

WYKORZYSTANIE NOWOCZESNYCH TECHNIK MODELOWANIA NUMERYCZNEGO W CELU MINIMALIZACJI SPADKU CIŚNIENIA W ODPYLACZACH CYKLONOWYCH STOSOWANYCH W PROCESIE WYPALANIA KLINKIERU

Marek WASILEWSKI, Anna DUCZKOWSKA-KĄDZIEL, Jerzy DUDA

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania pakietu ANSYS Fluent, jako narzędzia służącego do modelowania numerycznego przepływów (CFD) w cyklonach, pracujących w instalacjach do wypalania klinkieru w jednej z cementowni w Polsce. Otrzymane wyniki spadku ciśnienia i rozkładu prędkości w całej przestrzeni roboczej cyklonów - również w poszczególnych jego strefach - umożliwiły szczegółową analizę zjawisk zachodzących w urządzeniu.

Słowa kluczowe: odpylacze cyklonowe, spadek ciśnienia, wypalanie klinkieru, modelowanie zjawisk cieplno-przepływowych.

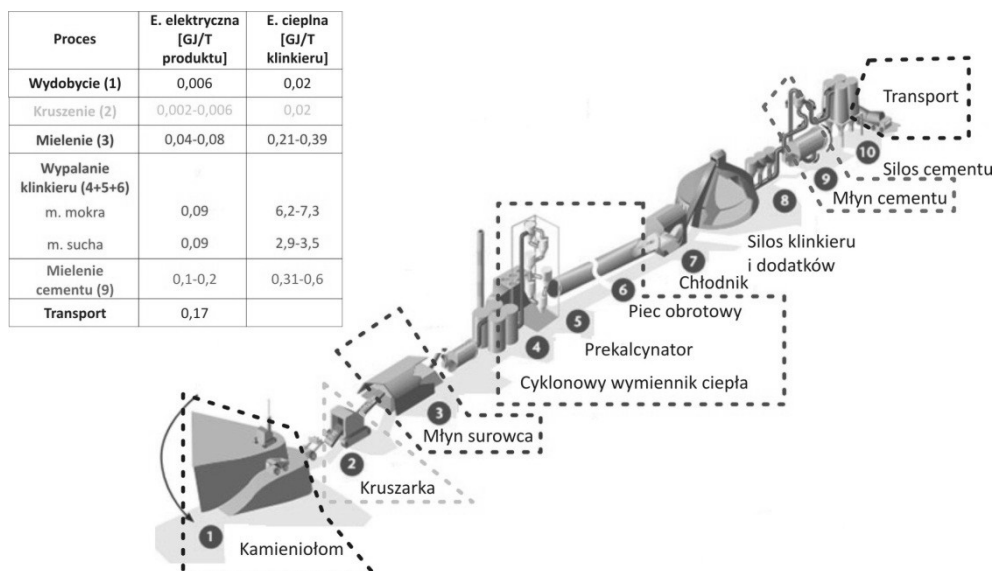
1. Wstęp

Racjonalne gospodarowanie zasobami surowców naturalnych, szczególnie na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat odgrywa znaczącą rolę w rozwoju światowego przemysłu. Dotyczy to zwłaszcza surowców energetycznych i źródeł energii. Także w przemyśle cementowym dąży się do minimalizacji energochłonności procesu wytwarzania cementu, przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności produkcji oraz zmniejszeniu szkodliwego oddziaływania na środowisko. Wynika to z faktu, iż udział kosztów samego paliwa w kosztach wytwarzania cementu jest duży. Cementownie, aby być konkurencyjnymi przedsiębiorstwami na rynku zmuszone są do poszukiwania wszelkich możliwych sposobów zmniejszania strat energii w procesie wytwarzania cementu. Biorąc pod uwagę skalę produkcji cementu, każde choćby procentowo niewielkie zmniejszenie wskaźnika jednostkowego rozchodu paliwa na produkcję cementu odgrywa znaczącą rolę.

