

УДК 535.8

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

С.Н. Панов, И.К. Архипов

*ООО «ПРИМАТЕК», Россия
111250, Москва, Березовая аллея, 5А, стр.1-3, оф 104, E-mail: spanov@octava.ru*

ДЕМОНСТРАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ПОТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ PIV (PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY)

АННОТАЦИЯ

Доклад посвящен презентации малогабаритной демонстрационной учебной PIV системы визуализации потоков жидкости. Использование системы позволяет изучать различные течения, методы обработки изображений с целью получения двухмерных векторных полей скоростей потоков.

ВЕКТОРНЫЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ, АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ (PIV)

Демонстрируется учебная система Mini PIV фирмы Dantec Dynamics (Дания) для изучения низкоскоростных потоков жидкости. Система состоит из непрерывно лазера (рис.1) и оптического модуля световой завесы, который преобразует лазерный луч в плоскость световой завесы, освещающей какое-либо сечение потока. В потоке засеиваются отражающие свет полиамидные частицы. Отраженный свет от частиц регистрируется цифровой камерой в виде последовательных кадров изображений частиц в потоке с интервалом времени Δt . Вектора скоростей рассчитываются путем определения перемещения частиц ΔX между кадрами изображений. Зная время между кадрами изображений, может быть определена скорость частиц.

$$\bar{V} = \frac{\Delta \bar{X}}{\Delta t}$$

Объектив камеры проецирует область измерений на матрицу цифровой камеры. После регистрации пары последовательности изображений, последние подразделяются на области опроса. При использовании алгоритма корреляции, вычисляется кросс-корреляция этих областей, I_1 и I_2 , пиксель за пикселем. Корреляция дает пик сигнала, устанавливая общее перемещение частицы, ΔX .

Точное измерение перемещения – и, следовательно, и скорости – осуществляется путем суб-пиксельной интерполяции. Путем вычисления кросс-корреляций для каждой области опроса пары кадров изображений, зарегистрированных CCD камерой, получается карта векторов скоростей по всему полю потока.

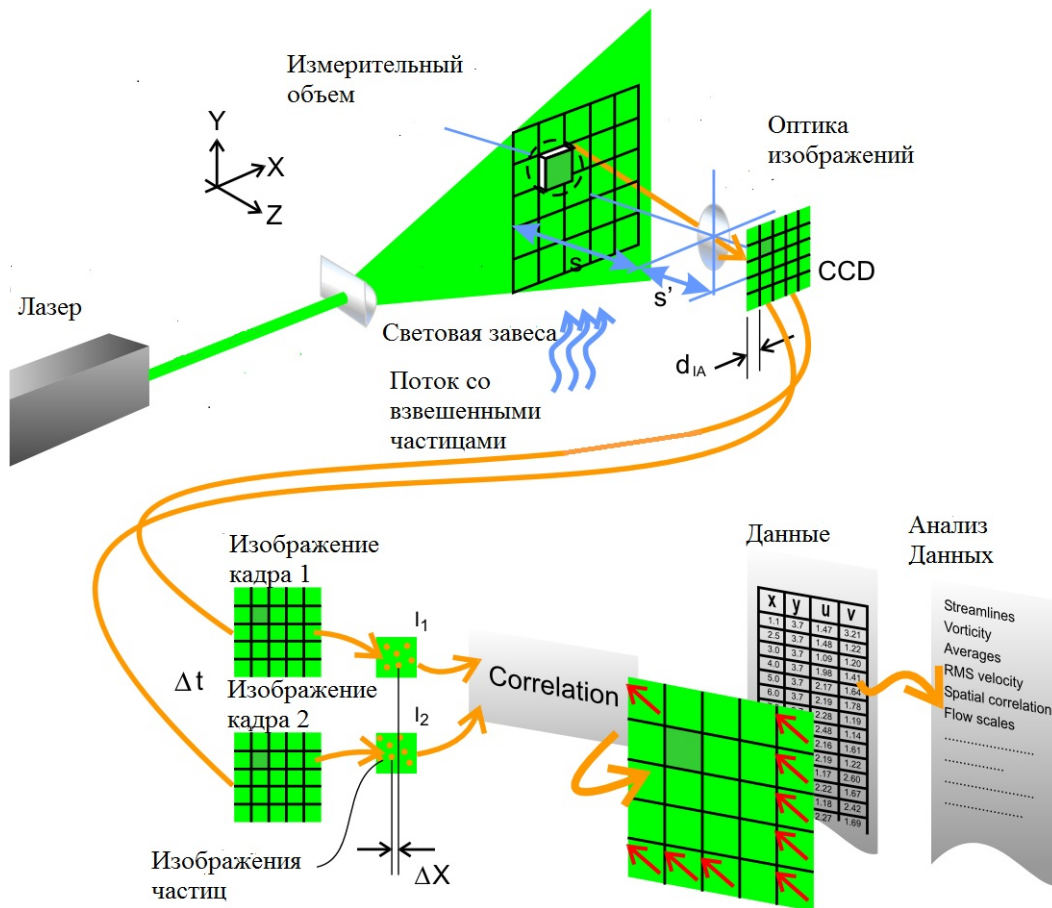


Рис.1. Оптическая схема PIV

Для получения хорошего сигнала пика кросс корреляции в каждой области опроса рекомендуется иметь от 10 до 25 частиц.

