УДК 004.9:532.574

Мочалін О. Є., Гонтовий С. В.

РОЗВИТОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ЦИФРОВИХ ТРАСЕРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Розглянуті основні досягнення й недоліки сучасних інформаційних технологій обробки цифрових трасерних зображень. Проведено порівняльний аналіз найбільш відомих алгоритмів. Зроблено огляд методів фільтрації й інтерполяції проекцій векторів швидкості, що визначаються. Проаналізовані основні джерела похибок методу PIV. Запропоновано новий метод обробки двовимірних трасерних зображень, одержуваних 2D – PIV системами. Метод базується на ітераційній побудові реконструйованого зображення на основі першого з двох послідовних знімків і пошуку оптимального розподілу переміщень вузлових точок у досліджуваній області з умови мінімуму розбіжності реконструйованого зображення й другого кадру.

Ключові слова: *трасерні зображення, метод PIV, інформаційна технологія.*

Рассмотрены основные достижения и недостатки современных информационных технологий обработки цифровых трассерных изображений. Проведен сравнительный анализ наиболее известных алгоритмов. Выполнен обзор используемых методов фильтрации и интерполяции определяемых проекций векторов скорости. Проанализированы основные источники погрешностей метода PIV. Предложен новый метод обработки двумерных трассерных изображений, получаемых 2D – PIV системами. Метод базируется на итерационном построении реконструированного изображения на основе первого из двух последовательных снимков и поиске оптимального распределения перемещений узловых точек в исследуемой области из условия минимума расхождения реконструированного изображения и второго кадра.

Ключевые слова: *трассерные изображения, метод PIV, информационная технология.*

The main advances and drawbacks of modern information technologies of tracer images processing are considered. A comparative analysis of the most well-known algorithms is accomplished. The review of the methods of filtering and interpolation of the velocity vectors projections is made. A new method of evaluation of tracer images produced by 2d – PIV systems is proposed. The method is based on iterative building of reconstructed image on basis of the first frame in sequenced pare and finding the optimal assignment of node displacements from minimum divergence condition between reconstructed image and the second frame.

Key words: *tracer images, method PIV, information technology.*

Характеристика проблеми та завдання дослідження

Для досліджень характеристик потоків рідини або газу часто застосовуються методи трассерної візуалізації. Перші спроби вивчати рух потоків рідини з використанням методів візуалізації були описані ще Леонардо Да Вінчі, який досліджував течію води у водоймах, спостерігаючи за рухом маленьких частинок на поверхні потоку. На ранніх етапах ці методи можна було використовувати для визначення якісних характеристик течій. Однією з найбільш показових вітчизняних робіт того часу є стаття [1].

Розвиток цифрової й комп'ютерної техніки, і як наслідок, використання цифрових методів реєстрації зображень і обробки даних, призвело до появи інформаційних технологій обробки трасерних зображень (фотографій маленьких часток, які додаються в рідину або газ).

Інформаційна технологія обробки трасерного зображення містить у собі метод обробки зображення, алгоритм, що реалізує заданий метод і відповідне програмне забезпечення.

Вхідними даними для інформаційної технології є трасерні зображення, що фіксуються системою реєстрації трасерів, результатом обробки є інформація про розподіл векторів швидкості потоку рідини.

Найбільш відомим методом обробки трасерних зображень є PIV (Particle Image Velocimetry). Появу терміна PIV – міжнародної назви методу цифрової трасерної візуалізації зв'язують із роботою [2], у якій метод PIV був виділений як окремий випадок методу лазерної спектрометрії LSV.

Сфера застосування інформаційних технологій обробки трасерних зображень досить велика. У медицині метод PIV використовується для вивчення руху повітря у верхніх дихальних шляхах людини, у хімічній інженерії й біотехнологіях – для вивчення мікрофлюїдних потоків, в авіаконструюванні – для вивчення руху газів на виході з двигуна. І це далеко не всі галузі науки, де застосовуються інформаційні технології обробки трасерних зображень.

Найбільш простими системами для одержання трасерних зображення є 2D PIV системи. У цих системах, вимір миттєвого поля швидкості потоку в заданому перетині заснований на визначенні переміщення часток домішки, які перебувають у площині перетину, за фіксований інтервал часу. У потік рідини або газу додаються частки малого розміру (трасери). Вимірювальною областю потоку вважається площина, яка «вирізається» світловим ножем. Частки у вимірювальній площині повинні бути освітлені мінімум двічі. Образи часток реєструються цифровою камерою. Наступна обробка зображень методом PIV дозволяє розрахувати зрушення часток за час між спалахами джерела світла й побудувати поле швидкостей. На рисунку 1 представлена система реєстрації трасерів.

Існують і інші системи для одержання трасерних зображень, такі як стереоскопічний PIV (SPIV) [3] дефокусований PIV (DDPIV) [4], мікро PIV (MPIV), і голографічний PIV (HPIV) [5].

Точність визначення поля швидкостей методом PIV у значній мірі визначається методом комп'ютерної обробки трасерних зображень. Сучасні підходи забезпечують досить хорошу точність при досить високій якості зображення, для чого потрібна дорога апаратура, включаючи імпульсні лазери з дуже коротким імпульсом (~ 10^{-8} с) і великою потужністю в імпульсі, високошвидкісну кроскореляційну цифрову камеру, а також засоби їх синхронізації. Удосконалювання інформаційних технологій обробки цифрових трасерних зображень не тільки підвищує точність побудови експериментальних полів швидкості, але й деякою мірою знижує вимоги до якості вихідних зображень, що робить метод PIV більш доступним для фахівців у самих різних галузях техніки.

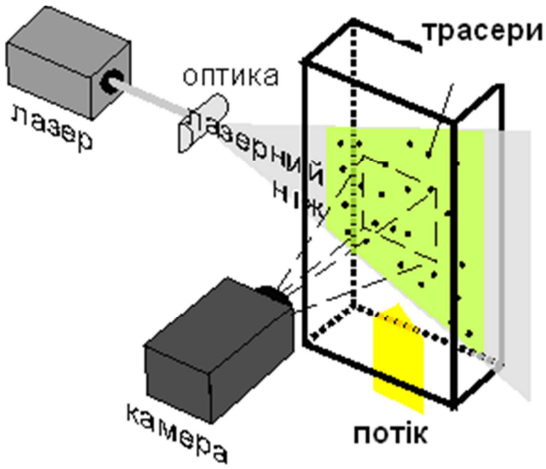

Рис. 1. 2D PIV система реєстрації трасерів

Метою даної роботи є аналіз відомих методів комп'ютерної обробки цифрових трасерних зображень і визначення нового підходу, що має істотні переваги.

Огляд інформаційних технологій обробки PIV зображень

PIV – знімки можна розділити на два типи залежно від камери й носія запису: плівковий або цифровий. Відповідно до щільності часток на зображенні PIV записи були розділені на три групи: лазерний спекл запис (LS), запис низької щільності зображення (LID) і запис високої щільності зображення (HID). В LS записі окремі зображення часток не можуть бути ідентифіковані (Рис. 2а), тоді як в LID записи окремі зображення часток можуть бути визначені й відстежени їх переміщення від кадра до кадру (Рис. 2б). В HID записах (Рис. 2в), окремі зображення часток можуть бути визначені, але їх індивідуальні переміщення відстежити важко. Різні методи обробки застосовуються до різних типів записів PIV.

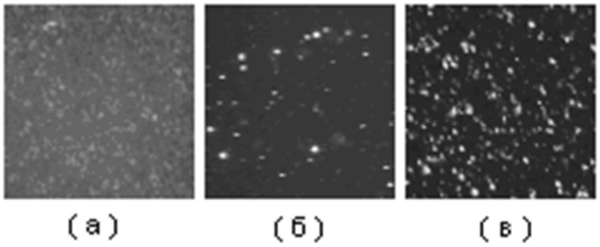

Рис 2. Приклади LS (а), LID (б) и HID (в) записів

На початковому етапі розвитку методів цифрової обробки PIV- зображень для визначення зсувів часток широко використовувався базовий кроскореляційний алгоритм [6], який надалі був названий стандартним. Стандартний алгоритм складається з наступних основних операцій (рис. 3):

а – розбиття пари зображень на елементарні розрахункові області рівного розміру;

б – розрахунок кореляційної функції;

в – пошук максимуму кореляційної функції;

г – підпіксельна інтерполяція максимуму кореляційної функції.

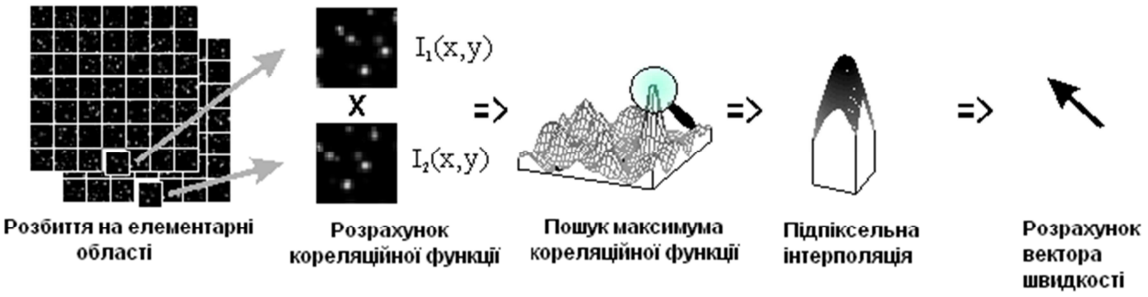

Рис. 3. Стандартний кроскореляційний алгоритм

У стандартному алгоритмі передбачається, що всі частки усередині області здійснюють однакове переміщення. У реальності це не зовсім так, в області може існувати ненульовий градієнт швидкості, що призводить до помилки визначення зсуву. Таким чином, інтерпретація просторової кореляційної функції в термінах зсуву трасерів можлива тільки для нестисливого потоку з однорідним розподілом «ідеальних» часток трасерів. Якщо ці умови не виконуються, положення максимуму кореляційної функції визначається не тільки рухом потоку, але й розподілом часток усередині нього.

Якщо взяти до уваги той факт, що в цифровій обробці зображень сигнали є дискретними, функція просторової кореляції визначається в такий спосіб:

$$R_{I_1 I_2}(m,\ n) = \sum_{i=0}^{d_x} \sum_{j=0}^{d_y} I_1(i,\ j) \cdot I_2(i+m,\ j+n)\,, \tag{1.1}$$

де I_1, I_2 – дискретна функція інтенсивності відбитого від часток і зареєстрованого камерою світла для першого й другого кадрів відповідно;

i, j – координати точки на першому кадрі;

m, n – зсув (у пікселях) у напрямку координатних осей.

Максимум кореляційної функції відповідає найбільш імовірному зсуву часток – трасерів у даній області. Для більш точного визначення координат максимуму використовується підпіксельна інтерполяція кореляційної функції в околиці її максимуму. Інтерполяція може проводитися незалежно по обом координатам, а функція, що інтерполює, може бути самою різною (наприклад, поліном другого ступеня або гауссіан). Координатою максимуму вважається координата максимуму функції, що інтерполює.

По визначеному найбільш ймовірному зсуву часток d і інтервалові часу між спалахами лазера t розраховується найбільш імовірна швидкість часток:

$$V = d \big/ \Delta t \tag{1.2}$$

Подібна операція, робиться для кожної елементарної області, на які розбивається усе поле течії. Це дозволяє розрахувати миттєве поле швидкості. Зазвичай використовується регулярне розбиття.

Автоматична обробка зображень неминуче приводить до появи помилкових векторів. Кількість помилкових векторів визначає якість вихідних даних і при оптимальних параметрах експерименту не перевищує 3-5 % від загальної кількості.

З метою зменшення похибок і помилок, а так само збільшення надійності оцінки полів швидкості застосовуються вдосконалені алгоритми обробки PIV зображень.

Для того щоб зменшити похибку обчислень базового кореляційного алгоритму, використовують дискретне зрушення вікон розбиття (discrete windows shifting, DWS). DWS – ітераційна процедура оцінки. Вона починається із застосування звичайного кореляційного алгоритму. Потім елементарна область зображення на другому кадрові зрушується на цілу кількість пікселей у напрямку руху потоку, на підставі зсуву, отриманого на попередньому кроці. І знову виконується кроскореляція вікон розбиття. DWS, як правило, включає кілька ітерацій. Адаптивний метод зрушення вікон може бути віднесений до несиметричного зсуву областей (FDI – forward difference interrogation), оскільки друге вікно розбиття зміщується в напрямку потоку, а перше залишається нерухомим. Докладна інформація про техніку дискретного FDI приводиться в [7-10]. Схема адаптивного зрушення дозволяє також використовувати різні розміри вікон розбиття на різних етапах ітерацій. Зокрема , на початку ітераційного циклу можна використовувати більші області розбиття, одержуючи при цьому переміщення зображень часток з високою надійністю, а

потім розмір вікон розбиття можна зменшувати, щоб одержати розподіл швидкостей з високою просторовою деталізацією на остаточному етапі циклу ітерацій. Техніка використання елементарних областей розбиття різного розміру була описана в [11].

Хоча метод несиметричного зсуву областей FDI у багатьох випадках приводить до значних поліпшень обробки записаних PIV зображень, усеж існують деякі потенційні помилки, які неможливо виключити застосовуючи FDI. Наприклад, визначення переміщення в потоках з великим градієнтом швидкості й визначення напрямку переміщення в потоках із кривизною ліній течії. Метод симетричного зсуву областей (central difference interrogation, CDI) уперше був представлений Wereley [12] і вивчався Meinhart [13; 14]. Він застосовувався для того, щоб уникнути недоліків несиметричного зсуву областей і підвищити точність виміру методом PIV. При використанні CDI, перше й друге вікна розбиття зміщалися вперед та назад відповідно, кожне на половину очікуваного переміщення часток. Адаптивні ітераційні методи просторового зрушення, такі як CDI і FDI, вимагають, як правило, декількох ітерацій для досягнення оптимального результату. При правильнім застосуванні CDI, звичайно, не потрібна велика кількість ітерацій для обчислення переміщень, на відміну від FDI.

Дослідження [15-19] показали, що похибки й випадкові помилки обробки цифрових PIV зображень із використанням алгоритмів, заснованих на кроскореляції, можуть бути зменшені шляхом постійного зрушення елементарних областей розбиття відповідно до даних, отриманих на попередньому кроці. Ітераційний алгоритм із дробовим значенням вектора зсуву (iterative algorithm with continuous window shifting, CWS) вимагає інтерполяції інтенсивності зображення в точках, що мають дробові координати. Хоча безперервне зрушення вікон розбиття вимагає інтерполяції значень інтенсивності пікселей зображення, яка може додати похібку в оцінку PIV зображення, оцінка загальної помилки показує її значне скорочення.

Для урахування викривлень PIV зображень при вивченні складних потоків були розроблені методи корекції зображення (Central difference image correction , CDIC). Ідея корекції зображення вперше була представлена в роботі [20] і подібні ідеї застосовувалися в [21-25]. Метод CDIC поєднує в собі ідеї методу CDI, CWS і корекцію зображення, і є в цей час найбільш точним цифровим методом обробки трасерних зображень.

Щоб зменшити число помилкових векторів, отриманих після застосування методів трасерної візуалізації, часто використовують фільтрацію. Існують різні способи фільтрації розрахованих проекцій векторів переміщення (швидкості). Але частіше інших використовуються серединний фільтр і медіанний фільтр.

Серединний фільтр є простим методом фільтрації й використовується для скорочення шуму. Основна його ідея – порівняти значення вектора із середнім значенням його сусідів, включаючи його самого. Це дозволяє виключити значення векторів, які нетипові для свого оточення. Для фільтрації звичайно використовують аналіз 9 сусідніх векторів. Існують дві основні проблеми даного методу:

– єдиний вектор з дуже нетиповим значенням може сильно впливати на середнє значення всіх сусідніх векторів;

– якщо існують яскраво виражені пікові значення векторів, то вони зазвичай згладжуються.

Зазвичай значення проекції вектора змінюється, якщо модуль різниці між ним V_i і середним значенням $\overline{V}$ більше деякого порога σ:

$$\left|V_i - \overline{V}\right| > \sigma \tag{1.3}$$

Подібно серединному фільтру, медіанний фільтр також використовує значення проекцій сусідніх векторів, щоб визначити помилкові вектори. Однак замість простого порівняння із середнім значенням, здійснюється порівняння з медіаною. Медіана обчислюється сортуванням проекцій сусідніх векторів за зростанням з наступним вибором середнього за номером значення.

Медіанний фільтр має дві важливі переваги над серединним:

– медіана більш жорстка величина, чим середнє значення, і тому один нетиповий вектор не буде справляти великого впливу на сусідів;

– не відбувається великого згладжування пікових значень.

Один з основних недоліків медіанного фільтра – великі часові витрати на обчислення, оскільки необхідно сортувати значення всіх сусідніх векторів.

Для відновлення помилкових векторів швидкості використовується інтерполяція. Основні методи інтерполяції можна поділити на детерміновані й геостатичні. Серед найпоширеніших детермінованих методів інтерполяції слід зазначити інтерполяцію сплайном, де інтервал інтерполяції розбивається на невеликі відрізки, на кожному з яких функція задається поліномом. Основні переваги: стійкість і мала трудомісткість. Найбільш гнучким і інформативним геостатичним методом є крікінг інтерполяція. У крікінг інтерполяції, кожній відомій точці присвоюється певна вага, яка потім використовується при розрахунках значень невідомих точок. Цей метод дозволяє досліджувати просторові зв'язки між даними.

Похибка методу багато в чому визначається характеристиками вимірювальної системи й параметрами експерименту. Точність виміру зсуву трасерів залежить від локальних параметрів потоку й одержуваного зображення, по якому цей зсув розраховується. Тому в загальному випадку можна вказати тільки характерне значення похибки. Основний внесок у похибку PIV вимірів вносить точність визначення переміщень часток, на які, у свою чергу, впливають наступні фактори:

1. Локальні градієнти швидкості. У випадку значних градієнтів частки усередині однієї елементарної області роблять різні переміщення. Кореляційна функція має кілька піків, які відповідають різним переміщенням часток.

2. Абсолютна величина зсуву трасерів. Внесок даної величини в похибку вимірів тем менший, чим менше її значення. При використанні ітераційних методів зсуви трасерів малі (компенсуються зсувом розрахункових областей), і похибка розрахунків зменшується в порівнянні зі стандартними методами.

3. Розмір часток на зображенні. Розмір образа повинен забезпечувати можливість якісної міжпіксельної інтерполяції з однієї сторони (більше одного пікселя) і високий ступінь локальності – з іншої.

4. Ефективна кількість часток. З урахуванням ефекту «втрати пари» ефективна кількість часток в елементарній області повинна бути оптимальною для достатньої статистики при розрахунках кореляційної функції й у той же час повинна забезпечувати високий ступінь оптичної прозорості.

5. Оптичні ефекти, пов'язані з дифракцією (розмір часток порівнянний з довжиною хвилі), різними абераціями.

6. Розмір і плавучість трасерів. Ідеальний випадок – щільності часток і середовища збігаються й розмір трасера наближається до нуля. У реальності на переміщення часток впливають сили плавучості й розміри часток.

Серед переваг існуючих інформаційних технологій обробки трасерних зображень можна відзначити наступні: відсутність впливу, що збурює, на потік, широкий динамічний діапазон вимірюваних швидкостей (500:1), можливість обробляти на звичайному персональному комп'ютері значний обсяг експериментальних даних.

Висновки

Недоліками існуючих інформаційних технологій обробки трасерних зображень є: високі вимоги до систем реєстрації трасерних зображень, що значно збільшує їхню вартість, а так само невелика точність обробки трасерних зображень із великими локальними градієнтами швидкості

На основі викладеного матеріалу, можна говорити про те, що інформаційні технології обробки трасерних зображень значно підвищили швидкість одержання й точність результатів, одержуваних методами візуалізації потоків. Але разом з тим існує й ряд проблем, про які було вже сказане вище. На даний момент ці проблеми ще не знайшли задовільного вирішення, тому досить перспективним напрямком є розробка нових методів обробки зображень трасерів, а так само вдосконалення існуючих.

Одним з таких нових напрямків може бути метод пошуку векторів зсуву на трасерном зображенні з використанням градиєнтного спуску. Основна ідея даного методу – побудова реконструйованого зображення, що має мінімальну відмінність від другого кадру. Реконструйоване зображення будується на основі першого кадру, шляхом визначення зсуву кожного пікселя трасерного зображення. При цьому використовується інтерполяція на основі значень зсуву у вузлових точках, що утворюють різницеву сітку. Для пошуку вузлових зсувів, що забезпечують мінімальну похибку порівняння реконструйованого кадру и другого кадру з пари знимків, використовується метод градієнтного спуску.

Такий підхід фактично поєднує у собі всі основні напрямки підвищення точності аналізу цифрових трасерних зображень, відзначені вище: урахування зсуву елементарних областей, корекцію зображення, урахування взаємозв'язку між переміщеннями різних точок, а також підпіксельну інтерполяцію. Це й визначає потенційні переваги цього підходу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хавахпашева Е. М. Поля скоростей турбулентных пульсаций при малых добавках к воде высокомолекулярных веществ / Е. М. Хавахпашева Б. В. Перепелица // Инженерный физический журнал.− 1968. –Т. 14. −№ 4 − С. 598
2. Adrian R. J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimentry vs. particle image velocimentry / R. J. Adrian // Appl. Opt. − 1984. – Vol. 23. – P. 1690−1691.
3. Prasad A. K Stereoscopic particle image velocimetry / A. K. Prasad // Exp. in Fluids.– 2000.– Vol. 29, № 2. – P. 103–116.
4. Willert C. E. Three-dimensional particle imaging with a single camera / C. E. Willert, M. Gharib // Exp. in Fluids.– 1992.– Vol. 12, № 6.– P. 353–358.
5. Meng H. Holographic particle velocimetry: a 3D measurement technique for vortex interactions, coherent structures and turbulence/ H. Meng, F. Hussain // Fluid Dyn. Res. – 1991. –Vol. 8. – P. 33–52.
6. Longo J. Solid/free-surface juncture boundary layer and wake / J. Longo, H. P. Huang, F. Stern // Exp. in Fluids.– 1998. – Vol. 23, № 4. – P. 283–297.
7. Willert C. E. The fully digital evaluation of photographic PIV recordings / C. E. Willert // Applied Scientific Research.– 1996. – Vol. 56, № 2–3.– P. 79–102.
9. Cowen E. A. A hybrid digital particle tracking velocimetry technique / E. A. Cowen, S. G. Monismith // Exp. in Fluids. – 1997. – Vol. 22, № 3. – P. 199–211.
10. Westerweel J. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings / J. Westerweel, D. Dabiri, M. Gharib // Exp. in Fluids. – 1997.– Vol. 23, № 1. – P. 20–28.
11. Scarano F. Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offsetand / F. Scarano, M. L. Riethmuller // Exp. in Fluids. – 1999. – Vol. 26, № 6.– P. 513–523.
12. Kemmerich T. H. Multi-level convolution filtering technique for digital laser-speckle-velocimetry / T. H. Kemmerich, H. J. Rath // Exp. in Fluids. – 1994. – Vol. 17, № 5. – P. 315–322.
13. Wereley S. T. Microfluidic PIV: Algorithms and Experiments / S. T. Wereley, C.D. Meinhart, J. G. Santiago // Amer. Phys. Soc. / Div. Fluid Dyn. Annual Meeting (Philadelphia, PA, Nov. 1998). – 1998.

