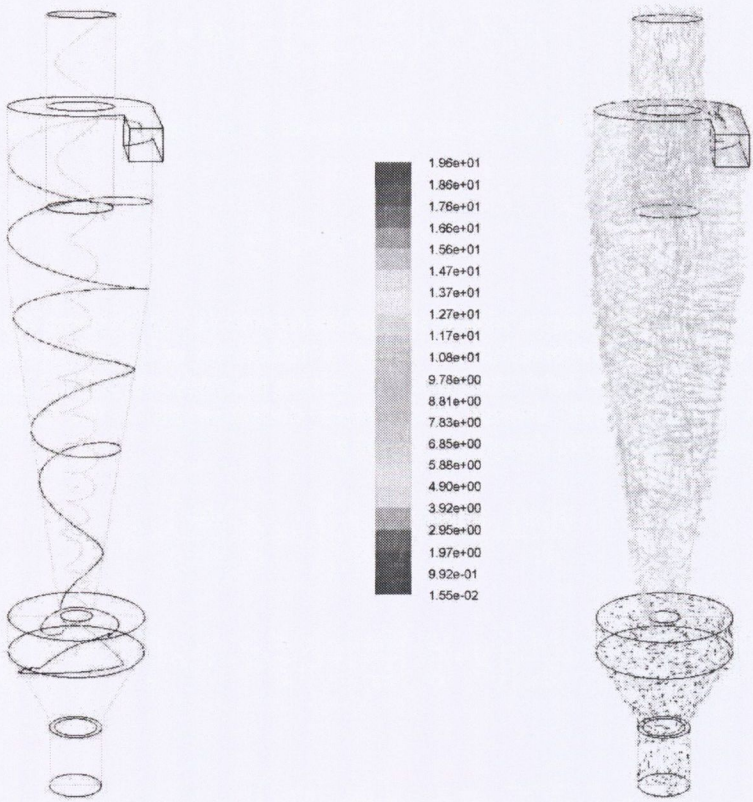
$$G_k=-\rho\overline{u'_i u'_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \tag{7}$$

stałe modelu i burzliwe liczby Prandtla dla k i ε przyjmują odpowiednio wartości: $C_\mu=0{,}0845$; $C_1=1{,}42$; $C_2=1{,}68$ $\sigma_k=\sigma_\varepsilon=0{,}718$.

3. Wyniki symulacji

Na rys. 3a pokazano tor ruchu hipotetycznej cząstki gazu w cyklonie, natomiast na rys. 3b przykładowe, wektorowe mapy prędkości jego przepływu w pionowej płaszczyźnie przekroju oraz w pobliżu ścianek aparatu.

a) b)



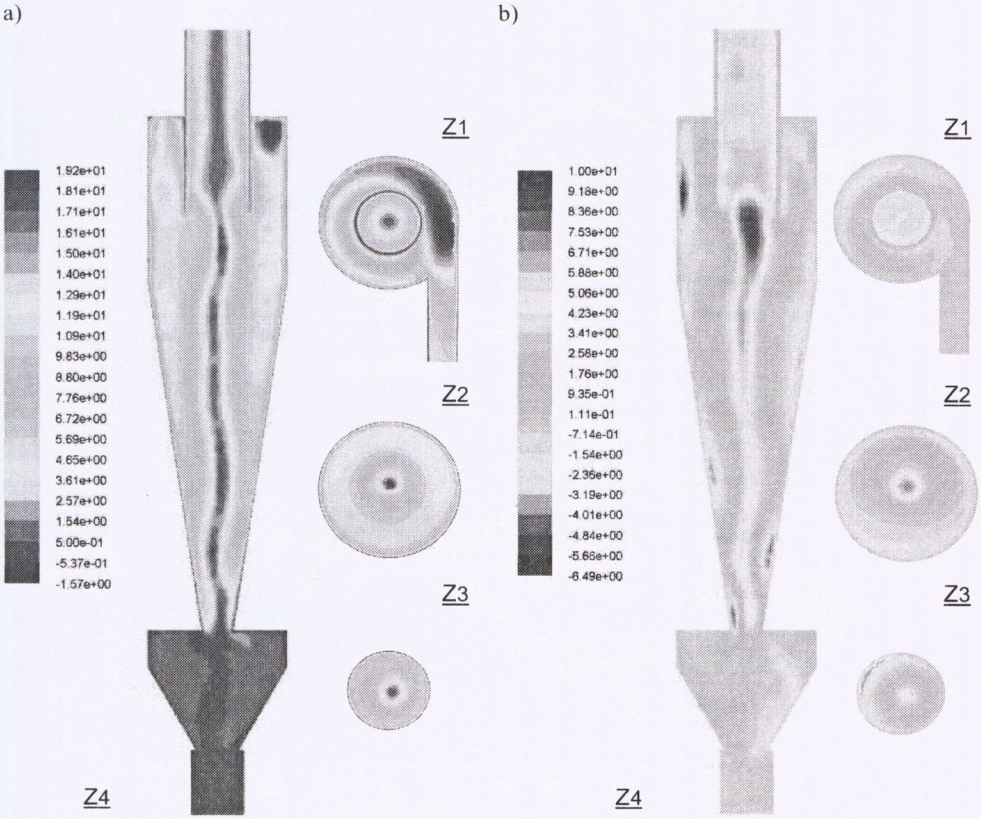
Rys. 3. Przepływ gazu w cyklonie a) mapa wektorowa prędkości (m/s), b) linia przepływu

