

**Krzysztof KOŁODZIEJCZYK**

e-mail: krkolodz@agh.edu.pl

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

**Symulacje numeryczne procesu sedymentacji w laboratoryjnym osadniku wielostrumieniowym****Wstęp**

Proces sedymentacji oraz osadniki znajdują zastosowanie w układach oczyszczania wody od ponad dwóch wieków i mają różne konstrukcje [Kowalski, 2004a]. Rozwiązania polegające na stosowaniu wypełnienia wielostrumieniowego, w których wykorzystuje się efekt *Boycota*, szeroko wdrażane końcem ubiegłego wieku w postaci wypełnienia części przestrzeni sedymentacyjnej osadników konwencjonalnych pakietami wkładów wielostrumieniowych, coraz częściej wykorzystuje się w konstrukcji osadników kompaktowych. Ich kształt i rozmiary uzależnione są od zastosowanego wypełnienia wielostrumieniowego, które wypełnia przestrzeń sedymentacyjną najczęściej w pełnym jej zakresie [Kowalski i in., 2004].

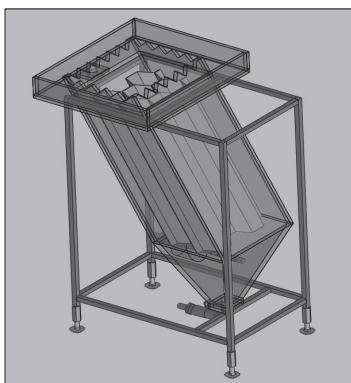
Bardzo istotnym elementem w konstrukcji osadnika jest także zaprojektowanie układu doprowadzenia zawiesiny i jej odbioru, aby przestrzeń sedymentacyjna była obciążona w równomierny sposób niezależnie od obciążenia powierzchniowego osadnika [Kołodziejczyk, 2008].

Poprawne rozwiązanie konstrukcyjne osadnika w dużej mierze uzależnione było od doświadczenia projektanta. Dostępność metod numerycznych wydaje się rozwiązywać ten problem, jednak w przypadku modelowania układów wielofazowych, szczególnie układów z bardzo dużą różnicą udziałów objętościowych fazy dyspersyjnej uzyskiwane wyniki w bardzo dużym stopniu odbiegają od wartości, które występują w układach rzeczywistych.

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań związanych z modelowaniem pracy laboratoryjnego osadnika wielostrumieniowego. Dotyczy one symulacji numerycznej przepływu wykonanej w pakiecie oprogramowania *ANSYS CFX* oraz porównania wyników procesu sedymentacji realizowanego w laboratorium z wynikami symulacji numerycznej. Omówione zostaną aktualne możliwości prowadzenia analizy pracy osadnika na podstawie symulacji numerycznych CFD.

**Model geometryczny osadnika**

Symulacje numeryczne oraz badania laboratoryjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem laboratoryjnego kompaktowego osadnika wielostrumieniowego przedstawionego na rys. 1. Osadnik posiada wypełnienie wielostrumieniowe o przekroju plastra miodu, którego powierzchnia sedymentacji łącznie z powierzchnią zabudowy wynosi  $500 \text{ cm}^2$ . Osadnik jest przeznaczony do pracy w układzie sedymentacji przeciwwprądowej.



Rys. 1. Kompaktowy laboratoryjny osadnik wielostrumieniowy przeciwwprądowy z wypełnieniem o przekroju plastra miodu

**Modele numeryczne wykorzystywane w symulacji procesu sedymentacji**

Analizy przedstawione w niniejszym opracowaniu zostały wykonane w module CFX pakietu obliczeniowego ANSYS. W obliczeniach przepływu zostały wykorzystane modele przepływu turbulentnego k- $\epsilon$  oraz SST [Bowen, 1976]. Natomiast w obliczeniach układu wielofazowego został wykorzystany Particle model – należący do modeli klasy *Euler-Euler*. Zastosowanie tego modelu było podyktowane tym, iż pozwala

na symulację zawiesiny o dowolnym stężeniu, co w przypadku analizy pracy osadnika jest niezwykle istotne, gdyż w większości przypadków w osadniku będą występowały zarówno obszary o bardzo niskim stężeniu jak i o bardzo wysokim.

