

Tadeusz MALCHER

e-mail: malcher@agh.edu.pl

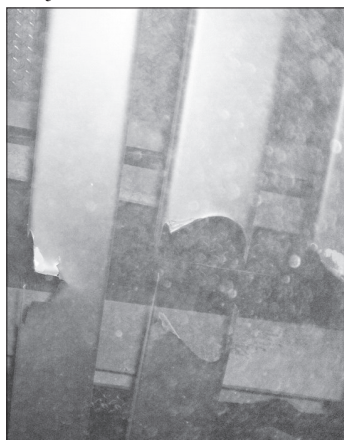
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## Metoda symulacji numerycznej jako narzędzie do przewidywania erozji w instalacjach przemysłowych

### Wstęp

Erozja materiału, powstająca na skutek jego wycierania pod wpływem uderzających cząstek stałych, ma miejsce szczególnie tam, gdzie występuje przepływ wielofazowy (gaz – ciało stałe). Jest ona przyczyną wielu awarii urządzeń przemysłowych [Graham i in., 2010; Shah i in., 2008]. Już na etapie ich projektowania jest wiadomo, że to niekorzystne zjawisko będzie im towarzyszyć [Mbabazi i Sheer, 2006; Parslow i in., 1999]. Dlatego też ich konstrukcja jest specjalnie wzmocniana poprzez nadatki materiału lub przez materiał trudnościeralny.

Jednym z przykładów takich urządzeń jest elektrofiltr. Gaz w postaci spalin, jak i cząstki ciała stałego w postaci popiołu pochodzą głównie ze spalania węgla w kotle elektrociepłowni. Ich mieszanina przepływa przez kanały doprowadzające do elektrofiltru, często agresywnie oddziałując na otoczenie. Z czasem ubytki są tak duże, że materiał ulega pełnemu wytarci. W obudowie kanałów pojawiają się otwory, przez które zasysane jest powietrze z zewnątrz, powodując zmniejszenie ciągu wentylatora wymuszającego przepływ. Z kolei częściowy zanik elementów kierujących w postaci łopatek na skutek wytarcia, prowadzi do nierównomiernego rozdziału przepływającego strumienia w przekroju poprzecznym całego układu, co sprzyja nasileniu samego zjawiska erozji.



Rys. 1. Przykład przetartych elementów kierujących w dyfuzorze

Zdarza się również, że wytarci ulegają elementy wzmocniające konstrukcję nośną. Wszystko to obniża sprawność elektrofiltru oraz bezpieczeństwo pracy osób obsługujących to urządzenie.

Nie zawsze jednak da się przewidzieć gdzie i jak intensywna będzie erozja. Zastosowanie metody numerycznej w postaci oprogramowania CFD [Manickham i in., 1999; Skodras i in., 2006; Chen i in., 2004] do przewidywania zjawiska erozji w różnego rodzaju układach, może być pomocnym w odpowiedzi na to pytanie.

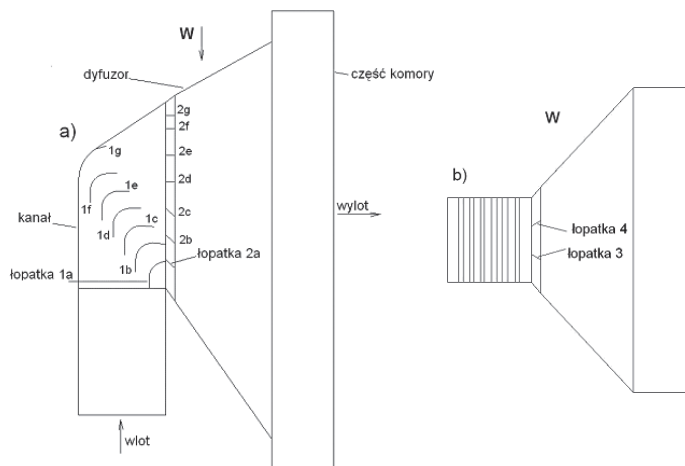
Celem komputerowej symulacji było wykrycie rejonów najbardziej narażonych na erozję, podanie przyczyn ich powstawania oraz ilościowe oszacowanie zjawiska.

