

## Witold SUCHECKI

e-mail: [suchecki@pw.plock.pl](mailto:suchecki@pw.plock.pl)

Zakład Aparatury Przemysłowej, Instytut Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Warszawska, Filia w Plocku

# Wyznaczanie krzywej dynamiki sedymentacji z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej

## Wstęp

Sedymentacja zawiesin jest procesem, który znajduje duże zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu i ochronie środowiska naturalnego. Sedymentacja, czyli zjawisko zakłóconego opadania cząstek ciała stałego w cieczy, służy do zagęszczania zawiesiny pod wpływem działania pola grawitacyjnego. Proces ten jest wykorzystywany w przemyśle do zagęszczania zawiesin w aparatach zwanych osadnikami, w procesie klarowania (w uzdatnianiu i odnowie wody) oraz klasyfikacji (w przeróbce mineralnej). Tradycyjne osadniki są wykorzystywane w komunalnych oczyszczalniach ścieków, w stacjach uzdatniania wody, zakładach przemysłowych (m.in. w procesach technologicznych: przeróbki celulozy, syntezy chemicznej, garbarniach, hutnictwie, przeróbki kopaliny, itp.).

Prawidłowe obliczenie pojemności, powierzchni i głębokości osadnika wymaga znajomości krzywej sedymentacji. Wyznacza się ją zazwyczaj wykonując tzw. test sedymentacyjny zawiesiny [Bandrowski *et al.*, 2001], polegający na obserwacji zachowania się zawiesiny w przezroczystym zbiorniku. Często występuje jednak sytuacja, gdy granice między strefami mogą być nierozróżnialne, a taki stan dotyczy zwłaszcza granicy między osadem a zawiesiną. Powoduje to niepewności w wyznaczonej krzywej sedymentacji, które próbuje się rozwiązać przeprowadzając dodatkowe badania zawiesiny o takim samym stężeniu, lecz o innych wysokościach początkowych słupa zawiesiny. W ten sposób można otrzymać kilka dodatkowych krzywych sedymentacji, a tym samym kilka różnych punktów krytycznych. Przez połączenie linią kolejnych punktów krytycznych można wyznaczyć krzywą narastania osadu.

Wyznaczanie krzywej sedymentacji ma istotne znaczenie w przypadku monitorowania pracy hydroelektrowni i planowania jej prac konserwatorskich. Przykładem może być opisany przez Ndomba *et al.* [2008] problem monitorowania osadów, pobierania próbek i wyznaczania krzywej sedymentacji w górnym dorzeczu Panganii w północno-wschodniej części Tanzanii.

Próbę pomiaru profili prędkości osadów w zbiorniku, za pomocą Ultrasonic Doppler Velocity Profiler (Metflow SA, UVP-DUO) podjęli Kantoush *et al.* [2006]. Dzięki zastosowaniu trzech sond pomiarowych uzyskali pola przepływu 3D.

W innej pracy Kantoush *et al.* [2008] przeprowadzili symulacje numeryczne w płytkich zbiornikach i otrzymane wyniki sprawdzili pod kątem ich zgodności z przepływami w rzeczywistych warunkach przepływu oraz wzorcami sedymentacji. Zbadali wpływ geometrii zbiornika na transport osadów i osadzanie, numerycznie i eksperymentalnie, koncentrując się na głębokości zbiornika prototypowego. W swoich badaniach wykorzystali metodę PIV.

Capart *et al.* [1997] wykorzystali metody wizualizacyjne w uzyskaniu charakterystyk laboratoryjnych kinematyki interakcji woda-osad. Opracowali specjalny algorytm identyfikacji cząstek w celu identyfikacji gęsto upakowanych cząstek. Miał on umożliwić zastosowanie metody śledzenia cząstek (DPTV).

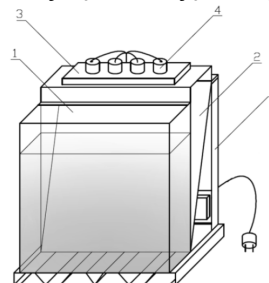
Weryfikację doświadczalną symulacji numerycznych sedymentacji granulowanych osadów z wykorzystaniem laserowego skanera trójwymiarowego (3D-scanner) i metody PIV przedstawili González *et al.* [2008]. Badania doświadczalne przeprowadzili w Szkole Inżynierii Ładowej Uniwersytetu w La Coruña (Hiszpania). Na ich podstawie pozytywnie zweryfikowali model numeryczny. Ponadto stwierdzili, że techniki wizualizacyjne są obiecującymi narzędziami w badaniu hydraulicznym, szczególnie technika 3D-skaner.