**Modelowanie procesu sedymentacji w osadniku**

Podstawowym zadaniem do zrealizowania w symulacji numerycznej procesu sedymentacji jest uzyskanie pełnej zgodności wyników symulacji z wynikami z układu rzeczywistego. Aby to osiągnąć należałoby zamodelować układ w jak największym stopniu zgodny z układem rzeczywistym. Niestety ze względu na ograniczone możliwości techniczne, parametry modeli numerycznych do modelowania układów wielofazowych, zmuszają do realizacji symulacji numerycznych w układach uproszczonych. Jednym z takich uproszczeń jest modyfikacja składu ziarnowego fazy dyspersyjnej zawiesiny. W układach rzeczywistych frakcja dyspersyjna zawiesiny najczęściej posiada polidispersyjny skład ziarnowy [Kowalski, 2004b].

Odwzorowanie w pełni polidispersyjnego charakteru zawiesiny w symulacjach numerycznych w oparciu o modele klasy *Euler-Euler* niestety nie jest możliwe. Najczęściej zastępuje się polidispersyjny skład ziarnowy o składzie opisanym histogramem zawierającym od kilku do kilkunastu, a maksymalnie kilkudziesięciu frakcji o ściśle określonych rozmiarach ziaren.

Skrainym uproszczeniem jest próba wykonania symulacji numerycznej zawiesiny o składzie polidispersyjnym z wykorzystaniem modelu numerycznego zawiesiny monodispersyjnej. Tak daleko idące uproszczenie z całą pewnością nie przyniesie oczekiwanego rezultatu w układach o niskim stężeniu, czyli takich gdzie występuje sedymentacja swobodna. Natomiast nieco inaczej będzie w układach o wysokim stężeniu, w których występuje sedymentacja skrapowana, strefowa, gdzie nie występuje opadanie pojedynczego ziarna, a jedynie opadanie warstwy ziaren. Zastosowanie w takich układach monodispersyjnego modelu numerycznego zawiesiny, przy odpowiedniej walidacji modelu, pozwala mieć nadzieję na uzyskanie wyniku zbliżonego do wyników uzyskiwanych w układach rzeczywistych.

**Symulacje numeryczne procesu sedymentacji zawiesiny monodispersyjnej**

Symulacje numeryczne pracy laboratoryjnego osadnika wielostrumieniowego zostały wykonane dla obciążenia powierzchniowego  $q = 0,5 \text{ m/h}$ . Powierzchnia sedymentacji tego osadnika to  $F_{sed} = 500 \text{ cm}^2$  co w efekcie daje strumień nadawy podawanej do osadnika wynoszący  $Q_N = 416,66 \text{ cm}^3/\text{min}$ . W symulacjach założono, iż wylew będzie odbierany na poziomie 10% strumienia nadawy, w związku z czym strumień przelewu będzie wynosił  $Q_p = 375 \text{ cm}^3/\text{min}$ , a wylewu  $Q_w = 41,66 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

W modelowaniu procesu sedymentacji przyjęto koncepcję, iż pierwszym etapem będzie wykonanie symulacji numerycznej przepływu wody przez osadnik, a dopiero w drugim etapie włączenie przepływu zawiesiny. Taka koncepcja skraca czas obliczeń, gdyż pozwala na uzyskanie poprawnie rozwiązanej przepływu dla jednej fazy, co jest związane ze znacznie niższym zapotrzebowaniem na moc obliczeniową oraz może być realizowana jako symulacja stała w czasie. W symulacjach został wykorzystany model numeryczny osadnika składający się z 660 tys. elementów tetrahedra. Warunki brzegowe określono poprzez przypisanie do wejścia osadnika (nadawy) prędkości przepływu zawiesiny, która wyliczona na podstawie strumienia zawiesiny i przekroju rurocią-

gu wynosiła  $V_N = 18,579$  cm/s, w analogiczny sposób określono prędkości przepływu dla wyjść z osadnika: w przelewie prędkość przepływu wynosiła  $V_p = 1,268$  cm/s, w wylewie  $V_w = 0,1574$  cm/s. Obliczenia przepływu zostały wykonane z zastosowaniem modelu turbulencji  $k-\epsilon$ .

Po uzyskaniu rozwiązania dla przepływu jednofazowego zostały wykonane symulacje numeryczne procesu sedymentacji, w których przyjęto uzyskany rozkład prędkości w osadniku jako warunek początkowy rozkładu prędkości w symulacjach procesu sedymentacji. W symulacjach dodatkowo zakładano początkową wartość stężenia zawiesiny w komorze osadnika równą zero. W obliczeniach wykorzystano *Particle Model* należący do modeli klasy *E-E* z modelem turbulencji  $k-\epsilon$ . Symulacja była prowadzona jako zmienna w czasie z krokiem czasowym  $t = 0,5 \div 5$  s.