### Opis modelu geometrycznego

Geometria rozpatrywanego układu składała się z trzech podstawowych części: kanału doprowadzającego zapyłony gaz, dyfuzora i część komory odpylającej elektrofiltru. Kanał składał się z krótkiego prostego odcinka wlotowego oraz kolana połączonego z dyfuzorem. W geometrii uwzględniono również część komory elektrofiltru.

Aby zapewnić równomierny rozkład prędkości gazu w przekroju poprzecznym kanału, w części kolanowej zastosowano szereg elementów kierujących, w postaci łopatek łukowych (łopatki nr 1). Z kolei, w celu równomiernego rozkładu gazu [Idelcik i in., 1974] przed jego wlotem na elektrody elektrofiltru, w dyfuzorze zastosowano szereg łopatek poziomych i poziomo – skośnych (łopatki nr 2) oraz dwie łopatki pionowo-skośne (łopatki nr 3 i 4). Całość zobrażona została na rys. 2.

W pracy wprowadzono dodatkowe nazewnictwo dotyczące orientacji elementów kierujących – strona wewnętrzna łopatki oznacza jej widok



Rys. 2. Model geometryczny rozpatrywanego układu

z dołu, strona zewnętrzna jej widok z góry (analogicznie do tego czy parzący stoi pod czy nad elektrofiltrem). Dla celów obliczeniowych, opisaną powyżej geometrię wykonano w programie typu CAD, a następnie odwzorowano poprzez podział na objętości skończone, wykonując tzw. siatkovanie za pomocą programu *Workbench*. Nanosząc warunki brzegowe przyjęto zerową grubość wszystkich ścianek w całej konstrukcji. Tak przygotowany układ poddano weryfikacji numerycznej, używając programu CFX.

### Modelowanie erozji

Erozję materiału obliczono na podstawie wzoru zaproponowanego przez *Finniego* [1960]:

$$E = kV_p^n f(\gamma) \quad (1)$$

$$f(\gamma) = \frac{1}{3} \cos^2 \gamma \quad \text{jeżeli} \quad \tan \gamma > \frac{1}{3} \quad (2)$$

$$f(\gamma) = \sin(2\gamma) - 3 \sin^2 \gamma \quad \text{jeżeli} \quad \tan \gamma \leq \frac{1}{3} \quad (3)$$

gdzie:

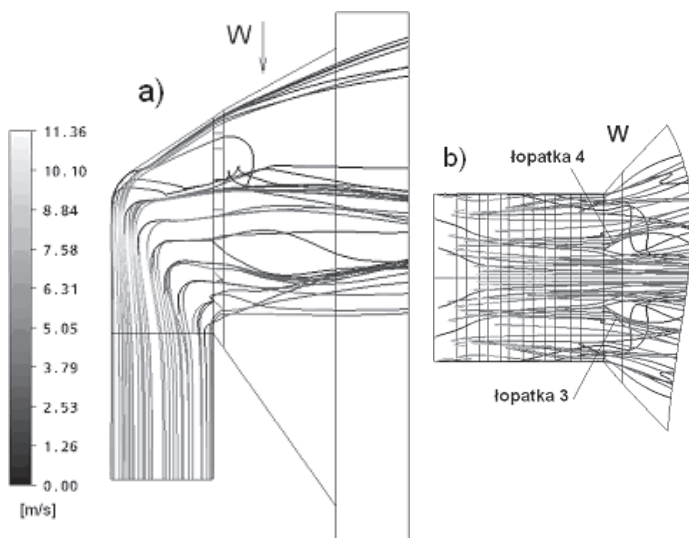
- $V_p$  – prędkość uderzającej cząstki
- $\gamma$  – kąt, pod jakim cząstka uderza w materiał
- $k$  – stała zależna od rodzaju erodującego materiału
- $n$  – współczynnik wyznaczany doświadczalnie
- $f$  – funkcja bezwymiarowa