W niniejszej pracy zaproponowano nową metodę badania procesu sedymentacji polegającą na wyznaczeniu krzywej dynamiki sedymentacji z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej. Zamiast klasycznego testu sedymentacji w przezroczystym cylindrze, zaproponowano badanie w płaskim naczyniu prostopadłościennym, z wykorzystaniem wizualizacyjnej techniki DPIV.

## Badania doświadczalne

**Stanowisko badawcze** przedstawiono schematycznie na rys. 1. Sedymentacja odbywała się w szklanym zbiorniku, którego tylna ściana wykonana została z matowanego szkła, w celu lepszego rozproszenia światła. Do równomiernego oświetlenia wykorzystano 4 żarówki halogenowe oraz dodatkową powierzchnię odbijającą światło (Rys.1, poz. 2).

**Materiały.** Badano sedymentację cząstek agalitu o gęstości  $2540 \text{ kg/m}^3$  i średnicy  $0,9 \text{ mm}$  w glicerynie o koncentracji  $90\%$ , gęstości  $1235 \text{ kg/m}^3$  i lepkości kinematycznej  $187 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Badania wykonano dla czterech udziałów objętościowych cząstek agalitu w glicerynie (zwanych dalej stężeniem objętościowym):  $0,5\%$ ,  $1\%$ ,  $1,5\%$  i  $2\%$ .

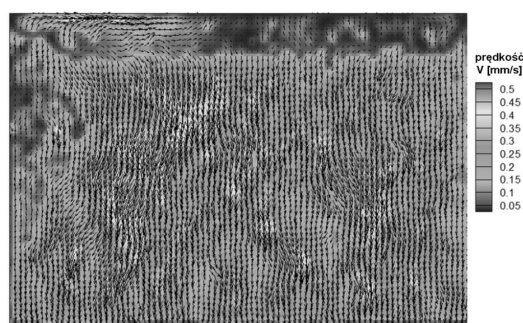


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – zbiornik, 2 – powierzchnia odbijająca światło, 3 – obudowa, 4 – halogeny z oprawami

**Metodyka.** Zbiornik o wymiarach  $300 \times 300 \times 50 \text{ mm}$  wypełniano gliceryną. Następnie wsypywano odmierzoną, w zależności od badanego stężenia objętościowego, porcję cząstek agalitu i mieszano zawiesinę. Po wymieszaniu rejestrowano obrazy sedymentujących cząstek aparatem Canon EOS 50D w seriach co 2 sekundy, a każda seria rozpoczynała się co minutę. Zarejestrowane obrazy posłużyły do wyznaczenia pól prędkości cząstek agalitu w glicerynie metodą DPIV.

## Przetwarzanie danych pomiarowych

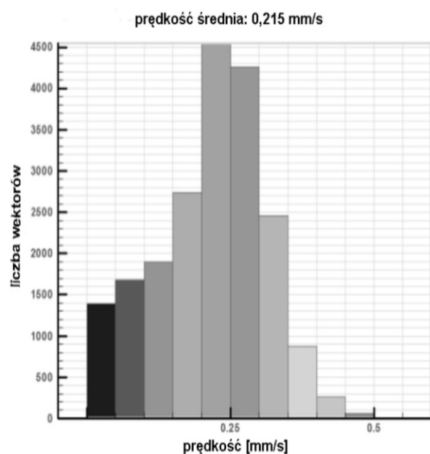
Przykładowy rozkład pola prędkości cząstek agalitu w glicerynie dla stężenia objętościowego  $0,5\%$ , po 60 sekundach sedymentacji, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Rozkład pola prędkości cząstek agalitu w glicerynie dla stężenia objętościowego  $0,5\%$  po 60 sekundach sedymentacji. Na wykresie umieszczono mapy prędkości wyznaczone metodą średniej kwadratowej wraz z legendą

Zarejestrowane w formacie RAW obrazy konwertowano do formatu BMP 8-bit. Następnie wyznaczano wykresy wektorowe pól prędkości z wykorzystaniem metody DPIV [Willert, 1991; Westerweel, 1993; Suchecki, 2000]. Otrzymane pola prędkości poddawano filtrowaniu za pomocą własnego programu [Suchecki i Alabrudziński, 2003] w celu usunięcia błędnych wektorów lub zastąpienia ich średnimi z wektorów sąsiadujących. Następnie wykorzystując histogram wektorowego pola prędkości (Rys. 3), wyznaczono prędkość średnią dla każdego wykresu

poła prędkości. Wyznaczona prędkość średnia dotyczyła konkretnej chwili i wyznaczana była dla całego obszaru pomiarowego.