Obliczenia prowadzono dla zawiesiny z procesu flotacyjnego wzbogacania rud miedzi. Dla tej zawiesiny w analizowanym osadniku wykonano pomiar procesu sedymentacji w warunkach laboratoryjnych. Pomiar ten przeprowadzono w celu porównania wyników symulacji numerycznej z układem rzeczywistym. Dla obciążenia powierzchniowego  $0,5$  m/h i stężenia nadawy  $S_n = 24,8$  kg/m<sup>3</sup> uzyskano stężenie zawiesiny w przelewie  $S_p = 0,296$  kg/m<sup>3</sup> oraz stężenie wylewu  $S_w = 220$  kg/m<sup>3</sup>.

Natomiast w tab. 1 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla układu dwufazowego z monodispersyjną fazą dyskretną. W pierwszych symulacjach średnica ziaren fazy dyspersyjnej została przyjęta jako średnica ziarna podziałowego, która wynosiła  $d = 22$   $\mu\text{m}$  – wyliczona na podstawie parametrów  $m$  i  $\sigma$  (składu ziarnowego przy założeniu log-normalnego rozkładu wielkości ziaren). Udział objętościowy fazy dyspersyjnej na wejściu do osadnika wynosił  $\alpha = 0,01$  (wyliczony na podstawie gęstości części stałej zawiesiny która wynosiła  $2700$  kg/m<sup>3</sup> oraz stężenia zawiesiny które wynosiło  $27$  kg/m<sup>3</sup>).

Z wyników zamieszczonych w tab. 1 wynika, iż niezależnie od parametrów symulacji w każdym przypadku uzyskuje się stężenie w przelewie na poziomie  $10^{-5}$  kg/m<sup>3</sup>, a wartość ta jest na granicy błędów obliczeń numerycznych i w znacznym stopniu odbiega od wartości uzyskanych w laboratorium. W symulacjach z ustawionym ziarnem fazy dyspersyjnej wynoszącym  $22$   $\mu\text{m}$  już po 20 minutach procesu sedymentacji stężenie w wylewie jest wyższe niż w badaniach laboratoryjnych i wynosi  $253$  kg/m<sup>3</sup>, a po 29 minutach dochodzi do  $340$  kg/m<sup>3</sup> znacznie powyżej stężenia uzyskanego w badaniach laboratoryjnych.

Tab. 1. Wyniki symulacji numerycznych procesu sedymentacji dla różnych średnic ziarna fazy dyspersyjnej

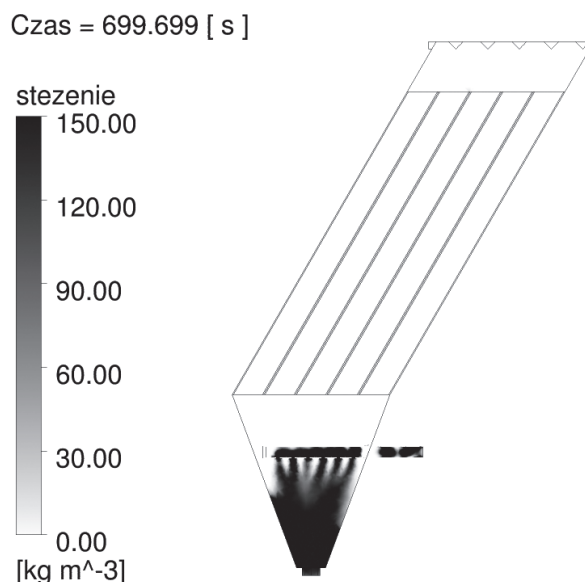
Średnica ziaren fazy dyspersyjnej	Czas procesu sedymentacji	Stężenie		
		Nadawa	Przelew	Wylew
[ $\mu\text{m}$ ]	[min]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
22	9,6	27,00	$0,241 \cdot 10^{-5}$	40.6049
22	19,8	27,00	$0,300 \cdot 10^{-5}$	253.179
22	28,9	27,00	$0,394 \cdot 10^{-5}$	339.612
18	41,9	27,00	$0,404 \cdot 10^{-5}$	347.126
15	12,9	27,00	$0,618 \cdot 10^{-5}$	162.873
15	106,3	27,00	$2,161 \cdot 10^{-5}$	328.017