### Opis symulacji

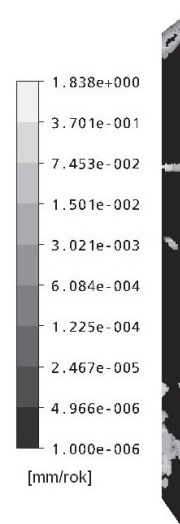
Cząsteczki pyłu (Rys. 3a) w początkowej fazie przepływu natrafiają na część kolanową konstrukcji. Łopatki łukowe zmieniają kierunek ich lotu przejmując większą część strumienia gazu. Następnym etapem reakcji pomiędzy łopatkami a pyłem można zaobserwować w postaci erozji, głównie na wewnętrznych powierzchniach łopatek (Rys. 4).

Pozostała część strumienia, przepływając wzdłuż tylnej ścianki kanału wlotowego, zmienia swój kierunek dopiero na zewnętrznej części kolana. Przesuwając się po niej w kierunku wylotu, wyciera jej ściankę wewnętrzną (obudowę), również powodując powstawanie erozji (Rys. 5).

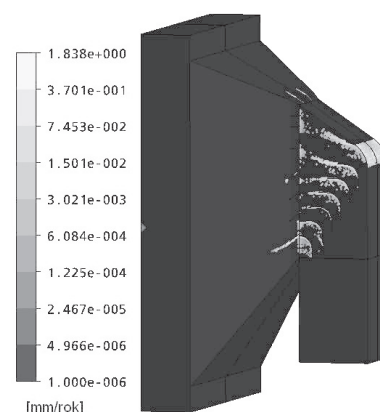
Po wyjściu z zakrzywionych łopatek kolana, cząstki pyłu przejmowane są przez łopatki dyfuzora, których zadaniem jest dalsze równomierne rozprowadzanie poszczególnych strug. Nie wszystkie łopatki zaprojekt-



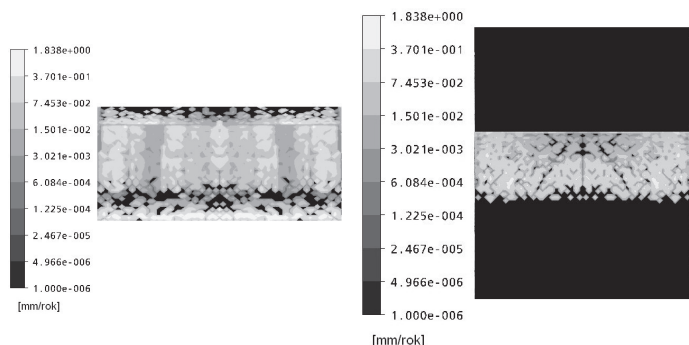
Rys. 3. Torry lotu cząstek pyłu [m/s]



Rys. 7. Erozja w [mm/rok] na łopatkach 3 i 4 (strona zewnętrzna)



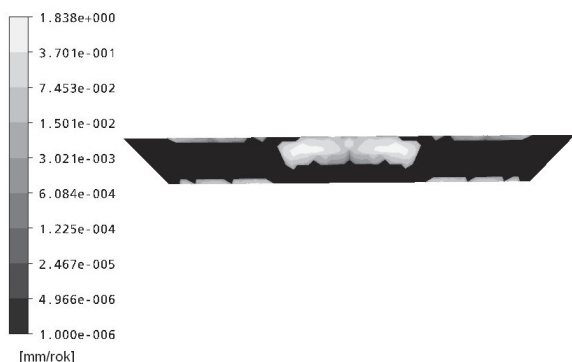
Rys. 8. Erozja w [mm/rok] na obudowie całego układu



Rys. 4. Erozja w [mm/rok] na łopatkach 1b (strona wewnętrzna)

