

	Organizatorzy: Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKĲ ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Badania struktury i charakterystyki przepływu płaskiej strugi wodnej i wodno-ścierniej

The research of the structure and flow characteristics of water- and abrasive-water fan jet

PRZEMYSŁAW BORKOWSKI
SEIJI SHIMIZU
GUOYI PENG
YASUYUKI OGUMA *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.340

W referacie zaprezentowano istotne aspekty badań struktury i charakterystyki przepływu płaskiej strugi wodnej i wodno-ścierniej wytwarzanej w dyszy szczelinowej. Badania takie przeprowadzane w Nihon University w Japonii, metodą prześwietlania takiej strugi suspensyjnej przy użyciu techniki laserowej (PIV), pozwalają na wyodrębnienie zachowań poszczególnych jej składników w strefie erozji oraz określenie rozkładów prędkości cząstek materiału ściernego.

SŁOWA KLUCZOWE: wysokociśnieniowa struga wodna, wysokociśnieniowa struga wodno-ścierna, struktura strugi, badania PIV

The paper presents the research of the structure and characteristics of flat jet, generated in fan-jet nozzle's type, during water-and abrasive-water jet creation. Such kind research was conducted utilizing PIV system (a YAG type laser) for isolating different structures of the jet in the erosion zone as well as for determination of their velocity fields.

KEYWORDS: high-pressure water jet, high-pressure abrasive water jet, jet structure, particle image velocimetry(PIV) examinations

Efektywne narzędzia hydrostrumieniowe, jakimi są wysokociśnieniowa struga wodna i wodno-ścierna, znajdują coraz to szersze zastosowanie przemysłowe. O ich przydatności decydują sposób i warunki kształtowania wysokociśnieniowej strugi wodnej oraz właściwości, ilość i sposób podawania ziaren ściernych a także sposób i warunki ich mieszania ze strugą wodną. Rozwój zastosowań

takich narzędzi dotyczy nie tylko stosunkowo już rozpowszechnionego „zimnego” cięcia i erodowania różnych materiałów, lecz przede wszystkim specyficznych procesów rozdrabniania minerałów i materiałów kruchych.

Rozdrabnianie materiałów znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przetwórstwa i ma na celu uzyskiwanie gotowego produktu, np. proszków o odpowiednim uziarnieniu [1, 3, 6], wytwarzanie półproduktów quasi-płynnych paliw energetycznych nowej generacji [2, 4, 5], bądź hydrostrumieniowej przeróbki kopalin w celu wzbogacania rud metali nieżelaznych [2, 7], itp. Jednak tego rodzaju działania są jednymi z najbardziej energochłonnych procesów technologicznych [7, 12]. Z powyższych względów dąży się do zoptymalizowania warunków hydrostrumieniowego rozdrabniania materiałów [1, 5, 8] a także do opracowania wysokociśnieniowej strugi wodnej odznaczającej się możliwie największą zdolnością erozyjną.

Najbardziej komplementarne badania podstawowe nad ukształtowaniem i strukturą wewnętrzną strugi wodnej i wodno-ścierniej a także ich erozyjnością, są prowadzone od wielu lat w japońskich placówkach naukowych. Praktycznie we wszystkich takich ośrodkach realizowane są wieloaspektowe badania nad wytwarzaniem i zastosowaniami strugi kawitacyjnej. Spośród nich można wskazać prace eksperymentalne [10, 13, 14] oraz numeryczne badania symulacyjne dotyczące struktury wewnętrznej i charakterystyki przepływu strug kawitacyjnych [13, 14]. Istotne są też wyniki badań nad strukturą wewnętrzną i erozyjnością płaskich strug wodnych [15, 21] wraz z ich badaniami modelowymi [21]. Interesujące są także badania strug wodno-ściernych o stabilnym [16] i pulsującym ciśnieniu [17]. Prowadzone są także wieloaspektowe badania struktury suspensyjnych strug wodno-ściernych [11, 19, 20] i ich erozyjności [18, 22] wraz z jej opisem modelowym [18].