Ponad 50% kosztów energii w procesie produkcji cementu stanowią koszty związane z wypalaniem klinkieru. W związku z tym, problem obniżenia energochłonności - kosztów produkcji, należy do podstawowych działań modernizacyjnych. Działania te dotyczą głównie konstrukcji wymiennika ciepła i chłodnika klinkieru, urządzeń współpracujących z piecem obrotowym. Konstrukcja i sprawność tych urządzeń ma duży wpływ na sprawność energetyczną procesu wytwarzania cementu i koszty inwestycyjne pieca obrotowego.

Dodatkowo etap wypalania klinkieru jest bardzo istotny ze względu na potencjalne emisje substancji szkodliwych dla środowiska oraz jakości produktu. Duży wpływ na ekonomię suchej metody produkcji cementu wywarło zastosowanie czterostopniowego cyklonowego wymiennika ciepła. Jego sprawność (odpyleniowa oraz termiczna) zależy w dużym stopniu od konstrukcji stosowanych cyklonów jak i ilości stopni oraz ma znaczący wpływ na całościową sprawność energetyczną pieca. Całkowite modyfikacje wymienników wiążą się z długotrwałym ich wyłączeniem z użyteczności i ogromnymi kosztami, w związku z tym producenci szukają alternatywnych, jak najprostszyc

usprawniających pracę przy minimalnym okresie wyłącznie z procesu.

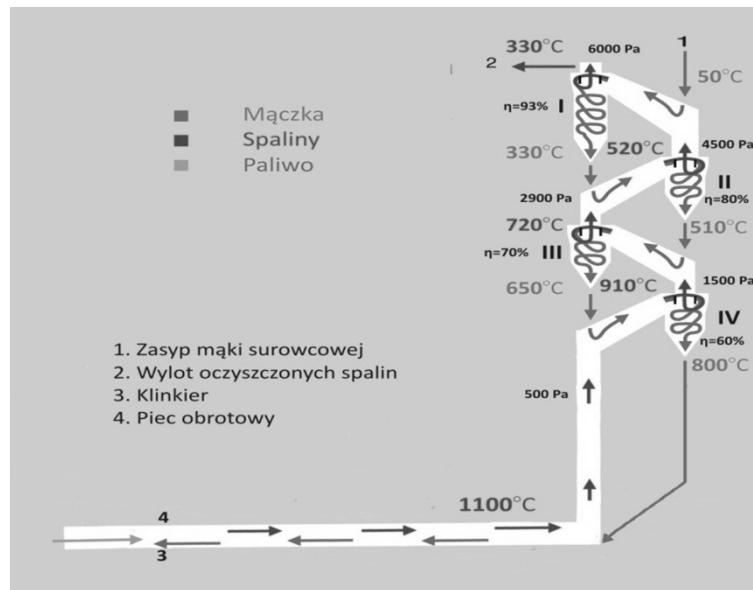


Rys. 1. Schemat produkcji cementu wraz z zużyciem energii w poszczególnych ogniwach procesu, opracowanie własne na podstawie [1]

2. Cyklonowe wymienniki ciepła

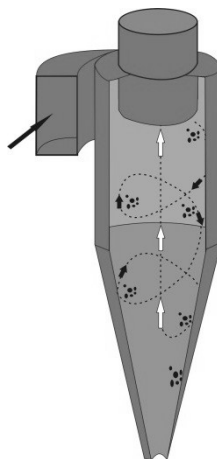
Obecnie w polskich cementowniach dominuje technologia produkcji cementu z wykorzystaniem metody suchej wypalania klinkieru w krótkich piecach obrotowych wyposażonych w zewnętrzny wielostopniowy wymiennik ciepła i kalcynator. Są to cyklonowe wymienniki ciepła (rys. 2), w których proces wymiany ciepła zachodzi w stanie zawieszenia materiału w strumieniu gorących gazów odlotowych, stąd nazwa tego systemu SP – Suspension preheater – podgrzewacz w stanie zawieszenia. Wieża wymiennikowa składa się najczęściej z 4 cyklonów (numerowanych kolejno, licząc od góry od I do IV) oraz z przewodów gazowych i przewodów transportujących surową mąkę.