Fig. 3. Gas flow in a cyclone a) vector map of velocities (m/s), b) path line

W początkowej fazie przepływu gaz doprowadzony stycznie do cyklonu zaczyna poruszać się ruchem wirowym, tworząc tzw. spiralę zewnętrzną o dużej średnicy. Następnie, w dolnej części aparatu strumień gazu zmienia swój kierunek, zaczyna wznosić się ku górze formując w pobliżu osi pionowej cyklonu tzw. spiralą wewnętrzną, o średnicy zbliżonej do średnicy kominka wylotowego. W miejscu połączenia części stożkowej z częścią cylindryczną osiowy przepływ gazu opuszczającego cyklon traci swą regularność a skok spirali wewnętrznej wyraźnie się zwiększa. Wyznaczona na rys. 3a linia przepływu pokazuje ponadto, iż przy tak dobranych parametrach prowadzenia procesu (prędkości

przepływu gazu, jego własnościach) strumień gazu wykonuje wewnątrz cyklonu około 4 pełne obiegi, co istotnie intensyfikuje skuteczność odpylania cząstek. Przedstawione na rys. 3b mapy wektorowe potwierdzają ponadto prawidłowość ukształtowania dolnej części cyklonu. Poprzez odpowiedni dobór kąta oraz średnicy stożkowego zakończenia połączonego z zasobnikiem pyłu ruch gazu w tej strefie został całkowicie zminimalizowany, a prędkości jego przepływu w zasobniku są bliskie zeru. Zebrane tam cząstki stałe nie będą zatem przedostawać się ponownie do strumienia gazu oczyszczonego, opuszczającego odpylacz.

Interesującym zjawiskiem zaobserwowanym podczas prowadzonych symulacji jest fakt występowania wysokich prędkości przepływu gazu w miejscu połączenia kanału wlotowego z częścią cylindryczną cyklonu, przewyższających wartościowo prędkość początkową gazu na wlocie do aparatu.

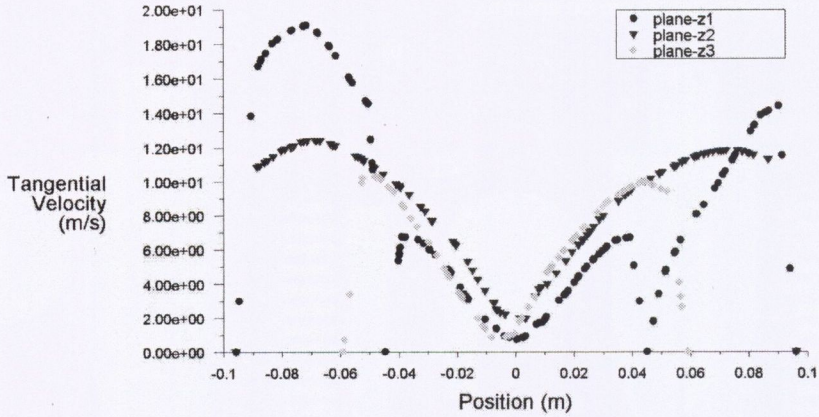


Rys. 4. Mapy konturowe prędkości gazu (m/s) w wybranych płaszczyznach przekroju cyklonu a) prędkość obwodowa b) prędkość osiowa