* prof. dr hab. inż. P. Borkowski (pborkowski@cuprum.wroc.pl),
Ph.D., prof. S. Shimizu (sshimizu@mech.ce.nihon-u.ac.jp),
Ph.D., prof. G. Peng (gpeng@mech.ce.nihon-u.ac.jp),
Ph.D., assist. prof. Y. Oguma (oguma-y@mech.ce.nihon-u.ac.jp)

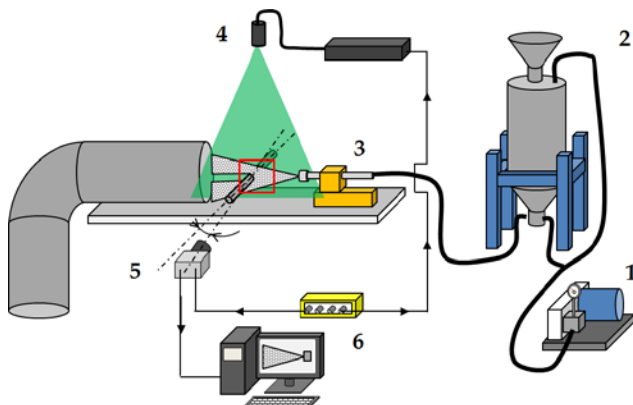
Mając na uwadze zbudowanie wysokoefektywnego młyna hydrostrumieniowego do skutecznego rozdrabniania rudy miedzi, nieodzowne stało się poznanie mechanizmu wytwarzania wysokociśnieniowej strugi roboczej. Przy uwzględnieniu powyższych przesłanek, niniejszy artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych oraz analizy zjawisk zachodzących wewnątrz wysokociśnieniowej strugi wodnej i strugi wodno-ścierniej o specyficznej strukturze, które zostały zrealizowane w Fluid Engineering Laboratory w Japonii.

Metodyka badań

Realizacja badań polegających na analizie zjawisk zachodzących podczas wytwarzania wysokociśnieniowej strugi wodnej i wodno-ścierniej, była możliwa dzięki wykorzystaniu specjalistycznej aparatury, będącej na wyposażeniu Fluid Engineering Laboratory w Nihon University w Japonii. Dzięki zastosowaniu nowatorskiej techniki pomiarowej, możliwym było przeprowadzenie zupełnie nowej jakości badań. Nieodzownym stało się przy tym zaprojektowanie i zbudowanie odpowiedniego toru pomiarowego, umożliwiającego przeprowadzanie eksperymentów modelujących szybkozmienne procesy zachodzące wewnątrz wysokociśnieniowej strugi wodnej.

■ Tor badawczo-pomiarowy

W celu przeprowadzenia badań modelowo-symulacyjnych, w warunkach zbliżonych do tych, jakie występują podczas generowania wysokociśnieniowej strugi w młynie hydrostrumieniowym, nieodzowne stało się zbudowanie odpowiedniego toru badawczo-pomiarowego, zilustrowanego na poniższym rys. 1.

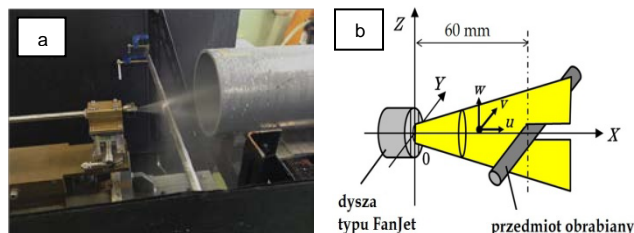


Rys. 1. Schemat toru pomiarowego do rejestracji szybkozmiennych procesów zachodzących wewnątrz wysokociśnieniowej strugi wodnej (1 – wysokociśnieniowa pompa wodna, 2 – urządzenie do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi zawieszinowej ASJ, 3 – głowica robocza typu FanJet, 4 – laserowy system PIV, 5 – superszybka kamera video, 6 – komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem do analizy obrazu).