Mąka surowcowa jest wprowadzana do przewodu gazowego łączącego cyklony II-go i I-go stopnia. W skutek dużej prędkości gazów z pieca przepływających przez kolejne stopnie cyklonu (15-20m/s) mąka jest porywana i trafia do cyklonu I stopnia, gdzie następuje pierwszy etap jej podgrzania. Po separacji trafia ona do rur spustowych a następnie przez wznoszące przewody gazowe trafia do cyklonu II stopnia. Proces ten jest powtarzany w kolejnych dwóch cyklonach, aż do przewodu spustowego cyklonu IV stopnia, skąd mączka trafia do pieca obrotowego. Podczas tego przepływu mąka klinkierowa ogrzewana jest spalinami przepływającymi w kierunku przeciwnym do kierunku materiału. W takich warunkach następuje intensywna wymiana ciepła, a mączka wychodząca z przewodu spustowego cyklonu IV stopnia ma temp. ok. 800-850° C (przy początkowej 50° C). Czas przejścia cząstki w czterostopniowym wymienniku ciepła o wysokości 50 m wynosi ok. 60 s., a temp. gazów odlotowych obniża się z 1000-1100 °C do 300-350 °C [2].



Rys. 2. Zasada działania cyklonowego wymiennika ciepła

Najważniejszymi elementami wieży wymiennikowej są cyklony (rys. 3). Urządzenia te są najczęściej stosowanymi odpylaczami mechanicznymi służącymi do separacji cząsteczek ciała stałego z przenoszącego je gazów w procesach przemysłowych. W porównaniu z innym urządzeniami używanymi do tych celów cieszą się one popularnością z uwagi na ich prostą konstrukcję, niewielkie koszty produkcji i utrzymania oraz możliwości dostosowania ich do najróżniejszych warunków pracy. Z drugiej jednak strony, przepływ w cyklonach jest skomplikowany, a działanie cyklonu w dużej mierze zależy od jego konstrukcji geometrycznej i warunków pracy. Głównymi parametrami określającymi pracę tych urządzeń jest spadek ciśnienia oraz skuteczność separacji cząstek. Dodatkowo w przemyśle cementowym pełnią one rolę wymienników ciepła.



Rys. 3. Zasada działania cyklonu

Biorąc pod uwagę złożoną dynamikę procesów zachodzących w cyklonach, wszelkiego rodzaju badania eksperymentalne mające na celu usprawnienie ich działania są kosztowne, oraz przede wszystkim czasochłonne. Odpowiedzią na ten problem może być model matematyczny do badania i przewidywania zachowania przepływów dla różnych konstrukcji geometrycznych cyklonów. Skutecznym narzędziem do badania charakterystyk cyklonów okazała się numeryczna mechanika płynów (Computational Fluid Dynamics – CFD).

Głównym celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości wykorzystania modelowania numerycznego wykorzystującego technikę CFD przy określaniu podstawowego parametru cechującego pracę cyklonów – spadku ciśnienia.

3. Modelowanie numeryczne przepływów z wykorzystaniem pakietu Ansys Fluent

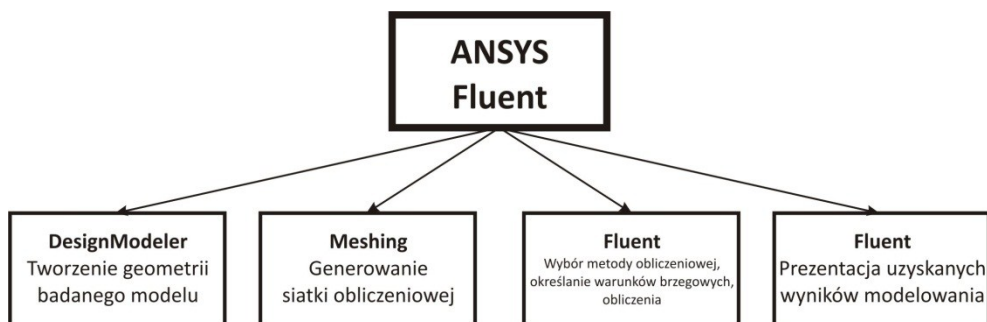
Numeryczna mechanika płynów - Computational Fluid Dynamics (CFD) jest metodą symulacji zachowania systemów, procesów i urządzeń związanych z przepływem gazów i płynów, wymiany ciepła i masy, reakcji chemicznych i innych podobnych zjawisk fizycznych. Programy CFD pozwalają uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pola ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i innych zjawisk towarzyszących (w tym reakcji chemicznych). Osiąga się to przez numeryczne rozwiązanie równań opisujących przepływ masy płynu i bilansu energii. Dzięki zastosowaniu CFD mamy możliwość przeprowadzenia szczegółowej analizy zagadnień związanych z przepływem płynów eliminując przy tym konieczność przeprowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych podczas cyklu projektowania i modernizacji urządzeń [3].