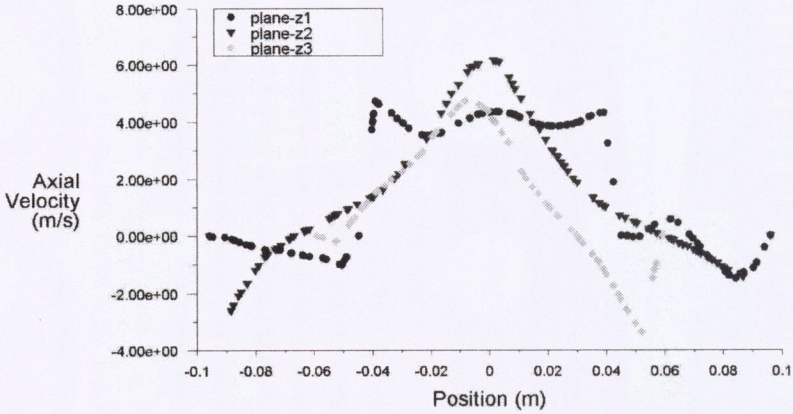
Fig. 4. Contour maps of gas velocities (m/s) for selected cyclone cutting planes a) tangential velocity b) axial velocity

Przyczynę nagłego wzrostu prędkości gazu w tym obszarze wyjaśniają dane przedstawione na rys. 4a i 5a. Strumień gazu po opuszczeniu kanału doprowadzającego napotykając na ściankę zmienia swój kierunek, zostaje odchylony i wprowadzony w silny ruch wirowy. Następuje nagłe zwężenie strugi w wyniku czego dominującą składową wektora prędkości zaczyna być wtedy składowa obwodowa, której wartość może przewyższać nawet do 30% początkową prędkość gazu na wlocie do aparatu. Intensywny, wirowy przepływ gazu w cyklonie (wysokie wartości prędkości obwodowej) widoczny jest praktycznie w całej górnej jego części, jednak nie bezpośrednio w pobliżu ścianek ale w pewnej odległości od nich (rys. 5a).

a)



b)

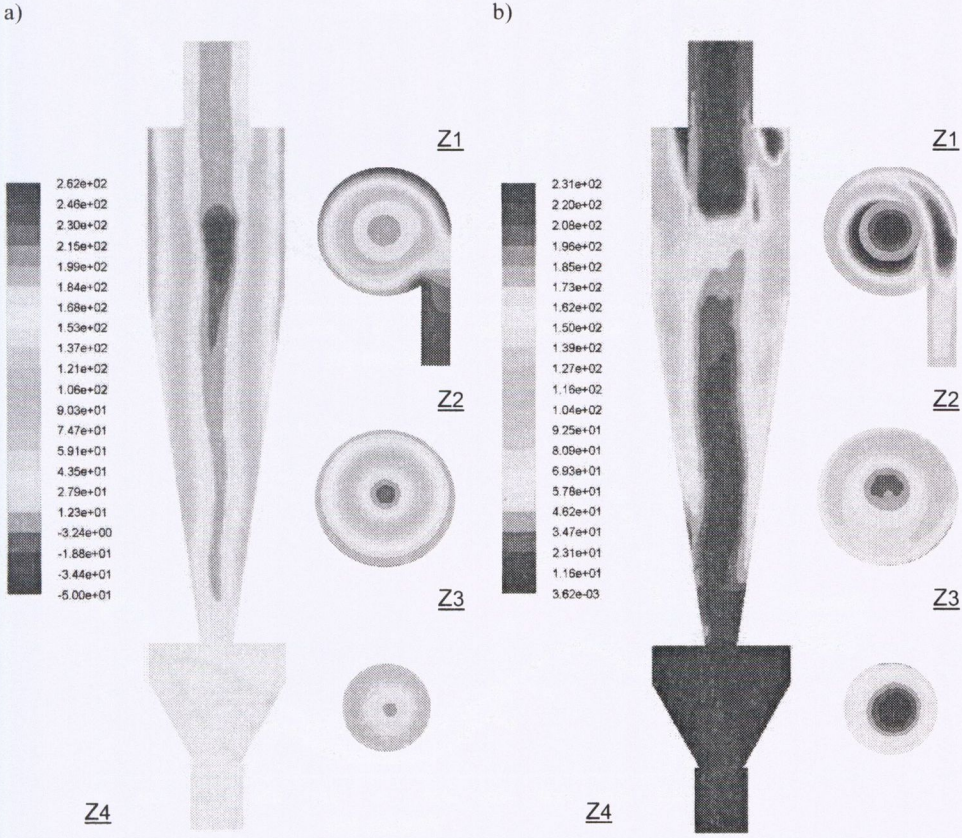


Rys. 5. Zmiany prędkości gazu wzdłuż promienia cyklonu (płaszczyzny przekroju $z_1 \div z_3$)
a) prędkość obwodowa b) prędkość osiowa

Fig. 5. Gas velocities as a function of cyclone radius (cutting planes $z_1 \div z_3$)
a) tangential velocity b) axial velocity

Opisane wyżej wyniki symulacji są zgodne z danymi prezentowanymi w pracach [2, 9, 10], gdzie promień występowania maksymalnej prędkości obwodowej oszacowano na około 2/3 całkowitego promienia cyklonu, tam też jego sprawność odpylania jest największa [2].