W związku z tym zostały wykonane symulacje numeryczne ze zmniejszoną średnicą ziarna podziałowego wynoszącą odpowiednio  $18$  i  $15$   $\mu\text{m}$ . Niestety również te zmiany nie przyniosły oczekiwanego rezultatu. W przypadku układu z ziarnami o rozmiarach  $18$   $\mu\text{m}$  po 42 minutach uzyskano stężenie w wylewie  $347$  kg/m<sup>3</sup>, a dla układu z ziarnami o rozmiarach  $15$   $\mu\text{m}$  po 106 minutach uzyskano stężenie w wylewie  $328$  kg/m<sup>3</sup>. Istnieje pewne prawdopodobieństwo, iż przy odpowiednio małym ziarnie fazy dyspersyjnej możliwe byłoby uzyskanie odpowiedniego stężenia w wylewie, niemniej jednak wciąż pozostaje niezgodność stężeń w przelewie.

### Symulacje numeryczne procesu sedymentacji zawiesiny poldispersyjnej

W związku z brakiem zgodności obliczeń numerycznych przeprowadzonych dla zawiesiny monodispersyjnej z wynikami badania labora-

toryjnego została wykonana symulacja numeryczna zawiesiny składającej się z dwóch faz dyspersyjnych o rozmiarach ziaren odpowiednio  $5$   $\mu\text{m}$  i  $15$   $\mu\text{m}$ , każda z udziałem  $50\%$ . Po 9,5 min. procesu sedymentacji w wylewie uzyskano stężenie zawiesiny  $110$  kg/m<sup>3</sup>, a w przelewie  $2,03 \cdot 10^{-4}$  kg/m<sup>3</sup>. Natomiast po 11,5 min. procesu sedymentacji uzyskano w wylewie stężenie zawiesiny  $106$  kg/m<sup>3</sup>, a w przelewie  $1,5 \cdot 10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>. Z zamieszczonego na rys. 2 rozkładu stężenia jednoznacznie wynika, iż cały strumień doprowadzonej frakcji dyspersyjnej jest odbierany w wylewie, co w znacznym stopniu odbiega od procesu sedymentacji w układzie rzeczywistym.



Rys. 2. Rozkład stężenia zawiesiny w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez środek osadnika

### Wnioski

Symulacje numeryczne procesu sedymentacji wydają się być bardzo wygodnym narzędziem w procesie projektowania osadnika, jednak na obecnym etapie istnieją bardzo istotne powody uniemożliwiające efektywne wykorzystanie modelowania układów wielofazowych w praktyce.

Aktualnie nie ma możliwości przeprowadzenia wiarygodnych obliczeń numerycznych procesu sedymentacji bez wcześniejszej walidacji modelu numerycznego na podstawie badań laboratoryjnych.

Obliczenia układów wielofazowych charakteryzują się bardzo dużym zapotrzebowaniem mocy obliczeniowej oraz bardzo długimi czasami obliczeń, zatem stają się znacznie mniej dostępnym narzędziem niż np. obliczenia przepływów jednofazowych lub obliczenia wytrzymałościowe.

Brak ściśle określonej metodyki symulacji układu wielofazowego, mnogość dostępnych modeli oraz elementów dodatkowych modeli, przy jednoczesnym bardzo dużym rozrzucie uzyskiwanych wyników, czyni metody numeryczne w tym zakresie bardzo trudnym narzędziem w rękę potencjalnego inżyniera.

### LITERATURA

- Bowen R.M., 1976. *Theory of Mixtures* [w:] Eringen A.C. (Ed.) Continuum Physics, str. 1-127. Academic Press, New York.
- Kołodziejczyk K., 2008. The Numerical simulation of flow and sedimentation process in sedimentation system. *Polish Journal of Environmental Studies*, 17, nr 3A, 298-302
- Kowalski W.P., 2004a. *Osadniki wielostrumieniowe*. Wyd. AGH, Kraków
- Kowalski W.P., 2004b. Investigation of fine grains distribution using the sedimentation analysis. *J. Mat. Proc. Tech.*, 157-158, 561-565. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.147
- Kowalski W.P., Banaś M., Kołodziejczyk K., Mięso R., Zacharz T., 2004. *The application of lamella sedimentation devices in purifying of water and water wastes*. Wyd. AGH, Kraków (ISBN 8389388138)