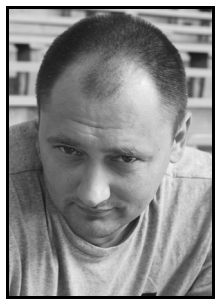
Marek JAKUBOWSKI
POLITECHNIKA KOSZALINSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY,
ul. Racławicka 15-17, 75-620 Koszalin

Pomiar PIV przepływu niestacjonarnego w kadzi wirowej

Dr inż. Marek JAKUBOWSKI



Jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W roku 2009 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn. Jest adiunktem w Katedrze Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechniki Koszalińskiej. Jego zainteresowania naukowe to inżynieria procesowa, modelowanie i symulacja przepływu płynów (CFD) oraz badania eksperymentalne PIV.

e-mail: marek.jakubowski@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Praca przedstawia problemy pomiarowe jakie powstały podczas zrealizowanego cyklu badań z wykorzystaniem techniki pomiaru bezkontaktowego PIV (Particle Image Veolcimetry) przepływu niestacjonarnego w zbiorniku modelowym kadzi wirowej zwanej potocznie whirlpoolem. Obiektami badań były zbiorniki wykonane z PMMA o zróżnicowanym konstrukcyjnie rozmieszczeniu otworów wlotowych. W pracy zaprezentowano zbudowane stanowisko pomiarowe, sposób kalibracji, problemy i ograniczenia zastosowania PIV powstałe podczas prowadzenia badań oraz przykładowe wyniki analiz.

Słowa kluczowe: pomiar bezkontaktowy PIV, kadź wirowa, przepływ wtórny.

PIV measurement of unsteady flow in a whirlpool vat

Abstract

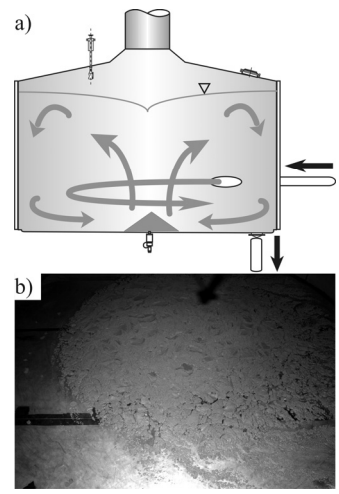
The paper presents measurement problems which occurred during the series of research incorporating the PIV (Particle Image Velocimetry) optical measurement of unsteady flow inside a scale model of a cycling vat, also known under the name of whirlpool. The subject of the research were containers made of PMMA with structurally diversified placement of inlets. The work unveils the workbench, the calibration method and the limitations of adopting PIV met during the research, along with sample results of analysis. The measurements were taken on a workbench built in the laboratory of Philadelphia Mixing Solutions, Palmyra PA, US. The measurements incorporated a PIV FlowSense2M camera, a DantecDynamics' HUB system as well as YAG NewWave Solo 120 TX laser equipped with a controller, a part of which is a water-cooling system. FlowManager was the software used for computation, whereas DynamicStudio was used for analysis and result collection. While obtaining measures an array of difficulties was met, related to capturing decent quality images with seeding particles under specific conditions of filling up the whirlpool tank. The phenomenon of free surface inside the flow and the characteristics of filling up an open tank have revealed multiple complications connected to laser beam reflections along with capturing reflections from other light sources. An additional trouble was caused by aeration of the mixture being the subject of the measurement. Unsteady flow was the cause of problems during analysis of the material, so it was necessary for adaptive correlation to be based on two frames. This is not the case with steady flow, for which we can use 1000 consecutive frames as a basis for the statistic analysis.

Keywords: PIV measurement, whirlpool, secondary flow.

1. Wprowadzenie

Przez stulecia techniki i technologie przetwórcze w browarnictwie ewoluowały, co w konsekwencji doprowadziło do wypracowania standardów przetwórczych. W procesie technologicznym produkcji brzeczki piwnej, do usuwania tzw. osadu gorącego stosuje się kadź wirową (zwaną whirlpoolem) [3].