Do podstawowych zalet badań numerycznych CFD można zaliczyć:

- pełną wizualizację wyników obliczeń i projektowanego urządzenia,
- kompleksowy dostęp do potrzebnych informacji o zmiennych, które dotyczą przepływu,
- proste dokonywanie zmian konstrukcyjnych i śledzenia ich wpływu na pracę urządzenia,
- możliwość zbadania pracy urządzenia w dowolnych warunkach, które dla celów pomiarowych w warunkach laboratoryjnych jest niezwykle trudno wytworzyć lub są one niebezpieczne,
- możliwość zadania warunków idealnych.

Wraz z szybkim rozwojem technik komputerowych, dostępu do coraz to bardziej wydajnego sprzętu obliczeniowego i oprogramowania, badania CFD znajdują szerokie zastosowanie w rozwiązywaniu problemu przepływu i wymiany ciepła, w tym także zagadnień związanych z pracą cyklonów. Przykładem mogą tu być prace [4-9].

Istnieje wiele programów wspomagających modelowanie przepływów. Jednym z najbardziej rozpowszechnionych jest program ANSYS Fluent [10]. Program ten stanowi uniwersalne narzędzie numerycznej analizy zjawisk przepływów jedno- i wielofazowych, w powiązaniu z wymianą masy i ciepła oraz reakcjami chemicznymi. Przez rozwiązanie układów równań z zakresu wymiany pędu, bilansu energii i masy można uzyskać szczegółowe informacje takie jak rozkład pól prędkości i ciśnień przepływającego medium, czy ruchu ciepła i masy w modelowanym obiekcie. Pracę z tym programem można podzielić na 4 etapy (rys. 4).

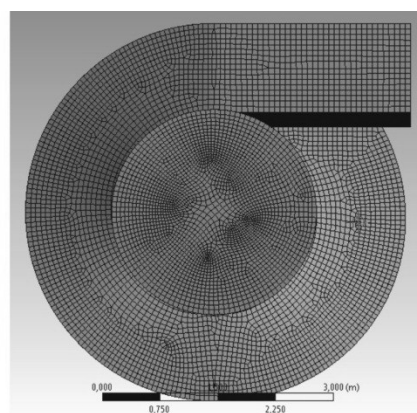
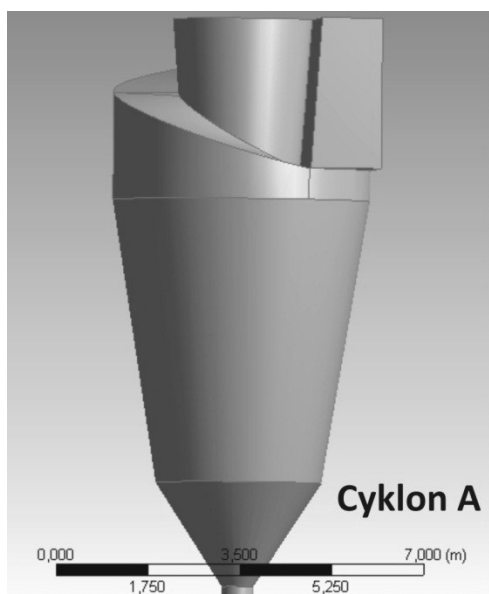