Rys. 5. Erozja w [mm/rok] w kanale dolotowym – część kolanowa

owane w tej części konstrukcji należycie spełniają swoje zadanie. Wyraźnie widać, że jedna z nich (łopatka 2c, Rys. 3a) nadmiernie ingeruje w strugę, zbyt mocno odchylając ją od kierunku poziomego. Jest to również przyczyną znacznej erozji (Rys. 6). Nieznaczne odchylenie łopatki 2e ku górze (Rys. 3a) spowodowałoby zanik wirów, jakie powstają bezpośrednio w jej sąsiedztwie i z pewnością poprawiłoby dystrybucję cząstek w dyfuzorze. Podobną, lecz zamierzoną ingerencję w strumień wykazują łopatki 3 i 4 dyfuzora, których zadaniem jest równomierne rozprowadzanie gazu na lewą i prawą stronę układu (Rys. 3b).



Rys. 6. Erozja w [mm/rok] na łopatkach 2c (strona wewnętrzna)

Znaczące kontury erozji (Rys. 7) określają także miejsca przelotu poszczególnych strug pyłu. Widok erozji na obudowie całego układu został przedstawiony na rys. 8. Łatwo można zauważyć, że wszędzie tam, gdzie poruszające się cząstki ciała stałego zmieniają kierunek ruchu pod

wpływem elementów kierujących lub pod wpływem zmiennego kształtu geometrii, na obudowie dostarcz można ślady erozji. Z każdego miejsca, gdzie występują elementy kierujące, dla pokazania erozji wybrano tylko jedną łopatkę taką, na której erozja była największa. Jednostka [mm/rok], w jakiej wyświetlana jest erozja to mm wytartego materiału przypadające na okres czasu powstawania erozji odniesiony do jednego roku.

## Wnioski

Analiza przeprowadzonej symulacji komputerowej to sposób na weryfikację geometrii pod kątem destrukcyjnego działania erozji.

Każdą geometrię rozpatrywanego układu, przed wykonaniem jej w rzeczywistości jako obiektu przemysłowego, można zweryfikować przedstawionym przez autora sposobem, a naddatki materiału lub materiał o podwyższonej odporności na ścieranie zastosować tam, gdzie erozja jest znacząca. Dotyczy to głównie instalacji, w których ma miejsce przepływ wielofazowy z udziałem cząstek ciała stałego, agresywnie oddziaływujących na otoczenie (np. urządzenia odpylające, urządzenia transportujące w sposób pneumatyczny materiały sypkie itp.)

## LITERATURA

- Chen X., McLaury B.S., Shirazi S.A., 2004. Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees. *Computers & Fluids*, **33**, 1251–1272. DOI: 10.1016/j.compfluid.2004.02.003
- Finnie I., 1960. Erosion of surface by solid particles. *Wear*, **3**, 87–103.
- Graham L.J.W., Lester D.R., WU J., 2010. Quantification of erosion distributions in complex geometries. *Wear*, **268**, 1066–1071. DOI: 10.1016/j.wear.2010.01.011
- Manickam M., Schwarz M.P., McIntosh M.J., 1999. *CFD analysis of erosion of bifurcation duct walls*. Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, 6–8 December 1999, 243–248.
- Mbabazi J.G., Sheer T.J., 2006. Computational prediction of erosion of air heater elements by fly ash particles. *Wear*, **261**, 1322–1336. DOI: 10.1016/j.wear.2006.03.017
- Parslow G.I., Stephenson D.J., Strutt J.E., Tetlow S., 1999. Investigation of solid particle erosion in components of complex geometry. *Wear*, **233–235**, 737–745. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00194-5
- Shan S.N., Jain S., 2008. Coiled tubing erosion during hydraulic fracturing slurry flow. *Wear*, **264**, 279–290. DOI: 10.1016/j.wear.2007.03.016
- Skodras G., Kaldis S.P., Sofialidis D., Faltsi O., Grammelis P., Sakellariopoulos G.P., 2006. Particulate removal via electrostatic precipitators — CFD simulation. *Fuel Process. Tech.*, **87**, 623–631. DOI: 10.1016/j.fuproc.2006.01.012