Kadź wirowa (rys. 1a) jako separator do oddzielania osadu gorącego w procesie produkcji brzeczki piwnej stanowi rozwiązanie powszechnie stosowane i zarazem skuteczne. Jest to separator w postaci zamkniętego cylindrycznego zbiornika. Jest on napełniany przez otwór wlotowy umiejscowiony stycznie do płaszcza zbiornika. W wyniku takiego sposobu napełniania wewnątrz zbiornika powstaje ruch wirowy klarowanej brzeczki. Sedymentacja cząstek separowanego osadu gorącego w zbiorniku następuje w sposób grawitacyjny, wspomagany ruchem wirowym mieszaniny. Wewnątrz separatora powstaje przepływ wtórny umiejscowiony w tzw. warstwie granicznej Ekmana. Zjawisko formowania się stożka osadu gorącego (rys. 1b) występuje samoistnie. Po raz pierwszy zostało opisane przez Alberta Einsteina i nazwane przez niego „efektem filiżanki herbaty" [2].



Rys. 1. Kadź wirowa whirlpool: a) schemat obrazujący przepływy wtórne, b) wnętrze opróżnionego separatora z widocznym stożkiem osadu gorącego
Fig. 1. Whirlpool cycling vat: a) secondary flow diagram, b) the inside of empty separator with a visible cone of hot trub

Oprócz przepływu w warstwie Ekmana występują inne przepływy o charakterze wtórnym. Stanowią one swoisty system przepływów, który dotychczas jest mało poznany. Rysunki obrazujące przepływy wtórne w whirlpoolu dostępne w literaturze mają charakter wyłącznie orientacyjny (jak np. na rys. 1a) poparty jedynie obserwacjami skutków ich oddziaływania. Prowadzone są także prace badawcze dotyczące przepływu w whirlpoolu zorientowane na optymalizację konstrukcji separatora i sposobu prowadzenia rozdziału.

2. Zasada pomiaru i stanowisko badawcze

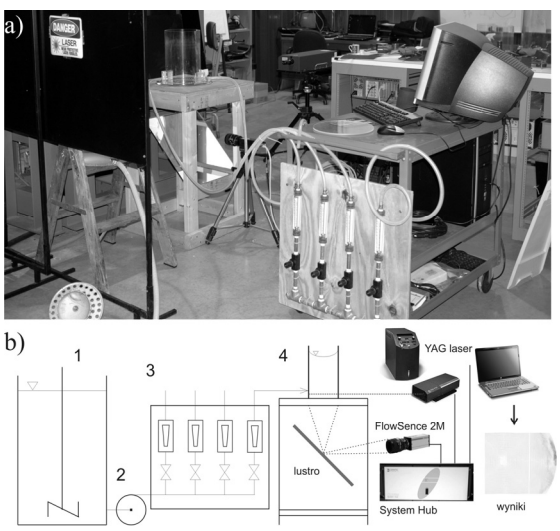
Badania eksperymentalne ruchu cieczy w kadzi wirowej były planowane przez klika lat. Podstawą do ich prowadzenia są wcześniejsze pomiary LDA (Laser Doppler Anemometry) wykonywane w Niemczech na Uniwersytecie Technicznym w Monachium [1]. Pomiary LDA nie oddają jednak charakteru przepływu na całej płaszczyźnie ekspozycji.

Do badań wykorzystano bezkontaktową technikę pomiaru bazującą na anemometrii obrazowej PIV (Particle Image Velocimetry). Jest to metoda analizy przepływu z wykorzystaniem cząstek wskaźnikowych (tzw. posiewu). Są to cząstki o bardzo małej wielkości (od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów), które wprowadza się do badanego ośrodka. W przypadku pomiarów przepływu cieczy są to cząstki stałe, np. poliamid (PA) o wielkości 10-50 μm. Do analizy przepływu gazów można wykorzystać rozproszone krople cieczy (w tym wody) oraz cząstki stałe. Cząstki te są unoszone wraz z przepływem i zasadniczo nie zakłócają

ruchu badanego ośrodka. W przepływie (podczas pomiaru) są one oświetlone arkuszem światła laserowego (tzw. noża świetlnego), które jest na nich rozpraszane. Przemieszczenie cząstek wskaźnikowych jest rejestrowane przez specjalną kamerę (lub wiele kamer) do PIV i zapisywane w postaci klatki obrazu zawierającej dwie ramki (osobne obrazy tej samej ekspozycji uzyskane w odstępie krótkiego czasu) stanowiące bazę do analizy korelacyjnej. W jej wyniku, na podstawie określenia przemieszczenia cząstek, możliwe jest wyznaczenie wektora prędkości przepływu [4].

Metoda PIV jest szczególnie przydatna w analizie pola prędkości przepływów, dla których z różnych powodów nie ma możliwości wprowadzenia czujnika pomiarowego, tak jak ma to miejsce w whirlpoolu.