14. Wereley S. T. Accuracy Improvements in Particle Image Velocimetry Algorithms / S. T. Wereley C. D. Meinhart // Proc. 10-th Int. Sym. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mech (Lisbon, Portugal). – 2000.
15. Wereley S. T. Second-order accurate particle image velocimetry / S. T. Wereley, C. D. Meinhart // Exp. in Fluids. – 2001. – Vol. 31, № 3. – P. 258–268.
16. Sjodahl M. Electronic speckle photography: increased accuracy by nonintegral pixel shifting / M. Sjodahl // Applied Optics. – 1994.– Vol. 33, № 28. – P. 6667–6673.
17. Sholl M. J. A fast Lagrangian PIV method for study of general high gradient flow / M. J. Sholl, O. Savas // 35th AIAA Aerospace. Science Meeting (Reno, NV, 6–9 Jan.). – 1997.
18. Scarano F. Advances in iterative multigrid PIV image processing / F. Scarano, M. L. Riethmuller // Exp. in Fluids. – 2000. – Vol. 29, № 1. – P. S051–S060.
19. Lecordier B. Estimation of the accuracy of PIV treatments for turbulent flow studies by direct numerical simulation of multi-phase flow / B. Lecorder, D. Demare, L. M. J. Vervisch, J. Reveillon, M. Trinite // Meas. Sci. Tech. – 2001.– Vol. 12, № 9. – P. 1382–1392.
20. Gui L. A correlation-based continuous window-shift technique to reduce the peak-locking effect in digital PIV image evaluation / L. Gui, S. T. Wereley // Exp. in Fluids. – 2002. – Vol. 32, № 4.– P. 506–517.
21. Huang H. T. Limitation and improvement of PIV / H. T. Huang, H. E. Fiedler, J. J. Wang // Exp. in Fluids. – 1993. – Vol. 15, № 4–5. – P. 263–273.
22. Tokumaru P. T. Image correlation velocimetry / P. T. Tokumaru, P. E. Dimotakis // Exp. in Fluids. – 1995. – Vol. 19, № 1. – P. 1–15.
23. Lin H. J. Improved methods for thin surface boundary layer investigations / H. J. Lin, M. Perlin // Exp. in Fluids. – 1998. – Vol. 25, № 5-6. – P. 431–444.
1. 23 Nogueira J. Local field correction PIV: on the increase of accuracy of digital PIV systems / J. Nogueira, A. Lecuona, P. A. Rodriguez // Exp. in Fluids. – 1999. – Vol. 27, № 2. – P. 107–116.
24. Nogueira J Local field correction PIV, implemented by means of simple algorithms, and multigrid versions / J. Nogueria, A. Lecuona, P. A. Rodriguez // Meas. Sci. Tech. – 2001.– Vol. 12, № 11.– P. 1911–1922.
2. 25 Scarano F. Iterative image deformation methods in PIV / F. Scarano // Meas. Sci. Tech. – 2002. – Vol. 13, № 1. – P. R1.

Рецензенти: Фісун М. Т., д.т.н., професор;
Казарєзов А. Я., д.т.н., професор

© Мочалін О. Є., Гонтовий С. В., 2010

Стаття надійшла до редколегії 08.11.2010 р.