Rys. 4. Schemat pracy z pakietem ANSYS Fluent

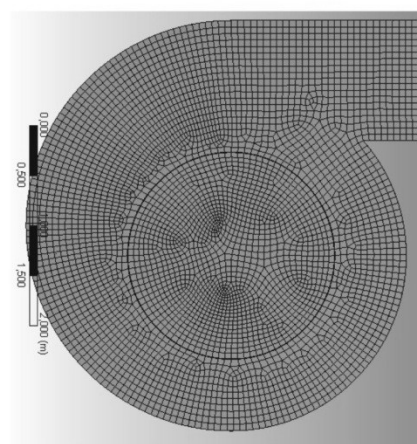
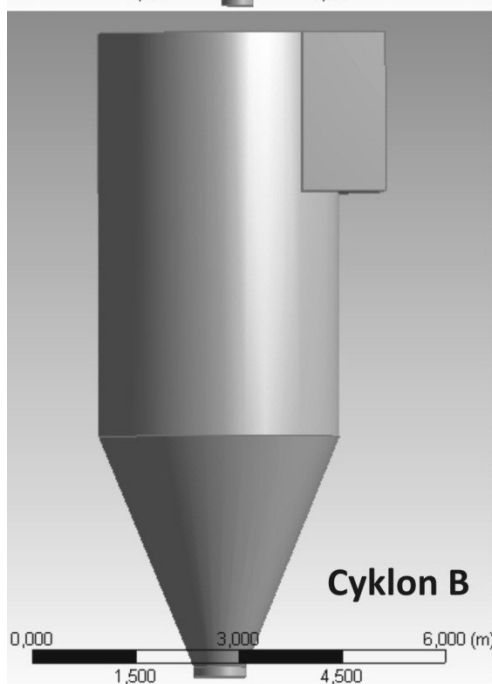
W pierwszym etapie należy stworzyć model geometryczny. W zależności od poziomu złożoności badanego modelu, oraz wyników jakie chcemy otrzymać model może być w postaci płaskiej 2D lub przestrzennej 3D. Następnie należy dokonać generacji siatki obliczeniowej. Polega to na podziale modelu na elementy – dyskretyzacji. Siatka jest jednym z najważniejszych etapów pracy nad modelowaniem numerycznym. Jej gęstość oraz gradient określa dokładność obliczeniową i czas, po którym dochodzi do rozwiązania. Siatka powinna być najgęstsza w tych miejscach, gdzie będzie dochodzić do wymiany masy, ciepła, ruchów turbulentnych, nagłych zmian kierunku przepływu strumieni itp. Te dwa etapy zalicza się do preprocessingu. W kolejnym etapie należy określić warunki brzegowe oraz dokonać wyboru metody obliczeniowej. Dokonuje się tego w solverze Fluent. Podobnie w tym programie dokonuje się obliczeń i prezentacji wyników (postprocessing). Zwykle, tworzone są mapy i wykresy przedstawiające zmiany obliczanych wielkości zarówno w modelowanym obszarze jak i – w przypadku procesów nieustalonych - w czasie.

4. Analiza spadku ciśnienia w cyklonach I stopnia

Celem badań była analiza wpływu prędkości wlotowej do cyklonu oraz ich konstrukcji na spadek ciśnienia w tym urządzeniu. Badaniom poddane zostały dwa cyklony I stopnia pracujące w jednej z cementowni w Polsce. Każdy z nich jest elementem cyklonowych wymienników ciepła dwóch osobnych linii produkcyjnych. Do analizy wykorzystano pakiet ANSYS Fluent 14.0. Pracę rozpoczęto od stworzenia trójwymiarowych modeli geometrycznych odpowiadających konstrukcji w/w cyklonów (ze względu na geometrię aparatów zastosowano solver trójwymiarowy) [11]. Na rys. 5 przedstawione zostały modele 3D. Następnie zaimportowano modele do programu Ansys Meshing i dokonano ich dyskretyzacji. Siatka numeryczna posiadała komórki o kształcie heksagonalnym i zmienną gęstość w zależności od strefy aparatu (największa w strefie wlotu i wylotu z cyklonu, najmniejsza w częściach stożkowych). Sumaryczna ilość komórek wahała się w zależności od przypadku cyklonu pomiędzy 450 000 (cyklon A) a 380 000 (cyklon B). Była to minimalna ilość komórek, przy której nie stwierdzono znaczącego wpływu wzrostu gęstości siatki na wynik końcowy. Zdefiniowano domenę obliczeniową o geometrii identycznej z urządzeniami wchodzącymi w skład instalacji do wypalania klinkieru. Symulacje przeprowadzone były w domenie obliczeniowej odpowiadającej pełnej geometrii symulowanego problemu, tzn. bez wprowadzania płaszczyzn symetrii.