W jego skład wchodzi system urządzeń do wytwarzania wysokociśnieniowej strugi cieczy oraz część pomiarowa. Wysokociśnieniowa pompa wodna (1), wytwarzając strugę wody o odpowiednim ciśnieniu, kieruje ją specjalnym węzłem do generatora zawieszinowej strugi wodno-ścierniej typu ASJ (2). W wyniku rozmywania złoża ściernego, powstaje trójfazowa struga wodno-ścierno-powietrzna, która podlega ostatecznemu uformowaniu w głowicy roboczej (3) typu FanJet. Taką strugą natryskiwana jest powierzchnia przedmiotu obrabianego (rys. 2), będącego odpowiednikiem płytki rozdrabniającej w młynie hydrostrumieniowym.

Kluczowa dla efektywności erozyjnej strefa kontaktu strugi z materiałem obrabianym, jest obserwowana dwu-

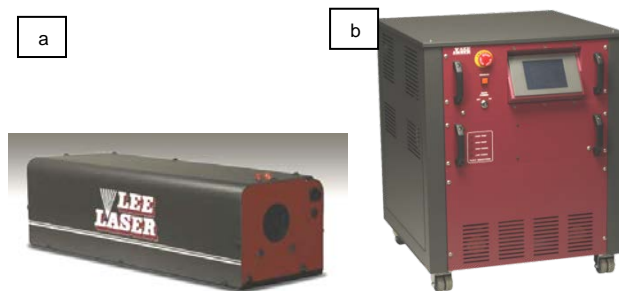
rowo, poprzez laserowy system PIV (4) oraz superszybką kamerę video (5). Obwody te rejestrują i przesyłają obraz do komputera (6) wyposażonego w specjalistyczne oprogramowanie, umożliwiające analizę zjawisk zachodzących zarówno w badanej strudze, jak i w strefie erozji.



Rys. 2. Stanowisko badawcze do symulacji warunków hydrodynamicznych zachodzących w młynie hydrostrumieniowym: a) widok ogólny stanowiska, b) schemat strefy obróbki.

■ Laserowy system wizualizacji pomiarów

Do rejestracji szybkozmiennych procesów zachodzących we wnętrzu wysokociśnieniowej strugi wodnej służy specjalistyczny laser Nd:YAG, typu LDP-100MQG, firmy Lee Laser Inc., przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Widok ogólny zestawu lasera LDP-100MQG (a) i urządzenia sterującego (b), firmy Lee Laser, Inc.

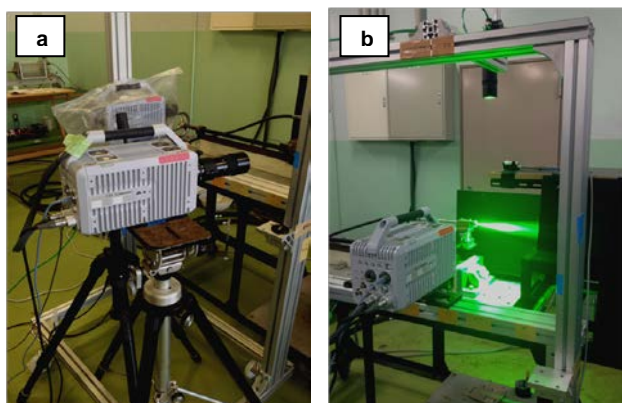
Zastosowanie tego lasera umożliwia, wspólnie z dedykowanym oprogramowaniem typu Koncerto2 firmy Seica Measurement Technology, skuteczną realizację badań szybkozmiennych procesów wielofazowych zachodzących w strudze. Dokonuje się tego poprzez poklatkową rejestrację (zwykle z częstotliwością impulsów laserowego rejestratora poniżej 100 μ s) zjawisk występujących w turbulentnym przepływie wielofazowej strugi wysokociśnieniowej. Szczególnym tego przykładem jest rejestracja sposobu przemieszczania się cząstek stałych materiału ściernego, niesionych energią wysokociśnieniowej strugi wody. Badana struga wodno-ścierna jest prześwietlana taką wiązką laserową, wytwarzaną przez ten przyrząd, który generuje strumień elektromagnetyczny o mocy 8,0-2,4 mJ (w zakresie częstotliwości 5–30 kHz). Obróbka zgromadzonych danych przy użyciu pakietu oprogramowania Koncerto2, umożliwia ostatecznie rendering poklatkowych obrazów o dużej rozdzielczości do postaci odpowiedniej sekwencji filmowej.