Do badań wykorzystano stanowisko pomiarowe zbudowane w laboratorium testowym działu R&D Philadelphia Mixing Solutions, Palmyra, PA. Na rysunku 2 przedstawiono widok ogólny stanowiska (rys.2a) i szkic z wydzielonymi elementami. Do pomiarów wykorzystano kamerę PIV FlowSense 2M, oraz laser dwuimpulsowy NewWave Solo 120 TX wyposażony w sterownik z układem chłodzenia wodą . Synchronizację prowadzono z wykorzystaniem Sysytem Hub DantecDynamics.

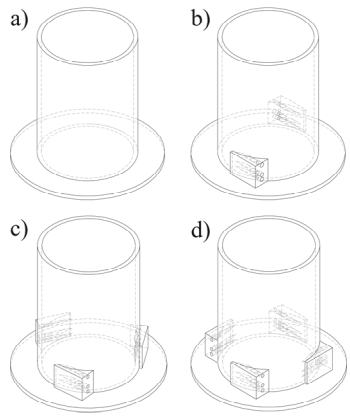


Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) widok ogólny, b) schemat, gdzie: 1) zbiornik do przygotowania mieszaniny wody i posiewu, 2) pompa VANTON FLEX-I-LINER, 3) rozdzielacz z rotametrami, 4) stół do pomiarów PIV

Fig. 2. Measuring position: a) overview, b) diagram: 1) a tank for preparing the mixture of water with seeding particles, 2) VANTON FLEX-I-LINER pump, 3) distributor with rotameters, 4) workbench for PIV measurements

Zbiorniki testowe o pojemności nominalnej ok. 6 litrów (1,58 galona amerykańskiego) wykonało Plastico, Memphis, TN. Zaprojektowano i wykonano cztery zbiorniki, których szkice przedstawiono na rys. 3. Do pomiarów wykonano zbiornik o podwójnych wlotach (rys. 3b) do prowadzenia napełniania jedno i dwustronnego, zbiornik o potrojonych wlotach (rys. 3c) i zbiornik o wlotach umiejscowionych czterostronnie (rys. 3d). Wykonano także zbiornik pozbawiony otworów wlotowych (rys. 3a) w celu wykonania pomiarów porównawczych. W tym przypadku wymuszenie rotacji było realizowane z wykorzystaniem mieszadła 4-łopatkowego.

Zbiorniki testowe wykonano z materiału transparentnego umożliwiającego prowadzanie pomiarów w świetle przechodzącym. Wykorzystano polimetakrylan metylu (PMMA), czyli pleksi. Jest to materiał posiadający przezroczystość na poziomie ok. 92%. Jest to jednak materiał o małej twardości podatny na zarysowania. Głębsze rysy powodują powstawanie zniekształceń obrazu, które w wielu przypadkach prowadzą do sytuacji, w której uzyskany do analizy obraz jest w zasadzie bezużyteczny.



Rys. 3. Szkice zbiorników testowych do pomiarów: a) z mieszadłem (bez wlotu), b) z napełnianiem klasycznym (jednostronnym) i podwojonym, c) z napełnianiem trójstronnym, d) z napełnianiem czterostronnym

Fig. 3. Sketches of test tanks: a) with an impeller (without an inlet), b) with standard (one-sided) and two-sided filling, d) three-sided, e) four-sided

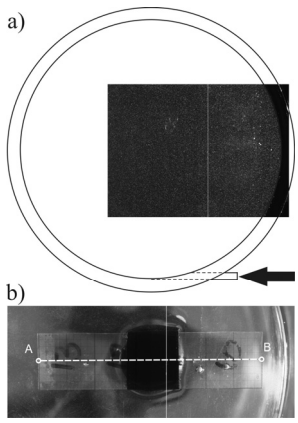
3. Ośrodek, pole ekspozycji i kalibracja

Wstępne przygotowanie serii pomiarów wymagało na początku uzdatnienia wody jako ośrodka do propagacji cząstek pomiarowych. Woda wodociągowa niesie w przepływie drobiny kwarcu (które mogły imitować np. „fałszywe cząstki" posiewu) pochodzącego ze złóż filtracyjnych (konsekwencja uzdatniania wody) i innych zanieczyszczeń wtórnych (osadów związków żelaza i manganu). Cząstki te oraz inne drobiny ze względu na występujące zjawisko „efektu filiżanki herbaty" mogą również gromadzić się w centralnej strefie dna zbiornika utrudniając prowadzenie pomiaru w tej strefie. Dlatego też woda była wstępnie przygotowywana poprzez filtrację w zestawie podciśnieniowym z wykorzystaniem bibułowego sączka filtracyjnego ułożonego na lejku Büchnera. Po filtracji woda była przelewana do zbiornika (odstojnika) celem dalszego osadzania pozostałości stałych w postaci zawiesiny, a także odpowietrzenia wody. Po około dwóch dobach woda była gotowa do prowadzenia pomiarów.