Przykład dyskretyzacji obszaru obliczeniowego cyklonu A



Przykład dyskretyzacji obszaru obliczeniowego cyklonu B

Rys. 5. Modele 3D cyklonów A i B wraz z przykładem dyskretyzacji wybranych płaszczyzn obszarów badawczych

Obliczenia numeryczne bazują na zasadach zachowania masy, pędu i energii oraz wybranego typu hipotez domykających, dobranych przez badacza lub wybranych spośród bazy danych zaimplementowanej w programie. Na podstawie analizy literatury

fachowej do obliczeń wybrano model naprężeń Reynoldsa. W tym przypadku równanie zachowania pędu przybiera postać równania Reynoldsa (RSM) [12].

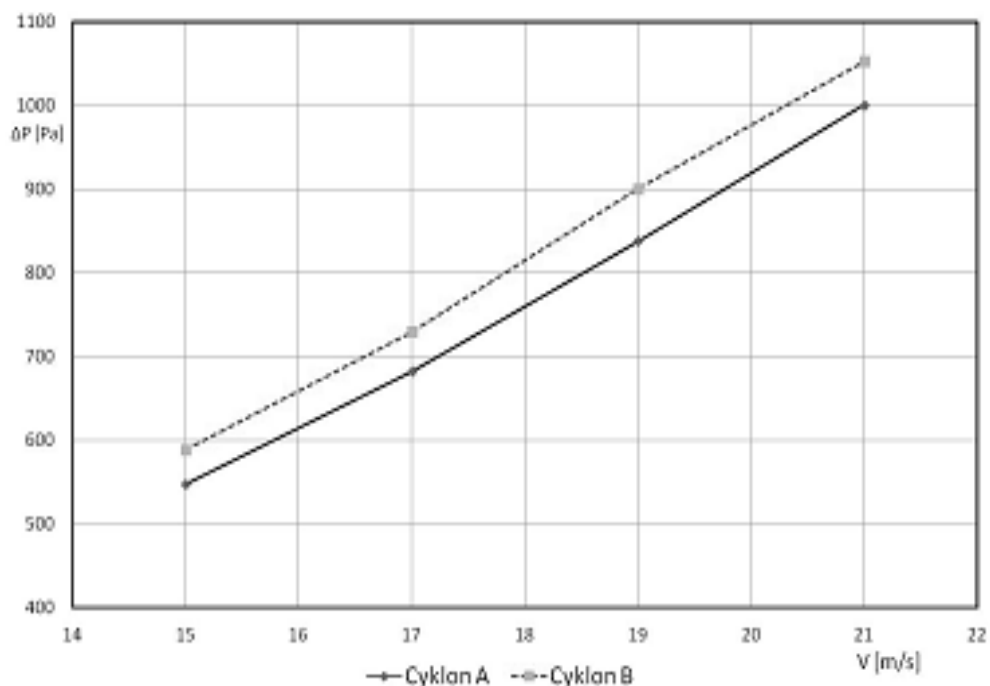
Własności fizyczne płynu zdefiniowano jako mieszaninę o następującym składzie chemicznym: 64% N₂, 29% CO₂ oraz 7% O₂.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń sporządzono wykres (rys. 6). Przedstawiono na nim wpływ prędkości wlotowej na spadek ciśnienia w cyklonach A i B. Spadek ciśnienia określono, jako różnicę średniego ciśnienia statycznego na wlocie i wylocie z urządzenia. Otrzymane wyniki są zbieżne z podstawami teoretycznymi, zgodnie z którymi spadek ciśnienia cyklonu jest proporcjonalny do kwadratu prędkości wlotowej i można go zapisać w następujący sposób:

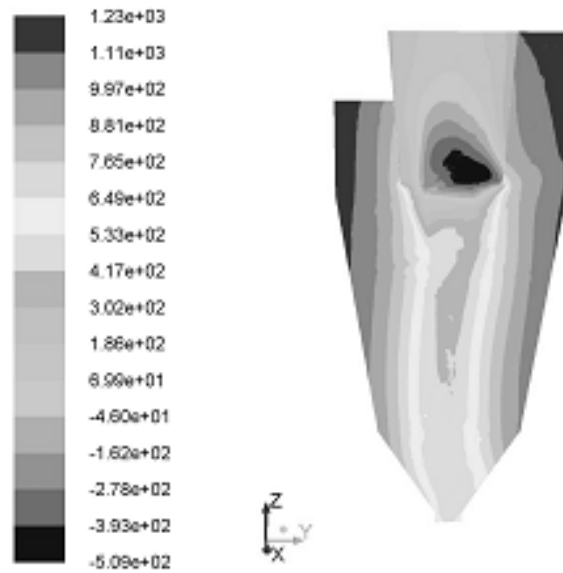
$$\Delta P = \beta \frac{\rho_g v_{in}^2}{2} \quad (1)$$

gdzie: β , ρ_g oraz v_{in} oznaczają kolejno współczynnik spadku ciśnienia, gęstość gazu i prędkość wlotową. Pokazuje to, że spadek ciśnienia w każdym przypadku wzrasta z prędkością wlotową.

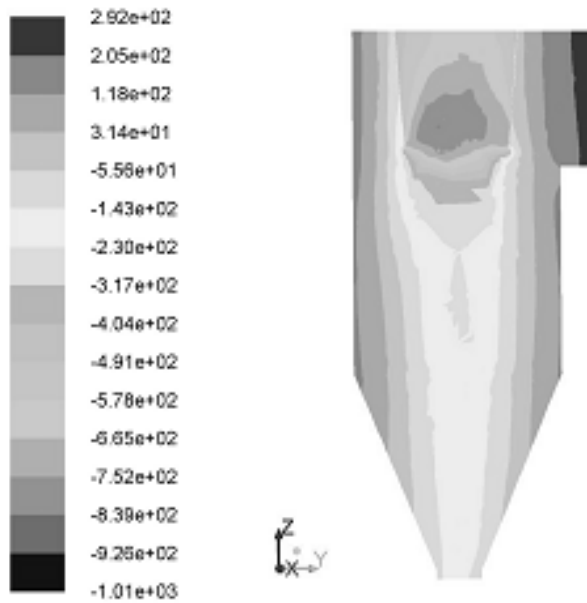
Z kolei na rysunku 7 przedstawiono przykładowe rozkłady ciśnień statycznych w przekrojach wzdłużnych cyklonów. Dla obu cyklonów strefa niskiego ciśnienia wydaje się być w centrum urządzenia. Ciśnienie statyczne wzrasta w kierunku promieniowym od centrum cyklonu do jego ściany.



Rys. 6. Charakterystyka spadku ciśnienia w zależności od prędkości wlotowej



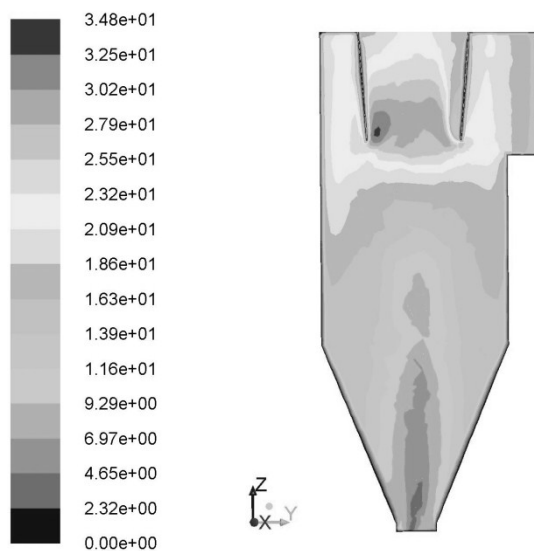
Contours of Static Pressure (pascal)



Contours of Static Pressure (pascal)

Rys. 7. Przykładowy rozkład ciśnienia statycznego w przekroju wzdłużnym cyklonów A i B

Aby lepiej zrozumieć zachowanie przepływu w środku cyklonu na rysunku 8 przedstawiono kontury prędkości, wygenerowane za pomocą obliczeń modelem RSM. Zobaczyć możemy, że prędkość przepływu wewnętrznego wzdłuż linii środkowej zwiększa się od dołu do góry cyklonu. Prędkość wlotowa znacząco wpływa na liczbę obrotów w wirze wewnętrznym, zaś jej wpływ na wir zewnętrzny jest mniej znaczący. Co więcej, długość wiru i przepływ wsteczny zwiększają się wraz z prędkością wlotową.