Powyższe oprogramowanie umożliwia dodatkowo przeprowadzenie szerokich analiz stanów dynamicznych panujących wewnątrz strugi, np. poprzez uzyskanie informacji o prędkości i kierunku przemieszczania się cząstek materiałów stałych w strudze, co w zasadniczy sposób zmienia dotychczasowy stan wiedzy z tego zakresu.

■ Ultraszybka rejestracja struktury strugi

Do rejestracji szybkozmiennych obrazów video hybrydowej strugi wodnej i wodno-ścierniej, w zbudowanym torze badawczo-pomiarowym, zastosowano ultraszybką kamerę

firmy Photron typu SA-NX2 (rys. 4). Wykorzystuje ona sensor CMOS o rozdzielczości 1024 x 1024 pikseli i przy takiej rozdzielczości ma możliwość rejestracji co najmniej 240 obrazów w ciągu sekundy, zapewniając głębię ostrości co najmniej 12-bitów. Czas ekspozycji takiej kamery wynosi 300 ns, dzięki czemu maksymalna prędkość przy zredukowanej rozdzielczości wynosi 1.000.000 obrazów na sekundę. Kamera ta, pracuje w sprzężeniu z systemem laserowym LDP-100MQG i jest nadzorowana przez dedykowane oprogramowanie Koncerto2, co pozwala na zsynchronizowany zapis informacji poklatkowego obrazu video poszczególnych przekrojów hybrydowej strugi cieczy, wskrośnie prześwietlanej laserem (rys. 4b).



Rys. 4. Ultraszybka kamera firmy Photron typu SA-NX2: widok ogólny (a) oraz podczas rejestracji obrazu (b), pracując w sprzężeniu z laserem LDP-100MQG.

Badania struktury wysokociśnieniowej strugi wodnej i wodno-ściernej

Dla wykonywania analiz wyników przeprowadzanych badań, posługiwano się aparatem matematycznym opracowanym i zaadaptowanym na potrzeby oprogramowania Koncerto2 [9]. Dokonując analiz uzyskanych obrazów, można określić średnie czasowe przebiegi kierunkowych składowych prędkości strugi w układzie ortogonalnym, według poniższych zależności:

$$\overline{u(X, Z)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n(X, Z), \quad (1)$$

$$\overline{w(X, Z)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_n(X, Z), \quad (2)$$

dla których:

$u_n(X, Z)$ – składowa X prędkości chwilowej,
 $w_n(X, Z)$ – składowa Z prędkości chwilowej,
 N – suma całkowita elementarnych pól prędkości.

Dodatkowo, w analizach tych posługiwano się zależnościami opisującymi odpowiednie składowe kierunkowe dla średnich kwadratowych wartości fluktuacji prędkości, w postaci:

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [u_n(X, Z) - \overline{u(X, Z)}]^2}, \quad (3)$$

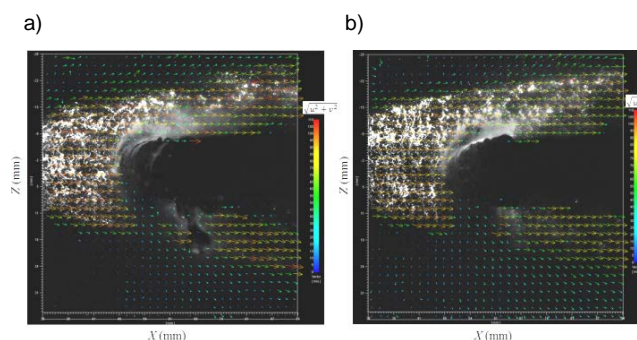
$$w_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [w_n(X, Z) - \overline{w(X, Z)}]^2}. \quad (4)$$

■ Podstawy turbulentnych przepływów strugi

Uwzględniając założenia wynikające z analizy teoretycznych podstaw przeprowadzanych analiz, zastosowano algorytmikę pozwalającą na określenie w takich warunkach turbulentnego przepływu, chwilowych pól prędkości strugi.