Inny rozkład i przebieg mają natomiast osiowe prędkości gazu (rys. 4b i 5b). Ich wysokie wartości wyznaczono bowiem nie jak poprzednio w górnej części aparatu ale we wznoszącej strudze gazu opuszczającego cyklon (rys. 4b). Intensywny przepływ osiowy widoczny jest przede wszystkim w jego środkowej części (blisko osi) praktycznie wzdłuż całej wysokości oraz w strefie wpływu gazu do kominka wylotowego. W pozostałym obszarze, bliżej ścianek osiowe składowe prędkości przyjmują znacznie niższe wartości, mają również przeciwny zwrot (wartości ujemne na rys. 5b).



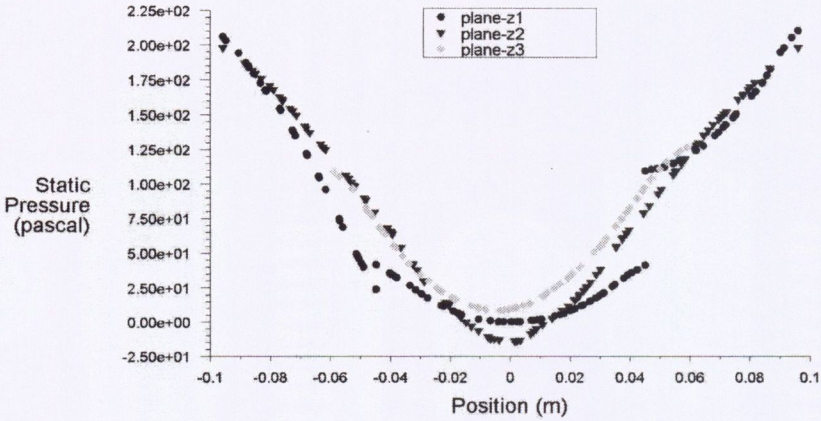
Rys. 6. Mapy konturowe ciśnienia gazu (Pa) w wybranych płaszczyznach przekroju cyklonu a) ciśnienie statyczne b) ciśnienie dynamiczne

Fig. 6. Contour maps of gas pressure (Pa) for selected cyclone cutting planes a) static pressure b) dynamic pressure

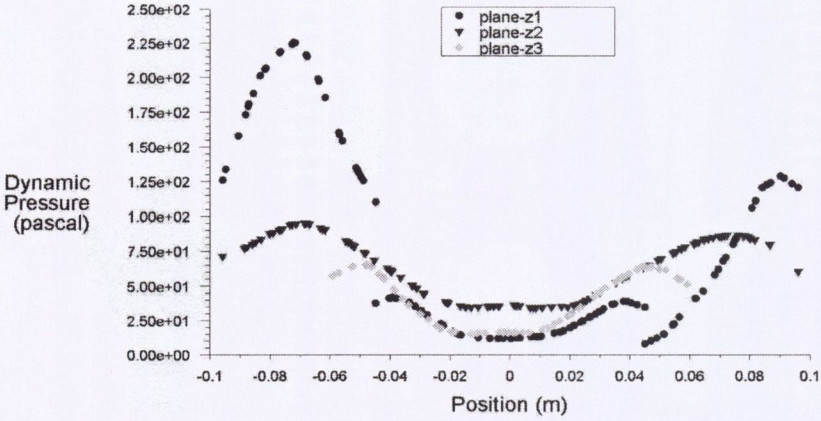
Na kolejnych rysunkach (rys. 6 i 7) pokazano zmiany ciśnień (statycznego i dynamicznego) w strumieniu przepływającego gazu. Wysokie wartości ciśnienia statycznego widoczne są w przede wszystkim w kanale doprowadzającym gaz do cyklonu, oraz w pobliżu ścianek w górnej jego części. Im bliżej osi aparatu i wylotowej strugi gazu wartości te maleją.