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Rys. 8. Przykładowe kontury prędkości w cyklonie B

5. Wnioski

Wyniki analizy numerycznej przypyłów w cyklonie potwierdzają skuteczność pakietu ANSYS Fluent, jako narzędzia umożliwiającego lepsze zrozumienie istoty problemu oraz umożliwia badanie wzajemnych zależności pomiędzy parametrami występującymi w danej symulacji. Dużą zaletą metod numerycznych jest skrócenie czasu uzyskania wyników oraz przekazywanie informacji o rozkładzie wszystkich wielkości fizycznych w całym obszarze przepływu. Ponadto, analiza numeryczna daje możliwość wizualizacji, planowania i budowy stanowisk pomiarowych, które pozwolą uzyskiwać bardziej dokładne wyniki.

Co więcej, wyniki modelowania wykazały, że model RSM stanowi bardzo obiecujące narzędzie w zrozumieniu zachowania przepływu oraz wpływu rozmiaru cyklonu na jego parametry wydajności. Kluczowe znaczenie ma dobór odpowiedniej siatki obliczeniowej, modelu obliczeniowego oraz określenie warunków brzegowych.

W dalszym etapie prac przewiduje się:

- wprowadzenie do cyklonów cząstek CaCO_3 , w celu określenia najważniejszych czynników wpływających na skuteczność odpylania urządzenia,
- podjęcie prób mających na celu modyfikację ukształtowania charakterystycznych elementów cyklonów w celu minimalizacji spadku ciśnienia i skuteczności separacji cząstek ciała stałego.

Literatura

1. Worelle E., Price L., Martin N., Hendriks Ch., Ozawa M.L.: Carbon dioxide emission from cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 26, 2001, s. 303-329.
2. Duda J.: Badania izotopowe przepływu materiału w nowoczesnym piecu obrotowym pracującym metodą suchą. *Prace IMMB nr 13/94*, s. 105-112.
3. Hoang M. L., Verboven P., De Baerdemaeker J.: Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. *International Journal of Refrigeration*, vol. 23, 2000, s. 127-140.
4. Safikhani H., et al.: Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators. *Adv. Powder Technology*, vol. 21, 2010, s. 435-442.
5. Raoufi A., Shams M., Farzaneh M., Ebrahimi R.: Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder. *Chem. Eng. Process*, vol. 47, 2008, s. 128-137.
6. Qiana F., Wu Y.: Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone. *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, 2009, s. 1567-1572.
7. Wydrych J., Dobrowolski B.: Aerodynamic conditions of the erosion process in the cyclone separators. XIX Polish National Fluid Dynamics Conference KKMP 2010, Poznan 2010.
8. Kozołub P., Adamczyk W., Białecki R., Węcel G.: Numerical estimation of the particle collection efficiency of a cyclone separator. XX Polish Fluid Mechanics Conference, Gliwice 2012.
9. Dobrowolski B., Skulska M., Wydrych, J.: Numerical modelling of erosion wear of components of cyclone separators. *Archiwum Energetyki*, vol. 38 (2), 2008, s. 63-70.
10. Fluent User's Guide:
www1.ansys.com/customer/content/documentation/120/fluent/flwb.pdf (16.01.2013).
11. Duda J., Wasilewski M.: Influence construction of suspension preheater on energy consumption process during burning in rotary kiln. *Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2012*, A. Stachel and D. Mikielewicz (Editors), Wydawnictwo Uczelniane ZUT w Szczecinie, 2012, s. 431-438
12. Ferziger J.H., Peric M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer 1999.

Dr hab. inż. Jerzy Duda, prof. PO
Dr Anna Duczkowska-Kądziel
Mgr inż. Marek Wasilewski
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Politechnika Opolska
45-370 Opole, ul. Ozimska 75
tel./fax: (0-77) 423 40 44
e-mail: j.duda@po.opole.pl
a.duczowska-kadziel@po.opole.pl
m.wasilewski@po.opole.pl