Powierzchnia pola ekspozycji dla pomiaru została określona na podstawie rozdzielczości kamery. Kamera FlowSense 2M posiada rozdzielczość 1600 na 1200 pikseli. Do określenia maksymalnej powierzchni wykorzystano test Kołmogorowa pozwalający ustalić właściwy rozmiar celi pomiarowej przy zachowaniu minimalnej różnicy przemieszczenia cząstki pomiarowej pomiędzy dwoma impulsami lasera koniecznymi do wykonania prawidłowego pomiaru. Na rys. 4a przedstawiono ustalony rozmiar pola ekspozycji w odniesieniu do przekroju całego zbiornika. Ustalono, iż najodpowiedniejszy będzie obszar obejmujący ok. 2/3 średnicy zbiornika dla pomiaru w płaszczyźnie poziomej. Podczas późniejszej obróbki danych obraz pola ekspozycji był każdorazowo „maskowany" w celu eliminacji obszarów, których analiza powodowałaby występowanie błędów. Dotyczy to głównie krawędzi zbiornika, oraz wąskiego paska wypalonej matrycy szerokiego na 2 piksele (jest to pozostałość po drobnym uszkodzeniu kamery podczas wstępnych pomiarów zarejestrowanych i przedstawionych na rys. 5)

Ze względu na prowadzenie pomiarów na wybranych wysokościach umiejscowienia arkusza światła laserowego prześwietlającego zbiornik należało wykonywać kalibracje pola ekspozycji dla każdego przypadku. W tym celu wykorzystano zbudowany prowizoryczny statyw z naklejoną skalą (rys. 4b) umieszczony na wysokości właściwej dla umiejscowienia noża świetlnego. W trakcie kalibracji wykonywano pojedyncze zdjęcie celem określenia odległości pomiędzy punktami kontrolnymi co pozwalało wyznaczyć współczynnik skali niezbędny do końcowego określenia wartości maksymalnych prędkości cząstek dla pojedynczego pomiaru. Jest to standardowa procedura, przy czym ze względu na konieczność prowadzenia pomiarów na różnych wysokościach

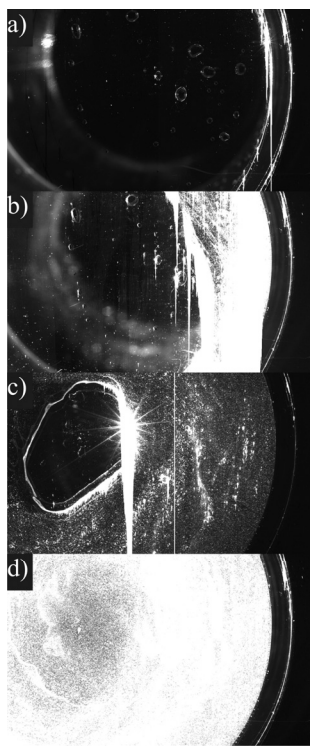
położenia arkusza świetlnego oraz zmiany zbiorników była wykonywana wielokrotnie.



Rys. 4. Obszar ekspozycji: a) w zbiorniku testowym, b) wydzielony fragment z siatką kalibracyjną (odcinek kalibracyjny AB o długości 0,1016 m (4 cale))
Fig. 4. Area of exposition: a) inside the test tank, b) a separate part with a calibration mesh (an "AB" calibration line segment being 0,1016m (4 in))

4. Problemy występujące podczas pomiarów

Podczas prowadzenia badań napotkano na szereg problemów wynikających ze specyfiki przepływu a także ograniczeń wynikających z budowy stanowiska i zastosowanej metody pomiaru.