Rys. 3. Histogram wykresu pól prędkości cząstek agalitu w glicerynie dla stężenia 0,5% po 60 sekundach sedimentacji

## Przykładowe wyniki i dyskusja

Na podstawie prędkości średnich, dla każdego pola prędkości, wyznaczono wykresy krzywych dynamiki sedimentacji w czasie. W klasycznym teście sedimentacyjny wyznacza się położenie górnej granicy nieciągłości zawiesiny w czasie. W zaproponowanej, nowej metodzie, krzywa dynamiki sedimentacji oznacza zmianę średniej prędkości opadania cząstek zawiesiny w czasie.

Na rys. 4. przedstawiono przykładowe krzywe dynamiki sedimentacji wyznaczone metodą prędkości średniej, dla różnych stężeń objętościowych cząstek agalitu w glicerynie. Krzywe te obrazują wpływ stężenia objętościowego cząstek agalitu w glicerynie na zmianę prędkości średniej sedimentujących cząstek w czasie.

Analizując wyniki badań można zauważyć, że nawet niewielki wzrost stężenia objętościowego cząstek agalitu w glicerynie, miał znaczący wpływ na prędkość średnią ich sedimentacji. Zgodnie z rys. 4 dla stężenia objętościowego od 1% do 2% obserwowano podobieństwo kształtu krzywych dynamiki sedimentacji. Dla wyższych stężeń objętościowych występowała większa średnia prędkość opadania cząstek. W początkowym okresie sedimentacji średnia prędkość sedimentujących cząstek była największa i do ok. 40 sekundy procesu znacznie malała. Miało to związek ze wzajemnym oddziaływaniem opadających cząstek na siebie, tworzeniem śladów hydrodynamicznych, w których poruszały się cząstki. Po tym czasie zmiana prędkości średniej cząstek stawała się bardziej wyrównana. Wynikało to z faktu, że znaczna część cząstek opadła na dno zbiornika, a opadały jedynie cząstki nieliczne.

Dla stężenia objętościowego cząstek 0,5% zmiana prędkości średniej w czasie była znacznie mniejsza. Wynikało to ze znacznie mniejszego

oddziaływania cząstek na siebie oraz znacznie mniejszego wpływu śladu hydrodynamicznego na prędkości opadających cząstek.

## Podsumowanie i wnioski

Zaproponowana metoda wyznaczenia krzywych dynamiki sedimentacji zawiesiny z wykorzystaniem prędkości średniej cząstek zawiesiny została opracowana w *Laboratorium Wizualizacji Przepływów*. Polega ona na wyznaczeniu pól prędkości cząstek zawiesiny metodą DPIV, a następnie wyznaczeniu wykresów średnich prędkości w czasie, w oparciu o prędkości średnie cząstek. Prędkość średnią cząstek wyznaczano wykorzystując histogram wektorowego pola prędkości.

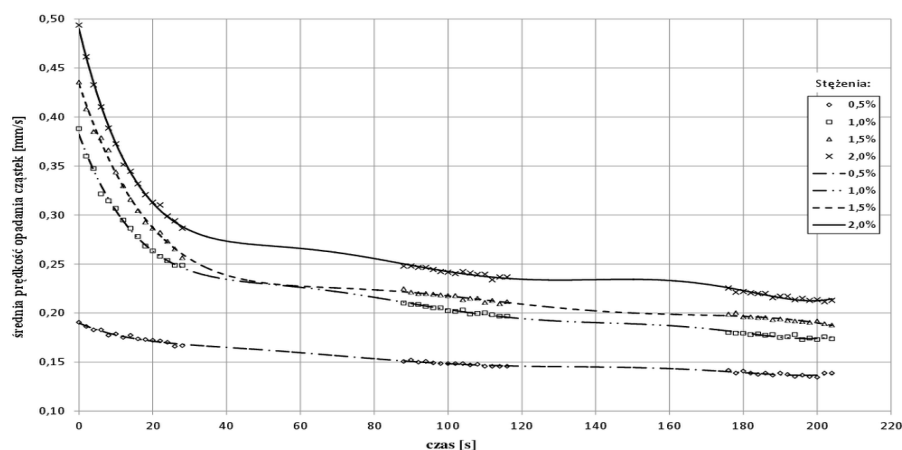
Zasadniczy wpływ na otrzymane wyniki, czyli dokładność wyznaczenia krzywej dynamiki sedimentacji miała jakość otrzymanych obrazów. Wpływało na nią wiele czynników, m.in. oświetlenie, pęcherzyki powietrza, mieszanie zawiesiny. Stwierdzono, że:

- dobre oświetlenie obszaru badanego odgrywa kluczową rolę w badaniach metodą wizualizacyjną. Zastosowanie halogenów oraz matowej powierzchni do oświetlenia tylnej ściany zbiornika daje możliwość lepszego zarejestrowania opadania cząstek agalitu w glicerynie, co przekłada się na dokładność otrzymanych wyników;
- skuteczne wyeliminowanie pęcherzyków powietrza, które znajdują się na ściankach zbiornika oraz w zawieszynie ma duży wpływ na otrzymane wyniki. Pęcherzyki mogą zostać rozpoznane jako cząstki ciała stałego, a tym samym wprowadzać błędne informacje.

Zastosowanie metody DPIV dla całego obszaru sedimentacji zwiększa dokładność wyznaczenia krzywej dynamiki sedimentacji. Możliwa jest również pełna automatyzacja pomiaru, co w przypadku badań zawiesin o zmiennym stężeniu objętościowym cząstek ciała stałego, może znacząco poprawić dokładność wyznaczenia np. krzywej osadów w dłuższym okresie czasu (np. w okresie jednego roku hydrologicznego).

## LITERATURA

- Bandrowski J., Merta H., Ziolo J., (2001). *Sedimentacja zawiesin. Zasady i projektowanie*. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice
- Capart H., Liu H.H., Van Crombrugge X., Young D.L., 1997. Digital imaging characterization of the kinematics of water-sediment interaction. *Water, Air, Soil Poll.*, 99, 173-177. DOI: 10.1023/A:1018305004205
- González E.P., Marqués J.F., Sánchez-Tembleque Díaz-Pache F., Puertas Agudo J., Gómez L.C., 2008. Experimental validation of a sediment transport two-dimensional depth-averaged numerical model using PIV and 3D Scanning technologies. *J. Hydr. Res.*, 46, 489-503. DOI: 10.3826/jhr.2008.2737
- Kantoush S.A., Bollaert E., Boillat J.-L., A.J. Schleiss, Uijtewaal W.S.J., 2006. *Experimental study of suspended sediment transport and deposition in a rectangular shallow reservoir* [in:] Ferreira M.L., Alves E., Leal J., Cardoso A. (Eds), River Flow. Taylor & Francis, London
- Kantoush S.A., Bollaert E., Schleiss A.J., 2008. Experimental and numerical modelling of sedimentation in a rectangular shallow basin. *Int. J. Sedim. Res.*, 23, 212-232. DOI: 10.1016/S1001-6279(08)60020-7
- Ndomba P.M., Mtalo F.W., Killingtveit Å., 2008. Developing an excellent sediment rating curve from one hydrological year sampling programme data: approach. *J. Urban . Env. Eng.*, 2, 21-27. DOI: 0.4090/juee.2008.v2n1.021027
- Sucecki W., 2000. Wykorzystanie cyfrowej anemometrii do wizualizacji przepływu cząstek stałych w cieczy. *Zesz. Nauk. Pol. Opolskiej*, 60, Mech. 254, 319-326
- Sucecki W., Alabrudziński S., 2003. Metoda korekty wykresów pól prędkości w cyfrowej anemometrii obrazowej. *Inż. Ap. Chem.*, 42(3), 14-20
- Westerweel J., 1993. *Digital particle image velocimetry - theory and application*. Delft, Delft University Press
- Willert C.E., Gharib M., 1991. Digital particle image velocimetry. *Exp. in Fluids*, 10, 181-193. DOI: 10.1007/BF00190388



Rys. 4. Wpływ stężenia objętościowego cząstek agalitu w glicerynie na zmianę ich prędkości średniej w czasie (Krzywe dynamiki sedimentacji)