Przykładowe ilustracje przeprowadzonych symulacji przedstawiono na rys. 5.

Takie obrazy video ilustrują przemieszczające się w strudze cząstki kropel wody (a) oraz ziarna ściernie (b), które stanowią tu substytut cząstek rozdrabnianej rudy miedzi. Z analizy tej wynika, że cząsteczki te niesione energią strumienia rozpędzonego do prędkości ponad 100 m/s, trafiając na przeszkodę, rozpraszają na jej czole zasadniczą część energii kinetycznej, przez co wyhamowują prędkość przepływu strugi. Zmienia się przy tym wektor (kierunek i zwrot) tych cząstek, które mają bezpośredni kontakt z przedmiotem obrabianym. Analogiczne warunki, w innej skali technicznej, występują także wewnątrz młyna hydrostrumieniowego, podczas zderzania się cząstek rudy miedzi z płytką rozdrabniającą wykonaną z węgla spiekane. Dokonując analizy poszczególnych fragmentów zdjęć, można dostrzec duży stopień zaerowania strugi, co potwierdza dotychczasowe analizy własne w tym zakresie [2].



Rys. 5. Poklatkowe obrazy video, z nałożoną siatką elementarnych pól rozkładu prędkości, występujące w strudze: a) wodno-powietrznej, b) suspensyjnej wodno-ściernopowietrznej. Warunki badań: p=50 bar, SoD=60mm, garnet #200.

■ Analogie przepływu strugi w młynie hydrostrumieniowym

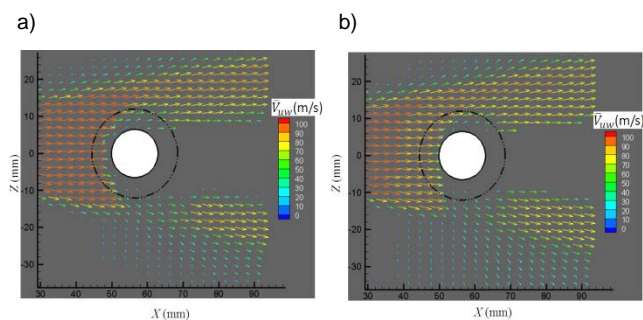
Omawiane powyżej kwestie zmiany dynamiki cząstek rozdrabnianego materiału, zdecydowanie łatwiej jest zaobserwować poprzez „odjęcie” poklatkowego zdjęcia video z obserwowanego obiektu. Należy robić to w taki sposób, aby pozostawały na nim jedynie same siatki rozkładu prędkości elementarnych cząstek przemieszczających się w strudze, przeliczone komputerowo według poniższej zależności (5) [9]:

$$\bar{v}_{uw} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{w}^2}, \quad (5)$$

dla której:

\bar{v}_{uw} - wielkość czasowo uśrednionej prędkości,
 \bar{u} - wielkość czasowo uśrednionej prędkości w kierunku X,
 \bar{w} - wielkość czasowo uśrednionej prędkości w kierunku Z.

Wyniki zastosowania tego rodzaju procedury obrazują odpowiedniki takich rejestracji, przedstawione przykładowo na rys. 6. Z obrazów tych widać wyraźnie, iż gros energii niesiona jest wewnątrz strumienia (tj. głównie w jego rdzeniu). W miarę oddalania się wzdłuż osi strugi od miejsca jej wytwarzania w dyszy roboczej, następuje aeracja zwartego strumienia, który trafiając w czoło przeszkody rozkropelkuje się, rozpraszając energię stycznie do powierzchni takiej przeszkody.



