

На правах рукописи



Токарев Михаил Петрович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В
МЕТОДАХ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Учреждении РАН Институте теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Научный руководитель Маркович Дмитрий Маркович
 доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Меледин Владимир Генриевич
 доктор технических наук

Резник Александр Львович
доктор технических наук

Ведущая организация Институт систем информатики
 им. А.П. Ершова СО РАН

Защита состоится « » июня 2010 г. в часов на заседании
диссертационного совета Д 003.005.01 в Институте автоматике и
электрометрии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад.
Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматике
и электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан «11» мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф-м.н.



Насыров К.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Для широкого спектра практических и фундаментальных задач по моделированию нестационарных турбулентных реагирующих потоков необходимо использование новейших методов как математического описания, так и измерения физически значимых параметров. Современные подходы, такие как DNS, LES, позволяющие разрешать напрямую существенную часть турбулентного спектра и моделировать развитие нестационарных пространственных структур, имеют экспериментальные аналоги для диагностики полей скорости. Эти экспериментальные методики позволяют на высоком уровне достоверности проводить верификацию существующих и разрабатываемых моделей и получать необходимую информацию для их замыкания.

Метод цифровой трассерной визуализации, или анемометрии по изображениям частиц (общепринятое международное название PIV – Particle Image Velocimetry) широко используется в настоящее время в основе высокоточных оптических измерительных систем (ИС) для измерения мгновенных полей скорости потоков в лабораторных условиях. В отличие от одноточечных методов, анемометрия по изображениям частиц позволяет выполнять мгновенные полевые измерения и, тем самым, получать пространственные распределения скорости в измерительной области потока. Дальнейшая обработка пространственных распределений скорости позволяет рассчитывать широкий набор характеристик, таких как статистические и пространственные дифференциальные характеристики, пространственные и пространственно-временные корреляции и т.д. Характерной особенностью метода PIV является широкий динамический диапазон измеряемых скоростей, что дает ему преимущества при исследовании вихревых турбулентных течений.

Метод PIV применяется также в прикладных научных исследованиях, главным образом, для изучения процессов обтекания и оптимизации формы транспортных аппаратов в авиационной, ракетно-космической, судостроительной и автомобильной промышленности для уменьшения энергетических затрат связанных с трением, для уменьшения шума. Также метод используется в энергетике, химической, нефтегазодобывающей промышленности, машиностроении для исследования и оптимизации физических процессов в тепломассообменных аппаратах. В медицине анемометрия по изображениям частиц применяется при физическом моделировании работы искусственных сосудов и клапанов, дыхательной системы человека.

Пространственное разрешение, динамический диапазон и погрешность измерения скорости методом PIV зависит не только от характеристик используемого оборудования, но и в существенной степени от применяемых алгоритмических подходов для обработки изображений частиц. В связи с этим актуальным является оптимизация существующих и разработка новых алгоритмов обработки PIV изображений частиц. Одним из методов оценки параметров расчетных процедур для обработки изображений частиц, наряду с традиционным анализом результатов обработки экспериментальных данных, является проведение вычислительного эксперимента. В рамках численного эксперимента создаются синтетические изображения частиц с заранее известными характеристиками потоков, PIV измерения в которых они моделируют. Данный метод позволяет исследовать поведение алгоритма в широком диапазоне изменения параметров входных данных, например, концентрации и размера частиц, величины скорости и градиентов скорости в потоке и др.

К моменту начала работы над диссертацией зарубежными специалистами были заложены основы стандартных методов расчета полей скорости по изображениям частиц. Однако малый динамический диапазон измеряемых скоростей и пространственное

разрешение стандартных корреляционных методов ограничивали их применение для исследования широкого класса турбулентных течений. Перспективные адаптивные итерационные кросскорреляционные методы обработки были не достаточно исследованы. В связи с этим актуальным вопросом является структурное и функциональное моделирование таких методов для более детального исследования их свойств и ограничений.

Создание надежной ИС требует систематического тестирования как алгоритмической части на соответствие заявленным оптимальным характеристикам, так и функционального тестирования и контроля качества ПО в целом. Актуальность данной задачи для ПО, создающегося для обработки изображений частиц, полученных методом PIV, подтверждают три проведенных международных тест-симпозиума PIV Challenge в 2001, 2003, 2005 годах, в которых принимали участие ведущие научные центры и университеты Европы и США, а также известные мировые производители оборудования для диагностики потоков LaVision, Dantec и TSI.

Несмотря на то, что основы стробоскопической визуализации потоков закладывались в СССР, начиная с 60-х годов 20-го столетия, в России до 2005 года не производили коммерческие ИС на основе метода PIV. В настоящее время данная индустрия находится в процессе интенсивного развития и в России, в частности, с использованием основных результатов данной диссертации. Для обеспечения конкурентоспособности производимого оборудования необходимо развитие методов обработки изображений и пакетов прикладных программ.

Целью диссертационной работы является разработка и практическая реализация современных высокоточных алгоритмов обработки данных, полученных в эксперименте с применением методик PIV и Stereo PIV, для работы в составе программного обеспечения ИС на основе полевых методов оптической диагностики потоков.

Задачи исследований:

- разработка и реализация адаптивных кросскорреляционных методов обработки изображений частиц для расчета двухкомпонентных полей скорости в сечении потока. Создание эффективных методов калибровки оптической стереосистемы и методов стереореконструкции трехкомпонентных полей скорости в сечении потока;
- создание ПО для ИС на основе полевых методов оптической диагностики потоков для управления процессом проведения эксперимента, хранения и обработки экспериментальных данных. Архитектура ПО должна учитывать специфику оптических методов диагностики потоков: большой объем первичных экспериментальных данных, большие затраты вычислительных ресурсов при обработке данных;
- разработка методики проверки и создание программных инструментальных средств тестирования алгоритмов обработки данных для указанной выше ИС как на основе входных данных, полученных численным моделированием, так и на реальных экспериментальных данных.

Методы исследования. Для решения указанных задач использовались методы математического моделирования и вычислительного эксперимента, математическая статистика и математический анализ, цифровая обработка изображений, аналитическая геометрия, элементы теории алгоритмов, объектно-ориентированный анализ и дизайн ПО, компонентно-ориентированное программирование и др.

Научная новизна работы.

- Разработан эффективный адаптивный итерационный кросскорреляционный алгоритм для расчета полей скорости в потоке по изображениям частиц. Адаптивность метода выражается в выборе положения точек измерения и геометрии расчетных областей в зависимости от локальной концентрации частиц и структуры потока. В алгоритме реализована схема расширенной фильтрации полей скорости между итерациями. По результатам тестирования применение алгоритма позволяет расширить динамический диапазон измеряемых скоростей до 1:200, повысить пространственное разрешение измерения полей скорости в 2-4 раза и увеличить точность измерения смещения частиц на изображении с 0,1 до 0,04 пикс по сравнению со стандартными методами.
- Предложен улучшенный алгоритм исправления ошибочных векторов на основе метода коррекции ошибок на корреляционной плоскости. Метод позволяет устранить систематическую ошибку определения смещения частиц, присущую оригинальному подходу, для точек измерения с градиентами смещения частиц больше 0,1 пикс/пикс и корректирует большее количество ошибочных векторов за счет коррекции по двум ортогональным направлениям.
- Предложен адаптивный кросскорреляционный подход с расчетом локальной концентрации частиц для предварительной фильтрации точек измерения от потенциальных ошибочных векторов, которые сложно фильтровать стандартными методами. Это позволило вычислять пространственные распределения пульсаций скорости для потоков с неоднородным засевом частицами во времени и пространстве. Дополнительным достоинством данного подхода является уменьшение времени обработки данных до 30% за счет предварительного отсева части точек измерения.
- Разработана методика проверки и создана инструментальная система тестирования алгоритмов обработки данных для метода цифровой трассерной визуализации.