Ciśnienie dynamiczne ma natomiast nieco inny rozkład (rys. 6b i 7b). Najwyższe wartości przyjmuje w strefie wypływu gazu z kanału doprowadzającego (rys. 6b), nieco niższe bliżej ścianek w całej cylindrycznej części aparatu. W dolnej, stożkowej części cyklonu oraz zasobniku pyłu jego wartości są z kolei zbliżone do zera.

a)



b)



Rys. 7. Zmiany ciśnienia gazu wzdłuż promienia cyklonu (płaszczyzny przekroju $z_1 \div z_3$)
a) ciśnienie statyczne b) ciśnienie dynamiczne

Fig. 7. Gas pressure as a function of cyclone radius (cutting planes $z_1 \div z_3$)
a) static pressure b) dynamic pressure

4. Wnioski

W ramach pracy przeprowadzono komputerowe symulacje przepływu gazu w promieniowym odpylaczu cyklonowym z wlotem stycznym. Analizę wykonano w oparciu o wyniki modelowania numerycznego, wykorzystując podczas obliczeń kody numerycznej mechaniki płynów (*CFD*). Obszernie opisano kolejne etapy prowadzenia symulacji oraz zaprezentowano szczegółowe równania matematyczne dla stosowanego modelu.

Wyniki symulacji pokazują iż komputerowe pakiety obliczeniowe służące do modelowania przepływów mogą stanowić użyteczne i efektywne narzędzie, przydatne podczas projektowania i optymalizacji konstrukcji urządzeń odpylających. Istotną zaletą opisanego oprogramowania jest przede wszystkim możliwość szybkiej modyfikacji geometrii aparatu w szerokim zakresie zmienności parametrów procesowych.

Pokazane w pracy rozkłady pól prędkości i ciśnień gazu przepływającego przez cyklon mogą być ważnym uzupełnieniem złożonych i pracochłonnych badań laboratoryjnych, można je również wykorzystać na etapie projektowania i obliczeń kontrukcyjno-wytrzymałościowych jego poszczególnych elementów, oraz podczas szacowania strat ciśnienia i doboru urządzeń wymuszających przepływ zapylonego gazu.

Oznaczenia

C_μ, C_1, C_2	–	stałe w modelu burzliwości *RNG k*-ε	[–]
D	–	średnica części cylindrycznej cyklonu	[m]
G_k	–	produkcja energii kinetycznej burzliwości	[m^2/s^3]
h	–	całkowita wysokość cyklonu	[m]
k	–	energia kinetyczna burzliwości	[m^2/s^2]
p	–	ciśnienie	[Pa]
Q_{EAS}	–	Wartość kryterium *EquiAngle Skew*	[–]
S, S_{ij}	–	funkcje w modelu burzliwości *RNG k*-ε	[–]
t	–	czas	[s]
u	–	prędkość gazu na wlocie do cyklonu	[m/s]
u_i, u_i'	–	średnia i fluktuacyjna składowa prędkości gazu	[m/s]
u_r, u_t, u_z	–	promieniowa, obwodowa i osiowa składowa prędkości gazu	[m/s]
x	–	współrzędna w układzie odniesienia	[m]
$z_1 \div z_4$	–	położnie płaszczyzn przekroju cyklonu	[m]
δ_{ij}	–	delta Kroneckera	[–]
ε	–	szybkość dyssypacji energii	[m^2/s^3]
β, η, η_0	–	funkcje w modelu burzliwości *RNG k*-ε	[–]
θ_{eq}	–	kąt modelowy dla elementów czworościennych	[deg]
μ,	–	dynamiczny współczynnik lepkości gazu	[Pa·s]
μ_t	–	lepkość burzliwa	[Pa·s]
ρ	–	gęstość gazu	[kg/m^3]
σ_k, σ_ε	–	burzliwe liczby Prandtla dla k i ε	[–]

Literatura

[1] Hoffmann A. C., Stein L. E.: *Gas cyclones and swirl tubes – principles, design and operation,* Springer – Verlag, Berlin Heidelberg 2008.

[2] Warych J,: *Oczyszczanie gazów – procesy i aparatura,* WNT, Warszawa 1998.

[3] Tarleton E. S., Wakeman R. J.: *Solid/liquid separation – equipment selection and process design*, Elsevier Ltd., Oxford 2007.

[4] Lewicki P.: *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*, WNT, Warszawa 2003.

[5] Jaworski Z.: *Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej,* Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.

[6] Wójtowicz R.: *Podstawy modelowania CFD mieszalnika wibracyjnego*, Czasopismo Techniczne, 2-M, (2008), 371-384.

[7] *Gambit 2.4 User's Guide*, Fluent Inc., Lebanon 2006.

[8] *Ansys Fluent 12.0 User's Guide*, Ansys Inc., Lebanon 2009.

[9] Safikhani H., Akhavan-Behabadi M. A., Shams M., Rahimyan M. H.: *Numerial simulation of flow field in three types of standard cyclone separators*, Advanced Powder Technology, 21, (2010), 435-442.

[10] Elsayed K., Lacor Ch.: *Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations,* Chemical Engineering Science, 65, (2010), 6048-6058.