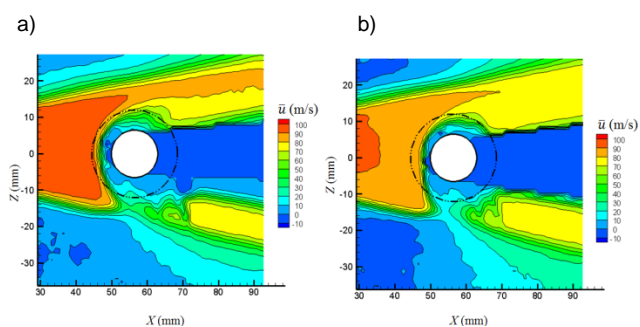
Rys. 6. Obrazy pól rozkładu prędkości elementarnych cząstek \vec{v}_{uw} przemieszczających się w strudze: a) wodno-powietrznej, b) suspensyjnej wodno-ścierno-powietrznej. Warunki badań: $p=50$ bar, $SoD=60$ mm, garnet #200.

Dla obydwu rozpatrywanych tu przykładowych struktur strugi wodno-powietrznej i wodno-ściernej, obserwuje się występowanie analogicznych zjawisk decydujących o aeracyjnym rozwarstwianiu się strugi w kierunku poprzecznym do osiowego. Widać z nich wyraźnie, że w odległości zaledwie 20-30 mm w kierunku prostopadłym względem osi strugi, prędkości takich warstw strugi osiągają zaledwie kilkanaście procent tej, jaka występowała w jej osi.

Jest to kolejny ważki dla praktyki wniosek informujący o tym, w jaki sposób należy skutecznie projektować narzędzie wodno-ściernie w celu pełniejszego wykorzystania energii kinetycznej nagromadzonej w wysokociśnieniowej strudze wodnej.

■ Symulacyjna analiza przepływu strugi

Nieco więcej informacji szczegółowych można uzyskać analizując obrazy dla poszczególnych kierunków rozchodzenia się prędkości. Przykładowo, na rysunku 7 przedstawiono pola rozkładu prędkości \vec{u} występujących w strudze wodnej (a) oraz wodno-ściernej (b), rozpatrywanych dla składowej poziomej X. Stąd też w analizowanym obszarze widać pełen zakres prędkości przemieszczających się cząstek strugi i ziaren ściernych. Widać przy tym strefy występujących nieciągłości struktury takiej strugi, czy też bardziej ogólnie formułując, braku pełnej symetrii rozpatrywanej względem osi strugi „0”.



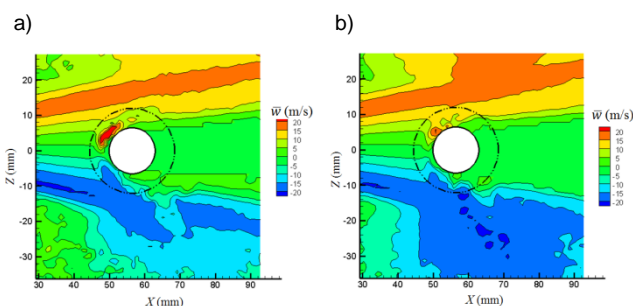
Rys. 7. Obrazy pól składowej prędkości \vec{u} występujących w strudze: a) wodno-powietrznej, b) suspensyjnej wodno-ścierno-powietrznej. Warunki badań: $p=50$ bar, $SoD=60$ mm, garnet #200.

Tego rodzaju efekty prawdopodobnie są spowodowane nieprecyzyjnym ustawieniem roboczej dyszy typu FanJet w jednej osi z prętem, którego powierzchnia stanowi cel natrysku strugi. Jakkolwiek jednak są tego przyczyny, to z przeprowadzonych analiz wyłania się główny wniosek dotyczący kumulacyjnego efektu zwiększania energii kinetycznej i prędkości strugi wzdłuż jej osi. Dzięki temu podczas projektowania właściwych rozwiązań konstrukcyjnych młyna hydrostrumieniowego, należy stosować zasadę za-

pewnienia centrycznego natrysku wysokoenergetycznej strugi wodnej.

Potwierdzeniem takiego stanu rzeczy są adekwatne obrazy ilustrujące pola rozkładu prędkości \vec{w} , występujące w strudze wodnej (a) oraz w strudze wodno-ściernej (b), rozpatrywane w prostopadłym kierunku Z (rys. 8).