Практическая ценность

К числу практически важных результатов относится создание в составе авторского коллектива программного обеспечения ActualFlow для промышленного образца измерительного комплекса ПОЛИС на основе методов анемометрии по изображениям частиц (PIV, PTV, Stereo PIV, Tomo PIV, Micro PIV), лазерной индуцированной флуоресценции (LIF, PLIF), цифрового анализа интерферограмм газокапельных потоков (PI). Измерительный комплекс находится на стадии опытного производства малыми сериями и является первым и в настоящее время единственным коммерческим прибором данного типа, производимым в России (www.polis-instruments.ru). На данный момент осуществлено внедрение 18 ИС в различные научные и учебные организации России: ОИВТ РАН, МЭИ (ТУ) г. Москва; СПбГУ, СПбГПУ г. Санкт-Петербург; ЦАГИ г. Жуковский; ВНИИПО МЧС России г. Балашиха; КГТУ им. А.Н. Туполева (КАИ), ИЦПЭ КазНЦ РАН г. Казань; ИМСС УрО РАН, ПГУ, ПГТУ г. Пермь, ИСЭМ СО РАН г. Иркутск; ИТПМ СО РАН, НГУ и др., а также Институт теплофизики СО РАН г. Новосибирск, где был разработан измерительный комплекс. Изготовленное оборудование применяется в указанных учреждениях для обучения специалистов методам оптической диагностики потоков и в исследовательских целях для изучения обтекания моделей в аэродинамических трубах, изучения характеристик струйных течений, исследования торнадо, изучения методов тушения пожаров, изучения кавитационных явлений и др.

На разработанное программное обеспечение имеется два свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте: №. 2003610699 “Библиотека

расчета и обработки полей скорости, полученных методом цифровой трассерной визуализации (RusPIVLib)” (2003 г.), №. 2006610317 “Система управления экспериментом и обработкой данных, полученных методом цифровой трассерной визуализации (ActualFlow)” (2006 г.), где в списке авторов указан автор диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту

- Использование пространственной фильтрации полей скорости и расчетных областей, получаемых на промежуточных этапах итерационного кросскорреляционного алгоритма, позволяет управлять сходимостью алгоритма и пространственным разрешением рассчитываемых распределений скорости. Наибольшее увеличение пространственного разрешения наблюдается при применении оконных фильтров для расчетных областей изображения, а сглаживание поля скорости, используемого для смещения расчетных областей, приводит к явному ухудшению сходимости алгоритма.
- Метод исправления ошибочных векторов на основе подхода коррекции ошибок на корреляционной плоскости устраняет систематическую ошибку смещения частиц, за счет определения величины смещения частиц по текущей, а не вспомогательной корреляционной плоскости. Оптимальное количество дополнительных областей в методе коррекции ошибок равно двум и дальнейшее увеличение их числа не приводит к существенному уменьшению количества ошибочных векторов.
- Предварительная фильтрация ошибочных векторов на основе критерия отсева по величине локальной концентрации частиц на изображении позволяет вычислять пространственные распределения пульсаций скорости для турбулентных потоков с неоднородным засевом частицами во времени и пространстве.
- Проверка алгоритмов обработки данных для цифровой трассерной визуализации на основе набора формальных и специальных критериев дает возможность контролировать качество процедур обработки данных и быстро проверять пригодность новых модификаций алгоритмов.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и отечественных конференциях и семинарах: VIII, IX, X Всероссийской конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Новосибирск, 2004, 2006, 2008); Всероссийской школы-семинара молодых ученых "Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии" (Новосибирск, 2007); IX и X Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков" (Москва, 2007, 2009); II и III международном тест-симпозиуме PIV Challenge (Корея, 2003; США, 2005); 6, 7 и 8 международном симпозиуме Particle Image Velocimetry (США, 2005; Италия, 2007; Австралия, 2009); XIII международном симпозиуме по визуализации потоков (Франция, 2008); XIII международной конференции по применению лазерных технологий в механике жидкости (Португалия, 2006).

Публикация результатов работы. По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ [1*-15*], из них 4 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК [1*-4*] и глава в монографии [5*].

Личный вклад автора. Все научные результаты, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Основная часть работы изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков и 5 таблиц, список литературы, включающий 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, определены цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, и структура диссертации.

Глава 1 диссертации содержит обзор литературы. В обзоре представлена история развития метода анемометрии по изображениям частиц и алгоритмов обработки изображений для диагностики потоков, начиная с ранних экспериментальных работ, проводимых в ИТ СО РАН с применением "стробоскопической визуализации" в 60-х годах прошлого столетия, до наших дней. Рассматривается обзор методов расчета полей скорости для ИС в двухкомпонентной конфигурации, показано развитие методов анемометрии для стереоскопической конфигурации. Отдельный параграф первой главы посвящен современным исследованиям методов расчета полей скорости по изображениям частиц в России. В главе также представлен исчерпывающий список существующих в мире программных систем для метода PIV. Рассмотрено программное обеспечение коммерческих систем и свободное программное обеспечение, созданное специалистами, использующими методы оптической диагностики потоков.

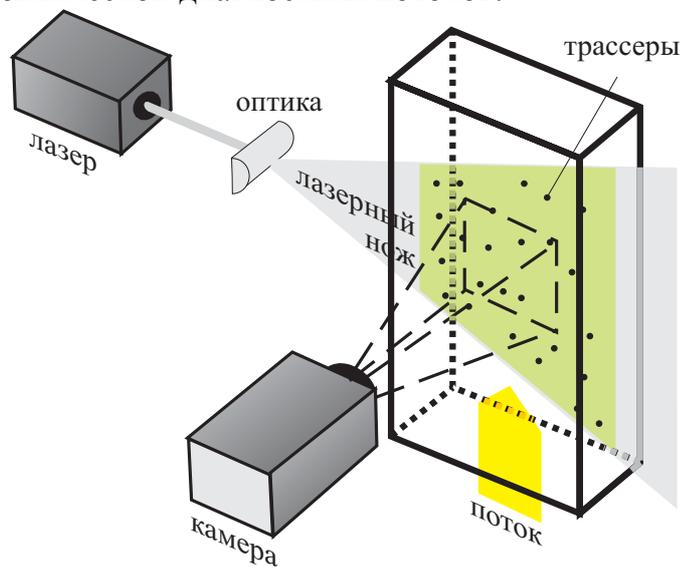


Рис. 1 Схема метода PIV

Глава 2 диссертации содержит методическое описание метода анемометрии по изображениям частиц для измерения скорости в двухкомпонентной конфигурации. Суть метода PIV состоит в измерении перемещения, которое совершают частицы (трассеры) на изображениях измерительной области потока между двумя последовательными вспышками лазера с известной временной задержкой между ними (см. рис. 1). В процессе обработки данных записанные пары изображений разбиваются на элементарные расчетные области. Для вычисления смещения группы частиц внутри малой расчетной области используется корреляционный анализ. В начале главы обзорно рассматриваются базовые этапы стандартного кросскорреляционного алгоритма для определения смещения частиц по изображениям измерительной области потока: методы расчета функции пространственной корреляции, применение оконных и частотных фильтров, подпиксельная интерполяция смещения частиц. Далее описывается математическая модель создания синтетических изображений частиц, которые применяются для проверки качества процедур расчета полей скорости.

Векторное поле, которое получается в результате обработки изображения частиц, может содержать некоторое количество ошибочных векторов [1]. Появление таких векторов связано с низким уровнем полезного сигнала, что приводит к неверному определению максимального пика на корреляционной плоскости. Для исправления

ошибочных векторов используют специальную процедуру коррекции ошибок [2]. Суть метода состоит в поэлементном перемножении таблиц корреляционных функций для текущей расчетной области и дополнительной области, пространственно смещенной относительно первой (см. рис. 2). При этом любые значения корреляционной функции, которые не появляются в обеих плоскостях, представляют собой случайные корреляции, не являющиеся полезным сигналом, и устраняются из итоговой вспомогательной корреляционной плоскости.