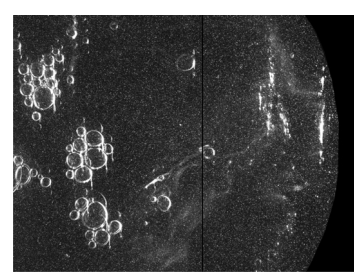


Rys. 5. Obraz z kamery podczas etapu początkowego napełniania zbiornika testowego (otwór wlotowy umiejscowiony na górze poza obszarem ekspozycji): a) pusty zbiornik, b) pierwsza warstwa cieczy zakrywa dno zbiornika, c) faza końcowa formowania się swobodnej powierzchni w kształt paraboloidy obrotowej, d) uformowana powierzchnia swobodna.
Fig. 5. Camera image during the beginning phase of filling up the test tank (inlet placed at the top, outside the exposition area): a) an empty tank, b) the first layer of liquid covers the bottom of the tank, c) the final phase of forming the free surface into a paraboloid of revolution, d) formed free surface

Podstawowym problemem wynikającym z prowadzenia napełniania pustego zbiornika (rys. 5a) po stycznej było załamywanie się wiązki światła laserowego na krzywiźnie swobodnej powierzchni formującej się w kształt paraboloidy obrotowej. Płaszczyzna ta tworzy od strony cieczy powierzchnie „lustrzaną", która odbija światło podczas jej formowania się (rys. 5b i 5c). Pojedyncze odbicie światła (tzw. blik) może uszkodzić matrycę światłoczułą kamery. Ta sama sytuacja dotyczy rejestracji obrazu oświetlonego pustego zbiornika (rys. 5a). Na krawędziach pojawiają się odbicia światła, które załamując się dociera do matrycy kamery.

Nawet po uformowaniu się swobodnej powierzchni światło rozprasza się na jej płaszczyźnie uniemożliwiając pomiar (rys. 5d). Dlatego należy rozpoczynać rejestrację kamerą z pewnym opóźnieniem w odniesieniu do początkowego czasu pracy lasera. W układzie zsynchronizowanym nie jest to jednak zasadniczo możliwe, dlatego też można uzyskać efekt opóźnienia przykrywając obiektyw kamery przez kilkanaście pierwszych sekund pomiaru. Ponieważ nie można tego wykonać przykrywką obiektywu (każde poruszenie obiektywem może spowodować rozregulowanie i utratę ostrości obrazu) przygotowano nakładkę, która skutecznie ograniczała dostęp światła do obiektywu.

Podczas napełniania pustego zbiornika w początkowej fazie operacji (zwłaszcza przy wyższych wartościach prędkości początkowej napełniania) można zidentyfikować często występujący problem związany z formowaniem się dużych pęcherzy powierza (rys. 6). Utrzymują się one dość długo uniemożliwiając pozyskanie wartościowego materiału do prowadzenia dalszej analizy. Podczas prowadzenia badań mieszaninę wody i posiewu sporządzano raz na 2-3 dni wykonując dziennie ok. 5 wirowań. Wykorzystywano więc ten sam posiew wielokrotnie. W trakcie prowadzenia pomiarów zaobserwowano zjawisko swoistego „starzenia się" mieszaniny spowodowanego prawdopodobnie napowietrzeniem występującym podczas wielokrotnego napełniania i opróżniania zbiornika. W miarę upływu czasu mieszanina wykorzystywana do badań stawała się bardziej mętna i podatna na występowanie formowania się na swobodnej powierzchni dużych i trwałych pęcherzy powietrza.



Rys. 6. Skupiska bąbli powietrza na powierzchni ekspozycji (na rysunku widoczna jest maska zakrywająca fragmenty obrazu nie będące przedmiotem analizy)
Fig. 6. Swarms of air bubbles on the surface of exposition (a part of the diagram is a mask covering parts of the image that don't make the subject of analysis)