W przypadku obserwacji rozkładu prędkości w kierunku prostopadłym do osi strugi, tj. rozprzestrzeniania się jej warstw w poprzecznym kierunku Z, widać niejako rykoszetytowane odbijanie się strugi od powierzchni pręta zastosowanego jako materiał kolizyjny. Dlatego też w takich warunkach prędkości poprzecznego rozplywu strugi także przyjmują zdecydowanie niższe wartości. Dla rozpatrywanych tu rodzajów strugi (a, b) maksymalne ich wartości nie przekraczają 20 m/s.



Rys. 8. Obrazy pól składowej prędkości \vec{w} występujących w strudze: a) wodno-powietrznej, b) suspensyjnej wodno-ścierno-powietrznej. Warunki badań: $p=50$ bar, $SoD=60$ mm, garnet #200.

Taki efekt rozpraszania się energii strugi w miejscu kontaktu z materiałem obrabianym można odpowiednio wykorzystać. Szukając bowiem analogii do warunków praktycznych występujących w młynie hydrostrumieniowym, łatwo można wykazać, iż cząstki stałe materiału niesione przez wysokociśnieniową strugą wodną, zderzają się ze sobą i z wewnętrznymi powierzchniami ścian ograniczającymi cylindryczną konstrukcję komory roboczej młyna, przez co ulegają dodatkowemu rozdrobnieniu. Z powyższych względów informacje uzyskane podczas tych badań, ilustrujące prawdziwe proporcje prędkości składowych rozprzestrzeniania się energii w takim modelowym układzie, daje się z pewnością przetransponować na rozwiązania rzeczywiste, przydatne dla zoptymalizowania konstrukcji młyna hydrostrumieniowego.

Podsumowanie

Dzięki eksperymentalnym symulacjom, realizowanym przy użyciu unikalnego stanowiska badawczego, dokonano wieloaspektowej analizy stanów dynamicznych występujących w rozkropelkowanej strudze wodno-powietrznej, jak również drobnych cząstek materiałów stałych, które przemieszczają się w poszczególnych przekrojach strugi wodno-ścierniej.

Przeprowadzone badania o charakterze symulacyjnym zostały zaplanowane tak, aby zastosowane materiały przyjmowały rolę odpowiedników rozdrabnianych cząstek rudy miedzi. Dzięki temu zniwelowane zostały także technologiczne rozbieżności w zastosowanych parametrach, jak chociażby relatywnie niskie ciśnienie strugi wody ($p=50$ bar) ograniczające rozpędzanie suspensyjnej strugi ASJ (zawierającej granat #200), do prędkości ponad 100 m/s.

Zastosowanie w tych badaniach odpowiedniego aparatu matematycznego, opracowanego i zaadaptowanego na

potrzeby oprogramowania Koncerto2 i algorytmiki umożliwiającej określenie chwilowych pól prędkości strugi, pozwalają w warunkach turbulentnego przepływu, przeprowadzać symulacyjne analizy dynamicznych zachowań strugi wodno-powietrznej i suspensyjnej strugi wodno-ściernopowietrznej.

Przeanalizowany efekt rozpraszania się energii strugi w miejscu kontaktu z materiałem obrabianym można odpowiednio wykorzystać. Szukając bowiem analogii do warunków praktycznych, występujących w młynie hydrostrumieniowym, łatwo można wykazać, iż cząstki stałe materiału niesione przez wysokociśnieniową strugą wodną, zderzają się ze sobą i z wewnętrznymi powierzchniami ścian, ograniczającymi cylindryczną konstrukcję komory roboczej młyna, przez co ulegają dodatkowemu rozdrobieniu. Z powyższych względów informacje uzyskane podczas tych badań, ilustrujące prawdziwe proporcje prędkości składowych rozprzestrzeniania się energii w takim modelowym układzie, daje się przetransponować na rozwiązania rzeczywiste, przydatne dla zoptymalizowania konstrukcji młyna hydrostrumieniowego.