Недостатком оригинального метода является искажение формы главного пика при значительной разнице величины смещения в текущей и вспомогательной областях. Однако это компенсируется уменьшением числа неверных векторов по сравнению с количеством ошибочных векторов без коррекции ошибок в среднем на 70%. В диссертации рассмотрено влияние количества дополнительных областей на эффективность коррекции ошибочных векторов. Тестирование на экспериментальных данных показало, что оптимальное количество дополнительных областей равно двум и дальнейшее увеличение их числа не приводит к существенному уменьшению количества ошибочных векторов. Причем оптимальное положение второй дополнительной области получается при повороте первой области относительно текущей на 90° . При этом коррекция реализуется по двум взаимноперпендикулярным направлениям, что увеличивает вероятность получить большее отношение сигнал/шум. Предложен новый метод, позволяющий устранить систематическую ошибку определения смещения частиц, которая появляется вследствие искажения формы главного пика при использовании оригинальной процедуры коррекции ошибок. Он отличается тем, что поиск главного пика ведется на текущей корреляционной плоскости в ограниченной области ± 1 пикс от главного максимума, найденного на вспомогательной корреляционной плоскости (см. рис. 2). В этом случае погрешность определения скорости в текущей точке измерения остается на прежнем уровне.

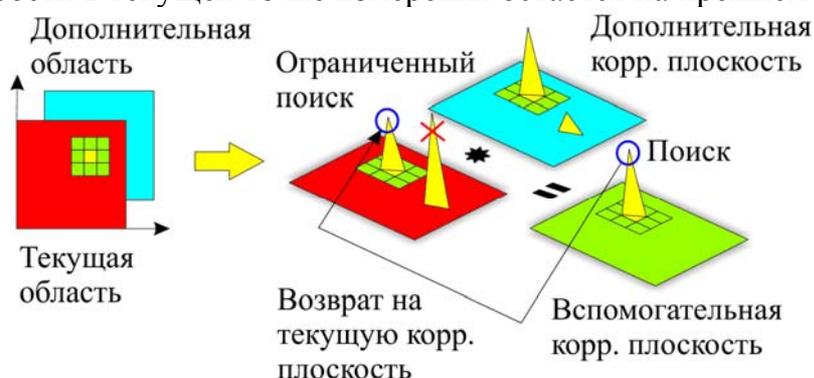


Рис. 2 Схема метода коррекции ошибок с ограниченным поиском пика на текущей корреляционной плоскости

Для уменьшения ограничений стандартных корреляционных методов по динамическому диапазону и пространственному разрешению рассчитываемых полей скорости применяются адаптивные подходы обработки изображений частиц [3]. Суть адаптивной схемы обработки состоит в изменении поведения алгоритма в зависимости от особенностей входных данных. Адаптивный метод, исследованный в работе, является итерационным. На каждой новой итерации k оценивается уточняющая поправка \mathbf{v}_c^k к полю скорости \mathbf{v}^{k-1} , полученному на предыдущей итерации. С использованием текущего приближения $\mathbf{v}^k = \mathbf{v}^{k-1} + \mathbf{v}_c^k, k \in \mathbb{N}, \mathbf{v}^0 = 0$, компенсируется смещение трассеров на исходных изображениях и вычисляется остаточное смещение, уточняющее текущую аппроксимацию. Наиболее важным элементом итерационного алгоритма является компенсация смещения частиц на изображении. Она достигается выбором расчетных областей на первом и втором кадре изображения, смещенных друг относительно друга:

$$f = I_1(x_0 - \mathbf{v}_x^{k-1}(x, y)/2, y_0 - \mathbf{v}_y^{k-1}(x, y)/2); g = I_2(x_0 + \mathbf{v}_x^{k-1}(x, y)/2, y_0 + \mathbf{v}_y^{k-1}(x, y)/2),$$

где f, g - расчетные области, используемые для вычисления кросскорреляции, (x_0, y_0) - координаты точки, в которой рассчитывается скорость, (x, y) - координаты элементов изображения внутри расчетной области. Выбирая подходящий порядок малости поправки смещения \mathbf{v} , можно получить различные модификации адаптивных алгоритмов. Поправка нулевого порядка соответствует одновременному смещению всех элементов области на один и тот же вектор (CWS – continuous window shifting – схема). Первый порядок точности учитывает градиент скорости внутри расчетной области (CWD – continuous window deformation – схема). Если для смещения элементов области используются дробные значения смещения, то необходимо использовать интерполяционную схему для восстановления интенсивности изображения в положениях с дробными координатами. Согласно исследованию, проведенному в работе [1*], наиболее оптимальной схемой интерполяции для итерационного корреляционного алгоритма по точности расчета смещения частиц и времени обработки является двумерный кубический В-сплайн (см. рис. 3).

В диссертации проведен анализ погрешности стандартного и итерационного кросскорреляционных алгоритмов по синтетическим изображениям с известным смещением частиц. Получены зависимости систематической β , случайной σ и полной ошибки δ расчета смещения частиц от различных параметров: величины смещения частиц d , диаметра частиц на изображении d_p , концентрации частиц на изображении N_p , типа интерполяционной схемы, числа итераций для методов CWS, CWD и времени расчета.

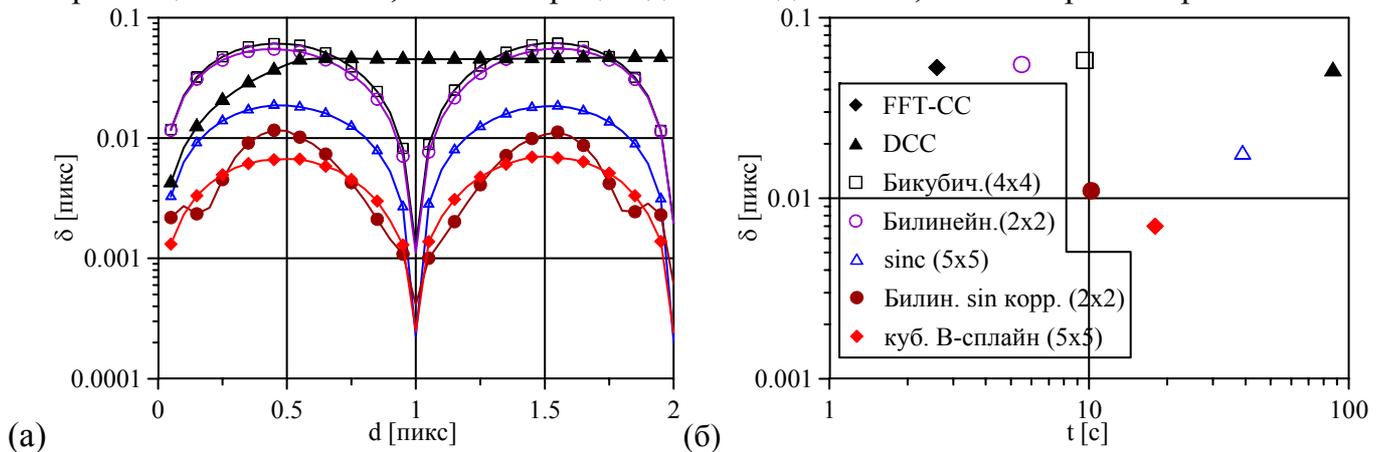


Рис. 3 Полная ошибка δ итерационного алгоритма (CWS) в зависимости от величины дробного однородного смещения частиц в диапазоне от 0 до 2 пикс для различных интерполяционных схем (а). Время расчета поля скорости и полная ошибка в зависимости от интерполяционной схемы (б). Данные приведены в сравнении со стандартным алгоритмом (FFT-CC – расчет кросскорреляции через БФП; DCC – прямой расчет кросскорреляции); $N_p = 0,075$ част/пикс², $d_p = 3$ пикс

Пространственное разрешение является одним из важных параметров в методе PIV. Это связано с пространственным усреднением смещения частиц внутри отдельной элементарной измерительной области. Пространственное разрешение измерения скорости определяется как размером измерительной области, выбираемой во время проведения эксперимента, так и размером элементарной расчетной области во время обработки изображений частиц. Уровень пространственного разрешения существенно влияет на величину измеренных турбулентных характеристик высшего порядка — статистических моментов пульсаций скорости, уровня диссипации турбулентной кинетической энергии и т.д. Особенно существенное влияние пространственное разрешение оказывает на характеристики, связанные с дифференцированием исходных полей скорости [4]. По

теореме Найквиста минимальный разрешаемый масштаб в потоке при измерениях методом PIV ограничен снизу удвоенным размером элементарной расчетной области. Ограничение на размер расчетной области снизу возникает вследствие уменьшения отношения сигнал/шум для областей с низкой концентрацией частиц. В общем случае передаточная функция измерительной системы на основе метода PIV может быть представлена выражением

$$T(\mathbf{k}, \omega) = \frac{U(\mathbf{k}, \omega)}{U_0(\mathbf{k}, \omega)} = \text{sinc}\left(\frac{k_x M}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{k_y N}{2}\right) \frac{\Delta Z_0}{4} \exp\left(-\frac{k_z^2 \Delta Z_0^2}{32}\right) \text{sinc}\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right),$$

где $U(\mathbf{k}, \omega), U_0(\mathbf{k}, \omega)$ - фурье-образы для рассчитанной и истинной компоненты скорости $u(\mathbf{x}, t)$ и $u_0(\mathbf{x}, t)$, \mathbf{k} - вектор волнового числа и ω - частота, соответствующие пространственно-временным флуктуациям скорости в расчетной области потока. Таким образом, имеет место усреднение не только по площади расчетной области $M \times N$, но также по толщине лазерного ножа ΔZ_0 и по времени задержки между импульсами лазера Δt . В одномерном стационарном приближении при $M = F$ и фиксированных остальных параметрах передаточная функция для стандартного корреляционного алгоритма с весовой функцией «прямоугольного окна» совпадает с передаточной функцией линейного КИХ-фильтра скользящего среднего, которая в одномерном случае выглядит как $T(k) = \text{sinc}(kF/2) = T(k_F) = \sin(\pi k_F) / \pi k_F$, где $k_F = Fk/2\pi$ - безразмерное волновое число, нормированное на линейный размер области F . Передаточная функция стандартного алгоритма с произвольной весовой функцией $W(x)$ совпадает с передаточной функцией соответствующего фильтра $T_W(k_F)$, где $T_W(k_F)$ - пространственный фурье-спектр функции $W(x)$. Теоретическое выражение для передаточной функции итерационного алгоритма можно найти в работе [5]. В диссертации получено выражение для передаточной функции итерационного алгоритма с расширенной пространственной фильтрацией промежуточных полей скорости и расчетных областей, получаемых между итерациями: поля предсказания \mathbf{v}^{k-1} , корректирующего поля скорости \mathbf{v}_c^k и поля компенсации смещения, которое используется для смещения расчетных областей. На основе проведенного численного моделирования показано, что применение итерационного подхода позволяет повысить пространственное разрешение метода.

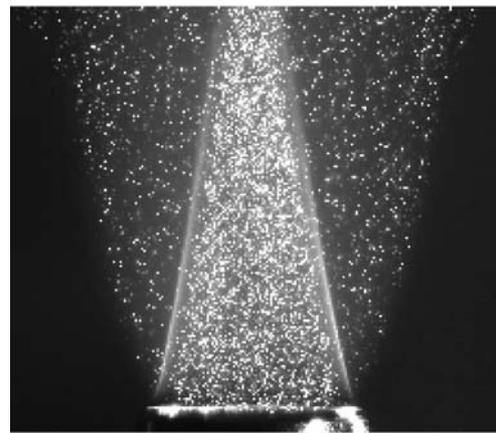
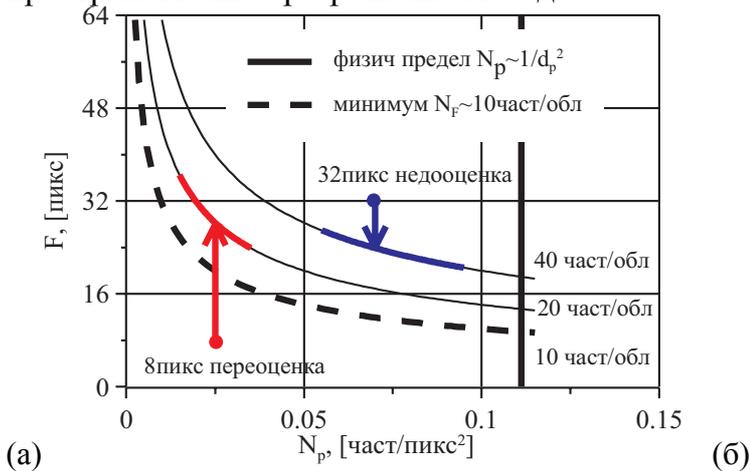


Рис. 4 Автоматический выбор размера расчетной области F в зависимости от концентрации частиц N_p по кривым $N_F = const$ для PIV изображений с неоднородной концентрацией частиц (а). Начало каждой стрелки на графике показывает предварительную оценку для F . Пример неоднородной концентрации на изображении частиц - второй кадр из пары изображений частиц для пламени Бунзеновской горелки (б)

В главе также рассмотрены обобщенные адаптивные алгоритмы, позволяющие в зависимости от качества изображений частиц выбирать положение и геометрию расчетной области для получения поля скорости. Пространственное разрешение PIV метода, как и вероятность определения правильного смещения частиц, напрямую зависит от уровня полезного сигнала на экспериментальных изображениях. Количественной характеристикой сигнала в данном случае является локальная концентрация частиц N_p на единицу площади изображения. Для расчета N_p в точке измерения выбирается тестовая область заданного размера с центром в этой точке и вычисляется количество попавших в нее частиц методом, применяемым обычно в алгоритмах расчета поля скорости посредством слежения за отдельными частицами [10*]. Традиционно точки измерения скорости внутри измерительной области выбираются на регулярной прямоугольной сетке. Такой подход является приемлемым в большинстве случаев, однако для PIV изображений с неоднородной концентрацией частиц, а также при наличии областей с вихревыми структурами или иными особенностями потока, есть смысл задаться некоторой плотностью точек измерения $\rho(x, y) \geq 0$. Это позволит не проводить лишних вычислений в тех точках, где уровень сигнала заведомо мал, либо не представляет интереса вследствие однородности течения и, наоборот, увеличить разрешение в остальных областях потока. В диссертации рассмотрено решение задачи выбора положения точек измерения на изображении частиц по функции плотности вероятности $\rho(i, j)$, заданной на дискретной сетке. В работе [6] приведено решение этой задачи для непрерывной функции $\rho(x, y)$. Положения точек измерения с заданной плотностью вероятности $\rho(i, j)$ моделируются методом Монте-Карло по двумерной дискретной функции распределения с помощью двух независимых случайных величин с непрерывным равномерным распределением. В каждой точке измерения (i, j) можно также изменять размер расчетной области F , основываясь на $\rho(i, j)$, которая в данном случае будет иметь смысл отношения сигнал/шум на изображении или, например, масштаба флуктуаций скорости. Для вычисления размера расчетной области использовалось соотношение $F = \sqrt{N_F / N_p}$, где N_F - количество частиц на расчетную область. На рис. 4, а показана диаграмма для автоматического определения размера расчетной области F по локальной концентрации частиц $N_p(i, j)$ и заданному значению $N_F = const$.

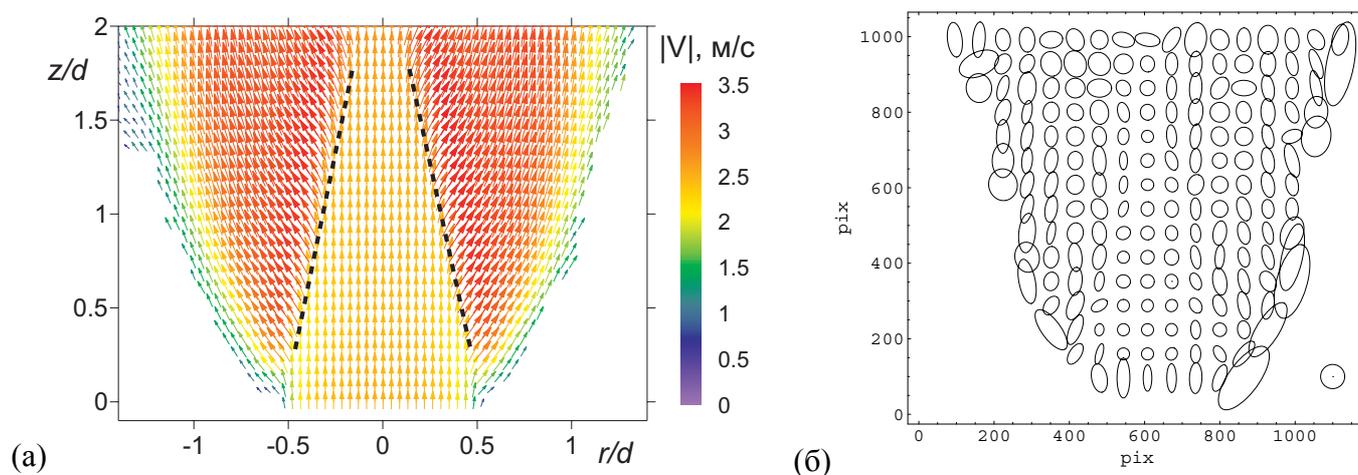


Рис. 5 Пространственное распределение средней скорости в центральном сечении для пламени Бунзеновской горелки, пунктирной линией изображена область фронта пламени (а); распределение формы и ориентации эллиптических расчетных областей на регулярной сетке для мгновенной картины течения, области размером $F > 64$ пикс не показаны, в нижнем правом углу для примера область с $F=32$ пикс (б)

В диссертации было предложено использовать адаптивный кросскорреляционный подход с расчетом локальной концентрации частиц для предварительной фильтрации точек измерения от потенциальных ошибочных векторов, которые сложно отсеять стандартными методами [1], что позволило вычислять пространственные распределения пульсаций скорости для потоков с неоднородным засеваемыми частицами во времени и пространстве. Дополнительным достоинством данного подхода является уменьшение времени обработки данных до 30% за счет предварительного отсева части точек измерения.

Дальнейшее увеличение пространственного разрешения корреляционных методов возможно за счет использования свойств неизотропности потока. В работе описан метод эллиптических расчетных окон, предложенный [7]. Для каждой расчетной области переменного размера используется асимметричная весовая функция Гаусса с горизонтальным сечением в виде эллипса разной формы и ориентации (см. рис. 5, б). Ориентация эллиптической области задана направлением минимума кривизны поля скорости \mathbf{l}_{\min} , растяжение области пропорционально отношению кривизны по главным направлениям $\mathbf{r}_{\max} / \mathbf{r}_{\min}$. Данный подход был успешно применен для обработки данных PIV эксперимента по изучению потока реагирующей пропано-воздушной газовой смеси на выходе из сопла (см. рис. 4 б; рис. 5 а, б).

Глава 3 диссертации посвящена методике измерения полей скорости методом PIV в стереоскопической конфигурации. Обсуждаются условия на значения параметров эксперимента при проведении измерений: толщина лазерного ножа и глубина резкости объектива камеры. Приведено описание разработанной процедуры геометрической калибровки камеры применительно к диагностике потоков методом PIV. Необходимо отметить, что процесс калибровки камеры в оптических методах измерения является неотъемлемой частью не только для Stereo PIV, но и томографических измерений скорости Tomo PIV [8], [15*], а также для комбинированных PIV/LIF и PIV/PLIF методов. Разработанная процедура калибровки камеры основана на фотограмметрическом подходе с элементами самокалибровки, который в отличие от методов калибровки по точкам схода и чистой самокалибровки позволяет получить более высокую точность.

Калибровочные объекты, рассматриваемые в диссертации, представляют собой плоскость или набор параллельных плоскостей с нанесенными круглыми маркерами в узлах декартовой координатной сетки. Привязка положений распознанных опорных точек к декартовой координатной сетке — одна из важных задач, решаемых во время процедуры калибровки. Привязка осложняется значительными линейными искажениями координатной сетки опорных точек при наблюдении с малых расстояний $d_0 < 0,5$ м под большими углами $\theta > 45^\circ$, а также тем, что плоскость калибровочной мишени может быть повернута на произвольный угол относительно нормали к поверхности мишени. В этом случае сохраняются только линии, состоящие из опорных точек, и не сохраняется параллельность соседних линий. Для решения задачи привязки к координатной сетке автором диссертационной работы был предложен подход поэтапной репроекции опорных точек на изображении в мировую систему координат $OXYZ$ с нормировкой на расстояние между опорными точками, начиная с центрального маркера на периферию изображения. В этой новой системе координат соседние линии из опорных точек становятся практически параллельными в локальной области и координаты опорных точек близки к целочисленным значениям. Эффективность предложенного алгоритма распознавания образов маркеров и привязки их к координатной сетке подтверждена на реальных экспериментальных изображениях, а также синтетических изображениях, полученных моделированием реалистичных изображений калибровочной мишени методом трассировки лучей. При этом учитывалась реальная геометрия, типичные параметры

камеры, а также использовались близкие к реальным образцам 3D модели компланарной и трехуровневой мишеней.

Центральная проекция круглых маркеров калибровочной мишени приводит к искажению их формы. При дальнейшем определении центра маркера на изображении методом центра масс эта процедура дает неверное положение центра исходного объекта [9] (см. рис. 6, а). Ошибка определения центров опорных точек, в свою очередь, может приводить к ошибочной оценке параметров камеры. В связи с этим, в качестве опорных точек калибровочных объектов предпочтительнее использовать пересечения прямых. Однако изготовление таких мишеней технологически более сложно, поэтому наиболее эффективный путь сводится к оптимизации использования мишеней с круглыми маркерами. В данной работе методом численного моделирования проведена оценка ошибки определения центра круглых маркеров для типичных параметров оптической системы и калибровочных мишеней, используемых для калибровки камер в экспериментах.

При типичных значениях параметров съемки: расстояние от камеры до объекта $d_0 = 750$ мм, фокусное расстояние объектива $f = 50$ мм и диаметр маркера $d_m = 2$ мм с линейным размером проекции маркера на изображении 30 пикс ошибка определения центра равна 0,005 пикс, что меньше ошибки лучших современных алгоритмов по определению положения опорных точек на изображении $err = 0,02$ пикс. По полученной зависимости ошибки определения центра круглого маркера от диаметра маркера можно сделать вывод, что при данных параметрах оптической системы приемлемо использовать калибровочные объекты с диаметром круглых маркеров не более $d_m = 4 - 6$ мм.

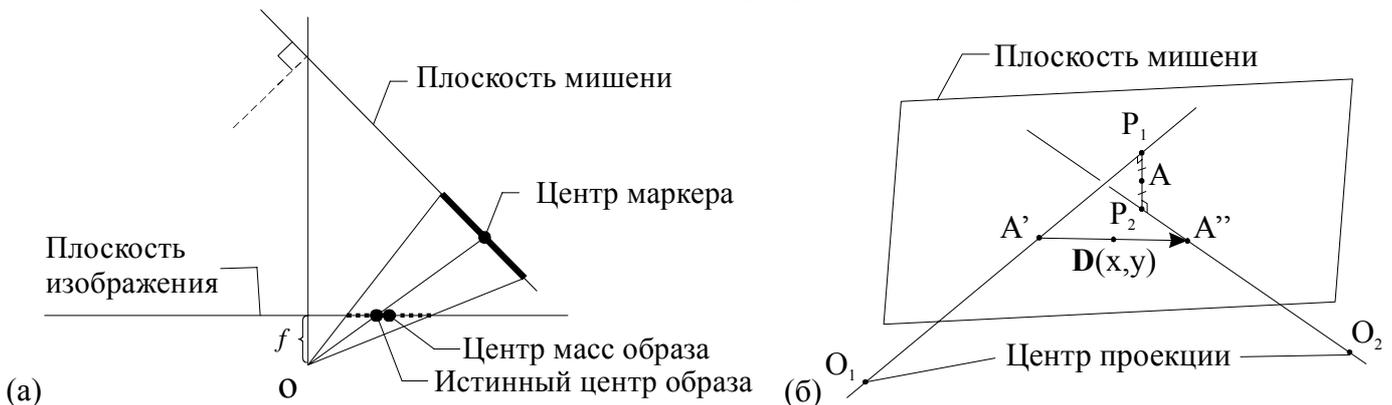


Рис. 6 Схема возникновения ошибки определения центра круглого маркера (а), использование диспаратета $D(x, y)$ при коррекции калибровки методом триангуляции (б)

Один из источников погрешности измерения скорости при проведении экспериментов с использованием метода Stereo PIV связан с рассогласованием плоскостей калибровочной мишени и лазерного ножа [10,11], так как в процессе проведения калибровки камер измерительной системы сложно совместить плоскости с хорошей точностью. Пусть частица в потоке, расположенная в плоскости лазерного ножа, находится в точке A и плоскость калибровочной мишени не совпадает с плоскостью измерения (см. рис. 6, б). В этом случае после проекции изображения частицы с левой камеры в плоскость калибровочной мишени она попадет в точку A' . Аналогично в точку A'' попадет изображение частицы с правой камеры. При объединении данных о скорости частиц с правой и левой проекций появится ошибка, так как в каждой конкретной точке реконструированной измерительной области будут присутствовать данные, взятые из разных точек физического объема. Для исключения этого эффекта нужно знать точное положение плоскости калибровочной мишени относительно плоскости лазерного ножа и в процессе реконструкции проводить репроекцию данных в плоскость лазерного ножа. В работе рассмотрено решение задачи по коррекции калибровки камеры для частного случая

и в общем случае. Частный случай подходит для большинства измерений и определяется следующими условиями: размер измерительной области много меньше расстояния до камеры $L \ll d_0$ и камеры расположены перпендикулярно измерительной области в вертикальной плоскости ($\varphi = 0$). Решение задачи коррекции калибровки для частного случая совпало с решением, полученным другим методом, приведенным в работе [11]. Для расчета коррекции калибровки используется поле диспарантности $\mathbf{D}(x, y)$. Поле диспарантности рассчитывается следующим образом: стереопара изображений частиц, фиксирующая область потока в один и тот же момент времени, репроецируется в мировую систему координат. По репроецированной стереопаре кросскорреляционным алгоритмом вычисляется поле значений диспарантности для сопряженных точек (A', A'') на регулярной сетке. Для уменьшения влияния случайных ошибок берется среднее из нескольких десятков независимых измерений $\overline{\mathbf{D}(x, y)}$. Решение задачи коррекции калибровки для общего случая основано на триангуляции и вычислении координат точек, лежащих в плоскости лазерного ножа A_i , по набору сопряженных точек (A'_i, A''_i). Дополнительно в данной главе представлен анализ погрешности калибровки камеры и краткий обзор существующих программных реализаций процедуры калибровки камеры.

В данной главе также описаны два подхода к стереорекострукции трехкомпонентных полей скорости в измерительном сечении потока: на основе репроекции изображений, который впервые был описан в работе [12] и метод локальных градиентов модели камеры, представленный в работе [13]. В диссертации проанализированы достоинства и недостатки каждого метода. По результатам сравнения двух методов реконструкции можно сделать вывод, что оба метода по суммарной погрешности работают примерно одинаково. Наибольшее различие между двумя описанными методами стереорекострукции скорости заключается в удобстве и простоте использования стереорекострукции на основе расчета локальных градиентов модели камеры.

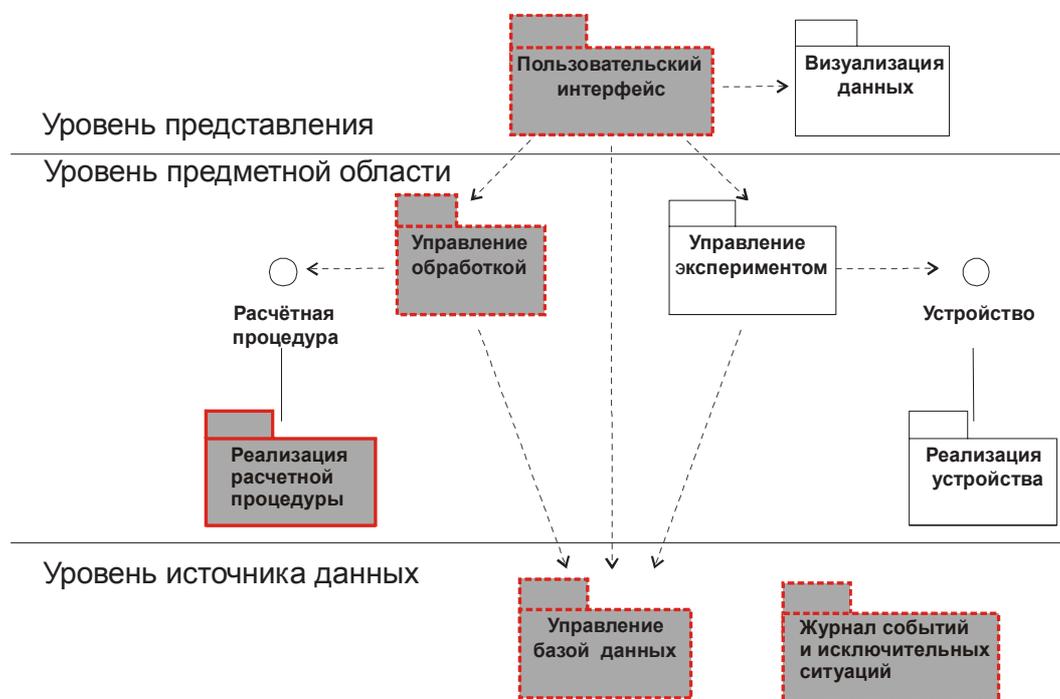


Рис. 7 Послойное представление системы. Серым помечены пакеты, в разработке которых участвовал автор. Пакеты, обведенные пунктиром, созданы в результате совместной работы

Глава 4 диссертации содержит описание ПО ActualFlow для управления ИС ПОЛИС, реализующей методы оптической диагностики потоков PIV, PTV (Particle Tracking

Velocimetry), LIF (Laser Induced Fluorescence), PLIF (Planar LIF), Stereo PIV, Tomo PIV (Tomographic PIV), IPI (Interferometric Particle Imaging). Достоинством ПО, созданным в рамках данной работы, является возможность для конечного пользователя самостоятельного расширения его функциональности за счет интегрирования в систему новых алгоритмов обработки данных и модулей управления оборудованием. С точки зрения информационных технологий ActualFlow представляет собой сложный программный комплекс с распределенной модульной архитектурой. Разбиение системы на модули соответствует классическому делению программного обеспечения на три основных логических слоя (см. рис. 7). В качестве основных единиц декомпозиции ПО можно выделить следующие:

- пользовательский интерфейс с возможностью визуализации данных;
- подсистема управления экспериментом;
- подсистема обработки данных, включающая модуль управления обработкой и набор готовых расчетных процедур (алгоритмов);
- подсистема хранения данных с возможностями импорта/экспорта данных.

В зависимости от задач пользователя ПО может комплектоваться алгоритмами обработки данных, которые разбиты на группы по методам диагностики. Пользователю предоставляются открытые интерфейсы (API) расчетной процедуры и устройства с документацией и примерами реализации собственных расширений, что делает систему гибкой и расширяемой. ПО реализовано на языке программирования C++ для работы под управлением операционных систем (ОС) семейства Windows 2000/XP/Vista.

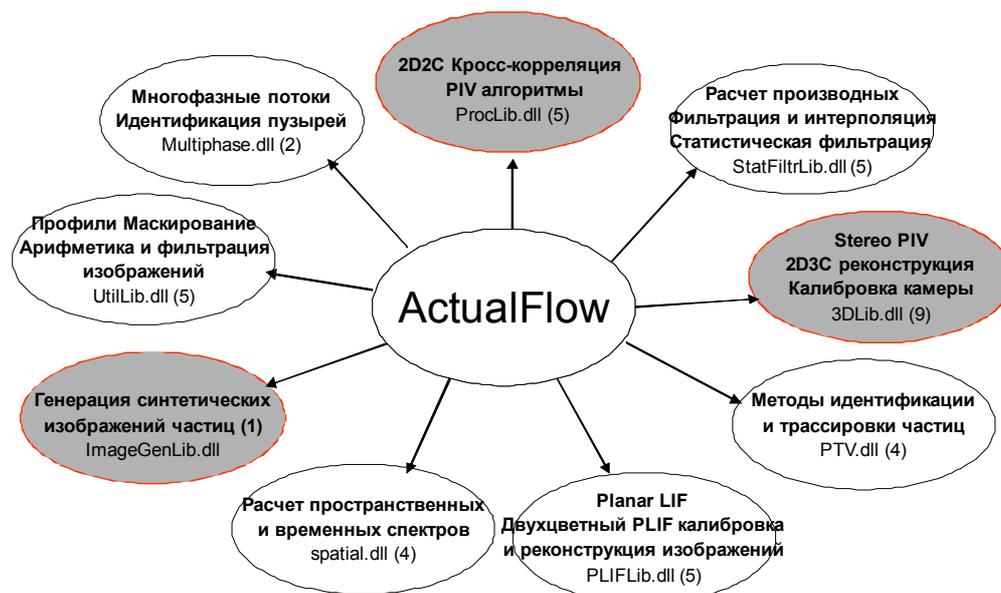


Рис. 8 Набор библиотек алгоритмов ПО ActualFlow. Серым помечены библиотеки, созданные автором работы

Во втором разделе главы описывается подсистема обработки данных. На рис. 8 серым цветом отмечены библиотеки алгоритмов ПО ActualFlow, которые были созданы автором. Отличительной особенностью библиотек алгоритмов является их широкая повторная используемость в виде готовых бинарных компонентов за счет реализации алгоритмов в виде COM объектов. В разделе представлено комплексное решение организации системы обработки данных. Модуль управления обработкой выбирает стратегию работы с конкретным алгоритмом на основе типа алгоритма. Тип алгоритма определяет протокол обмена данными: количество входных и выходных данных и их типы.

Преимуществом ПО перед аналогичными системами является описание конфигураций обмена данными в XML файле, интерпретируемом во время запуска программы, поэтому добавление новых типов алгоритмов возможно без изменения кода программы ActualFlow. В ПО ActualFlow реализована возможность составлять цепочки из расчетных процедур так, что выходные данные предыдущего алгоритма автоматически передаются на вход следующего. Это автоматизирует процесс пакетного расчета данных и уменьшает количество действий, выполняемых пользователем в интерфейсе программы. Модуль управления спроектирован таким образом, чтобы задействовать все процессорные ядра локального компьютера, а также все вычислительные мощности группы удаленных компьютеров, участвующих в распределенной обработке. Для организации распределенных вычислений использовались высокоуровневые средства сетевого взаимодействия ОС Windows. Реализованная многопоточная модель обработки группы данных (по одному потоку на данное) существенно упрощает разработку пользовательских расчетных процедур за счет переноса кода синхронизации потоков в модуль управления обработкой. В этом случае реализация алгоритма может иметь всего лишь один поток управления и полностью использовать вычислительные ресурсы современных многоядерных процессоров.

Пятая глава диссертации посвящена тестированию созданных алгоритмов в рамках второго и третьего международных тест-симпозиумов PIV Challenge 2003, 2005 и примерам использования разработанного ПО в составе ИС ПОЛИС. Полное описание набора тестов и результатов тестирования, полученных участниками тест-симпозиумов, опубликовано в работах [14,15]. Среди участников можно отметить известные университеты, научные центры Франции и Германии, а также ведущих мировых производителей ИС для диагностики потоков: LaVision, Dantec и TSI. В тестовые наборы входили изображения частиц из реальных экспериментов и синтетические PIV изображения частиц, полученные методом численного моделирования. В результате симпозиумов были определены перспективные алгоритмические решения для расчета полей скорости по изображениям частиц. Российская команда, в которой принимал участие автор диссертационной работы, вошла в десятку участников с лучшими результатами по алгоритмам для двухкомпонентной конфигурации PIV и в тройку участников с лучшими результатами по алгоритмам для метода Stereo PIV.

Также в пятой главе представлены результаты физических экспериментов, полученные с использованием созданного ПО. Эксперименты проведены в лаборатории физических основ энергетических технологий Института теплофизики СО РАН при непосредственном участии автора работы. Впервые в России была проведена диагностика мгновенных полей скорости для неизотермического реагирующего течения методом PIV. Для обработки экспериментальных данных применялся описанный в Главе 2 адаптивный кросскорреляционный метод расчета мгновенных полей скорости, основанный на анализе локальной концентрации трассеров на PIV изображениях [2*]. Дополнительно в работе представлены результаты измерения поля скорости в прямом микроканале прямоугольного сечения методом Micro PIV и трехмерного трехкомпонентного поля скорости в закрученной турбулентной струе методом Tomo PIV с применением оптической томографии. Измерение мгновенных полей скорости в объеме потока методом Tomo PIV также выполнено впервые в России.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Создан адаптивный итерационный кросскорреляционный алгоритм с расширенной фильтрацией для расчета полей скорости в потоке по изображениям частиц. По результатам тестирования использование данного алгоритма позволяет расширить динамический диапазон измеряемых скоростей до 1:200, повысить пространственное разрешение измерения полей скорости в 2-4 раза и увеличить точность измерения смещения частиц на изображении с 0,1 до 0,04 пикс по сравнению со стандартными корреляционными методами.
2. Создан улучшенный алгоритм исправления ошибочных векторов на основе метода коррекции ошибок на корреляционной плоскости. Метод позволяет устранить систематическую ошибку определения смещения частиц, присущую оригинальному подходу, для точек измерения с градиентами смещения частиц больше 0,1 пикс/пикс и корректирует большее количество ошибочных векторов за счет коррекции по двум ортогональным направлениям.
3. Предложен и реализован адаптивный кросскорреляционный алгоритм, позволяющий рассчитывать поля скорости для потоков с неоднородным засевом частицами во времени и пространстве. Метод отличается от существующих алгоритмов тем, что он позволяет проводить предварительную фильтрацию ошибочных векторов скорости в точках измерения по величине локальной концентрации частиц.
4. Проведено моделирование ошибки определения центра круглого маркера калибровочной мишени, связанной с перспективными искажениями. Показано, что при диаметре маркера не более 4-6 мм и типичных значениях параметров оптической системы в методе Stereo PIV данным видом ошибки можно пренебречь.
5. Предложен и реализован метод коррекции калибровки камер стереосистемы при измерении полей скорости методом Stereo PIV. Ошибка калибровки оптической системы возникает при неверном совмещении плоскостей калибровочной мишени и лазерного ножа, который определяет плоскость измерения. Данный метод отличается от существующих тем, что он позволяет проводить коррекцию калибровки при ненулевых углах обзора камер в вертикальной плоскости.
6. Разработана архитектура подсистемы обработки и создано ПО ActualFlow для управления ИС на основе методов оптической диагностики потоков PIV, Stereo PIV, PTV, LIF, PLIF, IPI, Tomo PIV, Micro PIV. Созданное ПО отличается от аналогичных систем возможностью расширения новыми расчетными процедурами и новыми устройствами по типу надстроек, динамической конфигурацией новых типов алгоритмов, режимом параллельной обработки группы данных, повторной используемостью компонентов, реализующих алгоритмы.
7. Проведено всестороннее тестирование созданных алгоритмов для методов измерения PIV и Stereo PIV на модельных синтетических и реальных изображениях частиц, в том числе в рамках международных тест-симпозиумов PIV Challenge 2003, 2005. Во время тестирования проведено структурное и функциональное моделирование адаптивного корреляционного алгоритма расчета полей скорости по изображениям частиц для анализа его свойств и ограничений.
8. С применением разработанных методов проведен цикл экспериментов по измерению пространственных распределений скорости в турбулентных газозаженных пламенах методом Stereo PIV, что впервые позволило получить информацию о динамике крупномасштабных вихревых структур в зависимости от параметров эксперимента.
9. Созданное ПО используется в составе ИС ПОЛИС, которая была внедрена в 18 научных и учебных организациях на территории России.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1*] Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии.— 2007.— Т. 12.— С. 109–131.
- [2*] Исследование газодинамической структуры потока в закрученном турбулентном пламени стереоскопическим методом цифровой трассерной визуализации / В. М. Дулин, Ю. С. Козорезов, Д. М. Маркович, М. П. Токарев // Вестник НГУ. Серия: Физика.— 2009.— Т. 4.— С. 30–42.
- [3*] Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) / Е. К. Ахметбеков, А. В. Бильский, Ю. А. Ложкин и др. // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии.— 2006.— Т. 7.— С. 79–85.
- [4*] Маркович Д. М., Токарев М. П. Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии.— 2008.— Т. 9.— С. 311–326.
- [5*] Маркович Д.М., Токарев М.П., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для метода Particle Image Velocimetry // в монографии Современные оптические методы исследования потоков. Под ред. Б.С.Ринкевичуса. – М.: Оверлей. – 2009. – С.180-205.
- [6*] Токарев М. П. Разработка алгоритмов обработки изображений для методики PIV // Тезисы VIII Всероссийской конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики".— Новосибирск: 2004.—6-8 октября.
- [7*] Application of Stereo-PIV to determination of turbulent kinetic energy balance in free jet / A. V. Bilsky, V. M. Dulin, D. M. Markovich, M. P. Tokarev // Proc. 13th Int. Symp. on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics.— Lisbon, Portugal: 2006.—26-29 June.
- [8*] Токарев М. П. Разработка алгоритмов расчета полей скорости для методики STEREO-PIV // Тезисы IX Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики".— Новосибирск: 2006.—17-20 октября.
- [9*] Токарев М. П. Точность и пространственное разрешение адаптивных алгоритмов обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости в потоках жидкости и газа // Оптические методы исследования потоков: Труды IX Международной научно-технической конференции / Под ред. Ю. Н. Дубнищева, Б. С. Ринкевичуса.— М.: Издательский дом МЭИ, 2007.— С. 238–241.
- [10*] Akhmetbekov Y. K., Markovich D. M., Tokarev M. P. A novel correction algorithm for PTV // Proc. 7th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry.— Italy, Rome: 2007.—11-14 September.
- [11*] Stereo-PIV measurements of turbulent characteristics in a quasi two-dimensional jet flow / V. M. Dulin, D. M. Markovich, M. P. Tokarev, M. V. Shestakov // Proc. 7th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry.— Italy, Rome: 2007.—11-14 September.
- [13*] Stereo PIV diagnostics of swirling propane flames / V. M. Dulin, Y. S. Kozorezov, D. M. Markovich et al. // Proc. of 13th Int. Symp. On Flow Visualization (paper on CD).— Nice, France: 2008.—1-4 July.
- [14*] Токарев М. П., Дулин В. М., Козорезов Ю. С. Применение кросскорреляционного алгоритма с адаптивной выборкой для измерения скорости в закрученных пламенах методом STEREO PIV // Тезисы X Всероссийской школы-конференции молодых

ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики".— 2008.

- [15*] Исследование эффективности алгоритма томографической реконструкции при различных параметрах регистрации для измерения полей скорости в объеме потока методом Томо PIV / А. В. Бильский, В. А. Ложкин, Д. М. Маркович, М. П. Токарев // Оптические методы исследования потоков: Труды X Юбилейной Международной научно-технической конференции / Под ред. Ю. Н. Дубнищева, Б. С. Ринкевичуса.— М.: Издательский дом МЭИ, 2009.— С. 136–139.

Список цитируемой литературы

- [1] Westerweel J., Scarano F. Universal outlier detection // *Exp. Fluids*. — 2005. — Vol. 39. — Pp. 1096–1100.
- [2] Hart D. P. PIV error correction // *Exp. Fluids*. — 2000. — Vol. 29. — Pp. 13–22.
- [3] Scarano F., Riethmuller M. L. Advances in iterative multigrid PIV image processing // *Exp. Fluids*. — 2000. — Vol. Suppl. — Pp. S51–S60.
- [4] Foucaut J. M., Carlier J., Stanislas M. PIV optimization for the study of turbulent flow using spectral analysis // *Meas. Sci. Technol.* — 2004. — Vol. 15. — Pp. 1046–1058.
- [5] Astarita T. Analysis of interpolation schemes for image deformation methods in PIV: effect of noise on the accuracy and spatial resolution // *Exp. Fluids*. — 2006. — Vol. 40. — Pp. 977–987.
- [6] Theunissen R., Scarano F., Riethmuller M. L. An adaptive sampling and windowing interrogation method in PIV // *Meas. Sci. Technol.* — 2007. — Vol. 18. — Pp. 275–287.
- [7] Scarano F. Theory of non-isotropic spatial resolution in PIV // *Exp. Fluids*. — 2003. — Vol. 35. — Pp. 268–277.
- [8] Tomographic particle image velocimetry / G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, B. W. van Oudheusden // *Exp. Fluids*. — 2006. — Vol. 41. — Pp. 933–947.
- [9] Heikkilä J., Silvén O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction // *Proc. of int. conf. on computer vision and pattern recognition*. IEEE Computer Society Press. — Toronto: 1997. — Pp. 1106–1112.
- [10] Coudert S. J. M., Schon J. P. Back-projection algorithm with misalignment corrections for 2D3C stereoscopic PIV // *Meas. Sci. Technol.* — 2001. — Vol. 12. — Pp. 1371–1381.
- [11] S-PIV comparative assessment: image dewarping+misalignment correction and pinhole+geometric back projection / F. Scarano, L. David, M. Bsibsi, D. Calluud // *Exp. Fluids*. — 2005. — Vol. 39. — Pp. 257–266.
- [12] Willert C. Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows // *Meas. Sci. Technol.* — 1997. — Vol. 8. — Pp. 1465–1479.
- [13] Soloff S. M., Adrian R. J., Liu Z.-C. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry // *Meas. Sci. Technol.* — 1997. — Vol. 8. — Pp. 1441–1454.
- [14] Stanislas M., Okamoto K., Kähler C. J. Main results of the second international PIV challenge // *Exp. Fluids*. — 2005. — Vol. 39. — Pp. 170–191.
- [15] Main results of the third international PIV challenge / M. Stanislas, K. Okamoto, C. J. Kähler, J. Westerweel // *Exp. Fluids*. — 2008. — Vol. 45. — Pp. 27–71.

Подписано к печати 07.05.10

Формат 60x84/16

Объем 1,1 печ.л.

Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано в Институте теплофизики СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 1