Пространственное разрешение и динамический диапазон

При проведении измерений с помощью системы PIV, ищется баланс между длиной стороны области корреляции, d_{IA} , увеличением изображения, s'/s и размерами структур потока, для их разрешения. Одним из способов достижения этого баланса является подбор такой области корреляции, чтобы градиенты скорости внутри были малы:

$$\frac{\frac{s'}{s} |V_{\max} - V_{\min}|_{IA} \cdot \Delta t}{d_{IA}} < 5\%$$

Максимальная скорость частиц ограничена тем, что за время между кадрами Δt , частица не должна выходить из области опроса, что приведет к потере корреляции изображений и потере информация о скорости. Как правило:

$$\frac{\frac{s'}{s} \cdot V \cdot \Delta t}{d_{IA}} < 25\%.$$

Зная размер области опроса, увеличение изображения и толщину световой завесы, можно определить измерительный объем.

Информация с камеры передается на компьютер, на котором программное обеспечение «Dynamic Studio» осуществляет расчет двумерных векторных карт полей скоростей потока. Перемещение частиц вычисляется с помощью метода кросс корреляции или наименьших квадратов.

Фотография установки приведена на рис.2.



Рис.2 . Фотография установки

Последовательная регистрация векторных полей во времени позволяет получить видеозапись структуры скоростей потока во времени (рис.3).



TR-PIV-вихрь-1.avi

Рис.3. Видеозапись изменения во времени векторных полей скоростей потока в жидкости.

Характеристики демонстрационной PIV системы:

- Лазер – «Ray Power», непрерывный, мощность 450 мВ, длина волны 527 нм
- Оптический модуль создает световую завесу с углом расходимости 5°
- Максимальная частота кадров используемой камеры «Flow Sense EO» – 260 Гц, разрешение 640 x 480 пикселей
- Диаметр полиамидных частиц 50 мкм
- Используемое программное обеспечение – «Dynamic Studio» компании «Dantec Dynamics»
- Поток воды создается помпой, размещенной в резервуаре с водой

Модификация установки для измерений в воздухе при больших скоростях потока использует импульсные лазеры с синхронизацией кадров камеры с импульсами лазера. Регистрация видеofilьмов изменения векторных полей скоростей потоков осуществляется высокочастотными импульсными лазерами и высокоскоростными камерами в системах с разрешением во времени (Time-Resolved PIV). Третья компонента скорости потока получается в конфигурации Stereo PIV, используя две камеры для получения стереоскопического эффекта.

Программное обеспечения «Dynamic Studio»

Программное обеспечения «Dynamic Studio» Dantec Dynamics включает библиотеки обработки изображений и реализует различные методы и алгоритмы обработки: методы корреляции изображений, адаптивной корреляции (Adaptive correlation), метод наименьших

квадратов (Least Squares Matching), использование фильтров усреднения и когерентности и других методов удаления шума, повышения качества изображений, повышения точности векторных карт, разрешающей способности и динамического диапазона анализа.

Двумерный алгоритм наименьших квадратов -Least Square Matching (LSM)

Метод LSM, реализованный в пакете программ Dynamic Studio, привносит физику потоков в обработку изображений. В отличие от метода кросс –корреляции, алгоритм LSM использует модель для описания движения элемента текучей среды, включающей 6 параметров: перемещение, масштабирование, вращение и сдвиг областей опроса. Достоинством метода является возможность расчета дополнительно, кроме скорости потока, градиентов скорости, без введения дополнительных шумов.

Фундаментальная теорема Гельмгольца гласит, что для каждого бесконечно малого движения элемента среды, оно может быть разложено на перемещение, вращение и деформацию. В классическом PIV методе на основе корреляции, 2-мерная кросс-корреляция наиболее часто применяется для выделения компонентов скорости перемещения нулевого порядка, пренебрегая членами более высокого порядков. В методе LSM оценивается сдвиг, вращение и растяжение элемента среды. В 2-мерном случае это ведет к шести параметрам преобразования, и результирующий тензор градиента перемещения включает определение таких параметров, как вращение, сдвиг и деформацию областей опроса, полученных на основе смещения частиц.

LSM алгоритм дает более надежные и точные результаты, чем алгоритм корреляции, например, в областях с большими градиентами скорости (пограничный слой), при исследовании вихрей.

Алгоритм адаптивной корреляции для обработки потока и геометрии методом «FlexPIV»

Алгоритм позволяет выполнять:

- Расчет векторов с переменным масштабом в локальных областях. Местные уточнения векторов скорости
- Близкое соответствие узлов обработки PIV с CFD узлам для сравнения данных

Алгоритм разложения по собственным функциям «Oscillating Pattern Decomposition» (OPD)

- Инновационный метод для анализа энергетических мод по пространственно-временным данным
- Алгоритм описывает доминирующие динамические механизмы при использовании эффективного удаления шума с помощью совершенной POD фильтрации
- Алгоритм определяет режимы стабильности, восприимчивости и чувствительности мод флуктуаций скорости
- Возможность прямого применения в аэродинамическом проектировании
- Алгоритм работает с данными PIV (TR-PIV), PLIF, СТА как и с другими пространственно – временными данными.

Измерения скоростей в объеме Volumetric PIV

- Три различных метода обработки: «Volumetric Particle Tracking Velocimetry», «Tomographic PTV» и «3D Least Squares Matching»

Система рекомендуется для использования в учебных, демонстрационных и научных целях.