LITERATURA

- Bielecki M., Badania wpływu parametrów wysokociśnieniowego młyna hydrostrumieniowego na efektywność rozdrabniania materiałów. Praca doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Koszalińska, 2013.
- Borkowski P., Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych. Monografia Instytutu Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych nr 174 (ISSN 0239-7129), 2010.
- Borkowski P., Borkowski J., Comminution of different materials with high-pressure water jet. Unconventional and HydroJetting Technologies. Monograph of UHJT Institute (ISSN 0239-7129), Koszalin, 2009. pp. 493-500.
- Borkowski P., Borkowski J., Coal comminution with high pressure water jet. In book F. H. Trieb (editor), Water Jetting (ISBN: 978 1 85598 121 8). BHR Group Ltd. UK, 2010, pp. 141-146.
- Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M., Coal disintegration using high pressure water jet. Technical Gazette. Volume 19, No. 2, 2012, pp. 367-372.
- Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M., Mikronizacja materiałów kruchych metodą hydrostrumieniową. Mechanik, Nr 9/2014, s. 73-76/721.
- Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M., Micronization of Carbonate Copper Ore With High-Pressure Water Jet Method. 22nd International Conference on Water Jetting 2014 Advances in Current and Emerging Markets. Edited by: M. Fairhurst. Netherlands, 2014, pp. 305-314 (ISBN 978-1-85598-143-0).
- Cui L., An L., Gong W., Optimizing process parameters of high pressure water jet mill. The 8th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology. China, 2006, pp. 138-145.
- Geveci M., et al., Imaging of the self-excited oscillation of flow past a cavity during generation of a flow tone. Journal of Fluids and Structures, 18(2003), pp. 665-694.
- Ito H., Aoyama T., Peng G., Shimizu S., Observations of cavitating jets issuing from a sheathed nozzle. 9th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology. Japan, 2009. pp. 97-100.
- Ito H., Peng G., Shimizu S., Submerged abrasive suspension jets issuing from sheathed nozzle with ventilation. 2011 WJTA-IMCA Conference and Expo. USA, 2011, Paper E-2.
- Neikov O. D., Mechanical Crushing and Grinding, Handbook of Non-Ferrous Metal Powders. Technologies and Applications, 2009, pp. 47 - 62.
- Peng G., Shimizu S., Fujikawa S., Numerical simulation of high-speed water jet flow with cavitation by a compressible mixture flow model. 2009 American WJTA Conference and Expo. USA, 2009, Paper 4-C.
- Peng G., Shimizu S., Fujikawa S., Numerical simulation of Turbulent Cavitating Water Jets Issued from a Submerged Orifice Nozzle. 9th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology. Japan, 2009, pp. 139-144.
- Shimizu S.: Structure and erosive characteristics of water jet issuing from fan jet nozzle. 18th International Conference on Water Jetting, Poland, 2006, pp 337-345.
- Shimizu S., Adachi H., Izumi K., Sakai H.: High-speed observations of submerged water jets issuing from an abrasive water jet nozzle. 2007 American WJTA Conference and Expo, USA, 2007, Paper 4-H.
- Shimizu S., Ishikawa T., Saito A., Peng G.: Pulsation of abrasive water-jet. 2009 American WJTA Conference and Expo. USA, 2009, Paper 2-H.
- Shimizu S., Ito H., Hori S., Peng G.: Abrasive suspension jet issuing from a fan jet nozzle. 21st International Conference on Water Jetting Looking to the future, learning from the past. BHR Group Ltd. Canada, 2012, pp. 395-403.
- Shimizu S., Nishiyama T.: A sheathed nozzle for abrasive water suspension jets in submerged environments. 17th International Conference on Water Jetting. BHR Group Ltd., Germany, 2004. pp. 197-204.
- Shimizu S., Sakuma M., Hitomi K., Peng G.: Submerged cutting by abrasive suspension jet issuing from sheathed nozzle with ventilation. 18th International Conference on Water Jetting. BHR Group Ltd., Austria, 2010, pp. 435-441.
- Shimizu S., Shinoda Y., Peng G.: Flow characteristics of water jet issuing from a fan jet nozzle. 19th International Conference on Water Jetting. BHR Group Ltd., UK, 2008, pp. 55-65.
- Shimizu S., Suzuki T., Peng G.: Material removal characteristics of an abrasive fan jet. 22nd International Conference on Water Jetting. BHR Group Ltd., Netherlands, 2014, pp. 215-221.