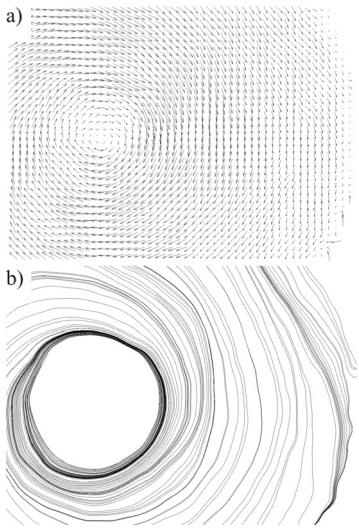
Problemem, który występuje podczas pomiarów PIV dla przepływu niestacjonarnego jest zróżnicowanie interwału czasowego pomiędzy pojedynczymi pulsami lasera dla każdej klatki w zależności od tego czy wartość prędkości wzrasta czy też maleje. W przypadku przepływu w whirlpoolu wartość prędkości przepływu maleje wraz z czasem co jest konsekwencją dyssypacji energii wirowania. Wobec powyższego najkorzystniejszą sytuacją byłaby możliwość dynamicznej zmiany (stopniowego zwiększania) przedziału czasu pomiędzy pulsami. Nie jest to jednak możliwe do realizacji w ramach ustawień oprogramowania dostarczanego do systemu pomiarowego. Wobec tego konieczne było powtarzanie procedury pomiarowej dla każdorazowo zadeklarowanych warunków prowadzenia napełniania co najmniej trzykrotnie zmieniając jedynie przedział czasu pomiędzy impulsami lasera (np. 300, 800 i 1600 μs).

Ostatnim problemem było ograniczenie możliwości pomiaru w płaszczyźnie światła laserowego zorientowanej pionowo. W miarę zbliżania się do płaszcza zbiornika obraz ulega coraz

większej deformacji poprzez zakrzywienie. Uniemożliwia to praktycznie uzyskanie obrazu wartościowego dla prowadzenia dalszej analizy. Możliwe było zastosowania drugiego zbiornika np. prostopadłościennego wypełnionego cieczą kompensacyjną, co jednak znacznie utrudniłoby operacje związane z napełnianiem i opróżnianiem zbiornika testowego.

5. Przykładowe wyniki pomiarów

Wykonano rejestrację ponad 200 wirowań zgodnie z planem badań, które pozwoliły na uzyskanie materiałów do dalszych analiz. Na rys 7 przedstawiono przykładowe wyniki dla wirowania z napełnianiem dwustronnym. Ponieważ przepływ ma charakter niestacjonarny analizę wyników (w tym przypadku korelację adaptacyjną) można wykonać wyłącznie na podstawie pojedynczej klatki obrazu.



Rys. 7. Przykładowe wyniki pomiarów: a) mapa wektorów pola prędkości, b) linie prądu przepływu dla rozkładu przedstawionego powyżej
Fig. 7. Sample measurement results: a) vector map of velocity field, b) lines of currents for the distribution layout presented above

Wyniki analizy dla przepływu w whirlpoolu prezentowane w postaci mapy wektorowej pola prędkości (rys. 7a) obrazują jedynie rotację cieczy o lokalnie zmiennych wartościach prędkości. Dlatego też wydaje się zasadnym prezentację wyników w postaci map konturowych pola prędkości, a w przypadku identyfikacji przepływu formującego stożek osadu w postaci linii prądu przepływu (rys. 7b) (z ang. streamlines).

6. Podsumowanie

Pomiar PIV przepływu w kadzi wirowej jest zagadnieniem niełatwym do wykonania. Istnieje szereg ograniczeń prowadzenia pomiaru związanych ze prowadzeniem napełniania kadzi po stycznej, zmiennymi w czasie wartościami prędkości, a także kształtem zbiornika i specyfiką przepływów wtórnych występujących podczas przepływu. Prezentowane w pracy zagadnienia (w intencji autora) mają na celu zasygnalizowanie występowania problemów w pomiarze PIV przepływu niestacjonarnego, zawirowanego ze swobodną powierzchnią, oraz wskazać pośrednio sposoby radzenia sobie w określonych sytuacjach pomiarowych.

Autor składa podziękowania Wojciechowi Wyczałkowskiemu, PhD (Technology Fellow) z PMSL Palmyra, PA, za umożliwienie wykonania badań i nieocenioną pomoc w ich przeprowadzeniu.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010 - 2013 jako projekt badawczy nr N N313 429639

7. Literatura

[1] Dürholt A.: Experimentelle Untersuchung der instationären Drehströmung im Absetzbehälter "Whirlpool". VDI, 1988.
[2] Einstein A.: Ursache der Mäanderbildung der Flussläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes, Die Naturwissenschaften, Springer, 14 (11), s. 223–224, 1926.
[3] Kunze W.: Technology Brewing and Malting. VLB, Berlin, 2010.
[4] Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer, Berlin-Heidelberg, 2007.

otrzymano / received: 08.04.2013
przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013 *artykuł recenzowany / revised paper*

INFORMACJE

Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo–technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK