

На правах рукописи



Ахметбеков Ербол Калкенович

**АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ
ПОТОКОВ**

05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2011

Работа выполнена в Учреждении РАН Институте теплофизики
им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН

Научный руководитель доктор физико-математических наук
Маркович Дмитрий Маркович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Нежевенко Евгений Семенович

кандидат физико-математических наук
Мурзин Федор Александрович

Ведущая организация Институт теоретической и прикладной
механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Защита состоится «__» декабря 2011 года в _____ часов на заседании дис-
сертационного совета Д 003.005.01 в Учреждении РАН Институте автома-
тики и электрометрии СО РАН, по адресу: 630090, Новосибирск, проспект
Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения РАН Ин-
ститута автоматики и электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан «__» ноября 2011 г.

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



Насыров К.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие нефтегазового и аэрокосмического комплексов, энергетики и атомной промышленности связано с решением широкого спектра практических и фундаментальных задач по моделированию нестационарных турбулентных многофазных потоков. Современные методы исследования течений предполагают применение методов математического моделирования, основанные на результатах натурного наблюдения. К возможным объектам исследования можно отнести обтекаемые аппараты: самолеты, гидрокостюмы, снаряды и т.д.; узлы гидропроводов; форсунки горелочных устройств; расходомеры и т.д.

Для проведения фундаментальных исследований потоков требуется развивать высокоточные экспериментальные подходы наряду с методами математического моделирования и вычислительного эксперимента. Полученные детальные экспериментальные данные позволят верифицировать результаты численного моделирования, а также развивать новые комплексные математические модели для описания сложных однофазных и многофазных турбулентных течений. Развитие современных экспериментальных методов исследования сопряжено с необходимостью анализа все больших объемов первичных данных. Информационное обеспечение экспериментального метода, включая хранение и визуализацию данных, а также обработку данных современными алгоритмами, становится одним из важных составляющих современных исследований.

Для диагностики нестационарных потоков, а также для получения информации о пространственно-временных корреляциях, необходимо измерение мгновенных характеристик потока одновременно в массиве точек. Наиболее перспективный класс оптических методов измерения основывается на количественной визуализации течения при помощи лазерного ножа. Для измерения поля скорости подобным способом в прозрачную среду помещаются светоотражающие частицы малого размера. Камера, расположенная перпендикулярно лазерному ножу, регистрирует отраженный от поверхности частиц свет на сенсор камеры. Компьютерный анализ пары мгновенных изображений частиц, полученных таким образом и зарегистрированных с малым промежутком времени между кадрами, позволяет рассчитать смещения частиц за время между кадрами. Результатом такой обработки является поле скорости в плоскости, освещенной лазерным ножом. Корреляционная обработка изображений частиц называется Particle Image Velocimetry (PIV). Исходные изображения разбиваются на прямоугольные элементарные области, для каждой из которых рассчитывается поле кросс-корреляции изображений на первом и втором кадрах. Положение пика на корреляционной плоскости соответствует наиболее вероятному смещению частиц за время между кадрами. В результате получается поле скорости с векторами в узлах сетки. Другой класс алгоритмов основывается на слежении за каждой отдельной частицей (Particle Tracking Velocimetry - PTV). Слежение подразумевает распознавание образов частиц и применение процедуры поиска пары образов одной и той же частицы на двух кадрах. Таким образом, каждой частице на изображении сопоставляется свой рассчитанный вектор скорости. Алгоритмы слежения за частицами, в отличие от методов корреляционного анализа, обладают высоким пространственным разрешением и применимы к потокам с неоднородным засевом. В то же время применение алгоритмов слежения ограничено в

связи с малой точностью определения смещений частиц и большим количеством неверных векторов для нерегулярных данных.

Изучение гидродинамики пузырьковых потоков остается актуальной задачей в связи с малым количеством экспериментальных методик, позволяющих получать надежные данные, в особенности для нестационарных течений. Существующие методы исследования не позволяют получать информацию о взаимодействии фаз. В частности, совместные (газ-жидкость) статистические моменты пульсаций скорости и газосодержания необходимы для замыкания математических моделей многофазных течений.

Измерительные системы (ИС) на основе методов количественной лазерной визуализации получили широкое распространение благодаря своим уникальным свойствам, таким как бесконтактность и возможность получения мгновенного распределения характеристик. За последние два десятилетия были созданы методы, позволяющие измерять: скорость в плоскости и в объеме, поля температур и концентраций, дисперсный состав, карту толщин в пленочных течениях и др. Однако постоянное увеличение производительности вычислительной техники и цифровых регистрирующих систем требует совершенствования существующих и создания новых алгоритмов для обработки и анализа информации, получаемой в физическом эксперименте, и создание на этой основе конкурентоспособных отечественных измерительных систем нового поколения.

Целью диссертационной работы является разработка современных высокоточных алгоритмов и программных средств обработки данных, полученных в ходе эксперимента по диагностике одно- и двухфазных потоков с применением методов количественной лазерной визуализации.

Задачи исследований:

- разработка и реализация алгоритмов обработки экспериментальных изображений, полученных методами количественной лазерной визуализации, для расчета двумерных полей скорости в сечении потока путем слежения за частицами в потоках однофазных и двухфазных сред;
- создание алгоритмических подходов распознавания образов частиц дисперсной фазы в пузырьковых потоках и статистической обработки данных;
- разработка программного комплекса в рамках созданной измерительной системы для управления и автоматизации процесса проведения гидрогазодинамического эксперимента, хранения и обработки данных.

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

Научная новизна:

- Для методов определения полей скорости по анализу смещения частиц (слежения за частицами) предложен новый алгоритм отсева неверных векторов на основе фильтра скользящего среднего в применении к нерегулярным данным. Проведено детальное исследование влияния корреляционной коррекции вектора смещения на точность и пространственное разрешение метода слежения за частицей.

- Предложен способ использования предварительно рассчитанного поля скорости для улучшения точности релаксационного алгоритма слежения за частицами.
- Разработаны подходы для анализа PIV изображений при диагностике потоков с гиперзвуковыми скоростями в условиях естественного засева. Впервые рассчитаны поля скорости в гиперзвуковой импульсной аэродинамической трубе ИТ-302.
- Предложен корреляционный алгоритм для идентификации образов пузырей, полученных методом PFBI (Planar Fluorescence for Bubble Imaging) с применением оптимизационных схем. Предложен и реализован алгоритм слежения за пузырями на основе критерия корреляционного подобия с применением корреляционной коррекции вектора смещения. Предложен способ расчета статистических характеристик в двухфазном потоке. Впервые получены взаимные корреляции пульсаций компонент скорости газовой и жидкой фаз в свободной газонасыщенной струе.

Достоверность работы созданных алгоритмов подтверждена оценкой величины погрешности измерений, постановкой вычислительных экспериментов, сравнением рассчитанных данных с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов.

Практическая ценность. В составе коллектива создан первый отечественный измерительный комплекс для исследования потоков методами цифровой трассерной визуализации. Измерительный комплекс внедрен в ряде институтов РАН и университетах России (ИТПМ СО РАН; ОИВТ РАН; ИСЭМ СО РАН; ИМСС УрО РАН; ИТ СО РАН; ЦАГИ(г. Жуковский); Казанский НЦ ПЭ РАН; СПбГУ; КГТУ(КАИ); СПбГПУ; ПГУ; МЭИ; ВНИИПО МЧС России) для проведения исследований в области аэро- и гидродинамики.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 7th International Symposium on Particle Image Velocimetry (Рим, Италия, 2007 г.), 13th International Symposium on Flow Visualization (Ницца, Франция, 2007 г.), 9-й и 10-й международных научно-технических конференциях "Оптические методы исследования потоков" (Москва, 2007 г., 2009 г.), 14th Workshop on Transport Phenomena In Two-Phase Flow (Bansko, Bulgaria, 2010 г.), Всероссийской школе-семинаре молодых ученых "Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии" (Новосибирск, 2007 г.), Всероссийской молодежной конференции "Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей" (Новосибирск, 2008 г.), Конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2008 г.) XLII, XLIII, XLIV и XLV Международных научных студенческих конференциях "Студент и научно-технический прогресс" (Новосибирск, 2004 г., 2005 г., 2006 г., 2007 г.), а также на различных научных семинарах и совещаниях.

Публикации. Соискатель имеет 21 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации 21, работ, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 5.

Личный вклад автора. Автором были сформулированы технические требования к создаваемому измерительному комплексу, осуществлена реализа-

ция программного обеспечения для автоматизации процессов проведения эксперимента, сбора, хранения, визуализации и обработки данных, реализация модулей управления оборудованием. Автором были предложены и реализованы алгоритмы построения поля скорости путем слежения за частицей и алгоритмы для анализа картин пузырькового течения, а также выполнены тесты, отраженные в диссертации. Представление совместных материалов согласовано с соавторами.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Отсев неверных векторов для нерегулярного поля скорости, основанный на сравнении текущего вектора с наиболее отличным от среднего в некотором окружении, в котором вклад векторов учитывается с гауссовым весом, сохраняет высокое пространственное разрешение методов слежения.
- Применение корреляционной коррекции вектора смещения позволяет в несколько раз уменьшить ошибку оценки смещения без потери пространственного разрешения методов слежения.
- Идентификация фокусированных образов пузырей из изображений, полученных методом лазерно-индуцированной флуоресценции для пузырьковых потоков, основанная на расчете полей корреляций изображения с предварительно сгенерированными масками в виде колец, позволяет распознавать перекрывающиеся образы пузырей различного диаметра. Применение схемы субдискретизации рассчитываемого поля, а также схемы разрежения изображения маски снижает время идентификации образов пузырей в десятки раз.
- Совместное использование метода слежения за пузырями на основе критерия корреляционного подобия и метода корреляционной коррекции вектора смещения повышает точность определения векторов смещения пузырей.
- Расчет совместной математической статистики полей скорости газовой и жидкой фаз и локального газосодержания, когда учитывается объемное включение каждой из фаз, дает возможность рассчитать смешанные (газ-жидкость) статистические моменты высокого порядка.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 135 страницах, иллюстрирована 53 рисунками и содержит список литературы из 94 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, сформулированы цели исследований, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, и кратко описана структура диссертации.

В первой главе приведен обзор экспериментальных и алгоритмических подходов к исследованию однофазных и многофазных потоков оптическими методами. В обзоре представлена краткая история развития методов количественной визуализации, начиная с применения «стробоскопической визуализации» в начале 60-х годов, в том числе в ИТ СО РАН, и заканчивая современными методами цифровой трассерной визуализации (рис. 1). Приведен обзор литературы, связанный с развитием методов PIV и PTV и подходов к компьютерной обработке первичных данных. Отдельный параграф главы посвящен обзору подходов к исследованию пузырьковых потоков

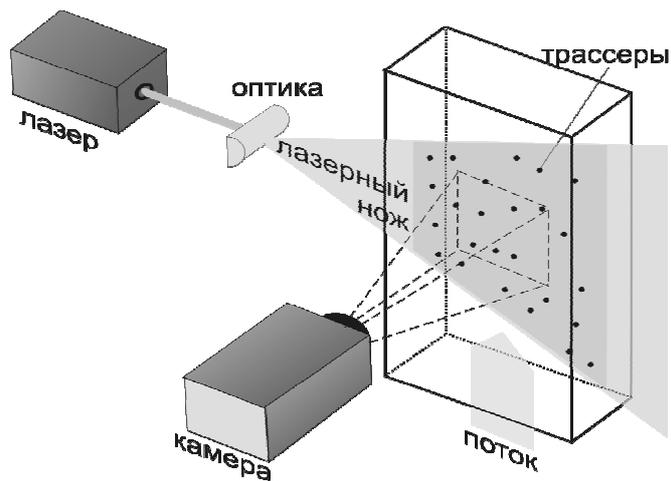


Рис. 1 Схема метода цифровой трассерной визуализации

оптическими методами и распознаванию образов частиц дисперсной фазы (пузырей). В главе также дано описание современных систем оптической диагностики потоков, алгоритмов и программного обеспечения для методов цифровой трассерной визуализации.

Во второй главе рассматриваются алгоритмы определения поля скорости путем слежения за частицами. Подробно описываются все этапы обработки изображений частиц, включая алгоритм идентификации частиц, алгоритм слежения за частицами и алгоритмы отсева неверных

векторов. Приводятся основные недостатки методов слежения и способ решения этих проблем, который заключается в совмещении методов слежения и корреляционного анализа изображений частиц. Тестирование предложенных и разработанных алгоритмов проводилось в ходе вычислительного эксперимента, который заключался в обработке синтетических изображений для оценки различных свойств разработанных алгоритмов. Сравнительное тестирование результатов метода слежения (PTV), метода слежения с корреляционной коррекцией (PTV с коррекцией) и корреляционного анализа (PIV) проводилось на экспериментальных данных по изучению турбулентной осесимметричной импактной струи.

Схема стандартного метода слежения за частицами, использующего два последовательных кадра, предполагает определение положений центров частиц на изображениях, слежение за частицами (поиск образов одной и той же частицы на двух кадрах) и отсев векторов, неверно определенных на этапе слежения. Статистический анализ ансамбля данных завершает обработку. Схема метода PTV с коррекцией предусматривает дополнительный шаг – корреляционную коррекцию векторов смещения, которая применяется после этапа слежения за частицами.

Для определения положения центров частиц использовался алгоритм корреляции с гауссовой маской (Etoh, и др., 1998). Алгоритм способен с большой точностью различать несколько частиц, образы которых частично перекрываются.

Для поиска пар частиц использовался релаксационный алгоритм, описанный в (Баек, и др., 1996), который основывается на оценке вероятности возможных пар, исходя из условия локальной гладкости потока. Набор опрашиваемых на втором кадре пар для каждой частицы на первом кадре ограничивается значением максимально возможного перемещения. Значения вероятностей всех исходов изначально задаются одинаковыми. В случае, если соседние объекты для рассматриваемой частицы обнаруживают схожее смещение, вероятность таких событий дает вклад в рассматриваемое событие.

В работе был предложен способ использования предварительно рассчитанных данных для их уточнения при помощи релаксационного PTV. В качестве предварительных данных может служить поле, рассчитанное методом PIV или

PTV. Это позволяет уменьшить количество частиц-кандидатов и приводит к ускорению процедуры слежения и уменьшению количества неверных векторов. Набор кандидатов для частицы из первого кадра проводится таким образом, чтобы соответствующие смещения не отличались от предсказываемого больше чем на вектор определенной длины. Величина такого отличия зависит от длины интерполированного вектора, но не может быть меньше и больше определенных порогов. Таким образом, реализуется адаптивный механизм, когда для небольшого смещения область поиска уменьшается, что ведет к уменьшению количества неверных векторов.

Применение традиционных алгоритмов слежения приводит к эффекту группировки значений координат частиц у целых чисел (peak-locking). Данный эффект проявляется в неестественных выбросах у целых значений при построении распределения плотности вероятности одной из компонент скорости (Stanislas, и др., 2008). Использование метода Individual Particle Correlation (IPC) (Theunissen, и др., 2004) позволяет уменьшить влияние эффекта peak-locking. Суть метода заключается в применении корреляционной коррекции к отдельным изображениям частиц для уточнения векторов смещения. Итерационное уточнение смещения позволяет довести значение ошибки до сотых долей пикселя для синтетических данных.

Автоматическая обработка изображений неизбежно приводит к появлению ошибочных векторов смещения. Такие векторы могут появиться из-за низкого качества изображения частиц, наличия больших градиентов скорости, существенных значений перпендикулярной плоскости лазерного ножа компоненты скорости и других эффектов. Поиск и удаление таких векторов до последующей обработки является важным шагом, так как они существенно влияют на расчет старших статистических моментов в турбулентных течениях (Heinz, и др., 2004).

Оригинальный алгоритм скользящего среднего для отсева неверных векторов из поля скорости на регулярной сетке, основывается на предположении о локальной гладкости векторного поля. Значение каждого вектора сравнивается со значением соседних векторов. Вектор $\mathbf{v}(x, y)$ рассматривается как ошибочный, если выполняется следующее соотношение: $|\mathbf{v}(x, y) - \bar{\mathbf{v}}(x, y)| < k$, где $\bar{\mathbf{v}}(x, y)$ – вектор средней локальной скорости, рассчитанный по соседним векторам. Пороговое значение k рассчитывается как: $k = a \cdot \max_{(x,y)} |\mathbf{v}(x, y) - \bar{\mathbf{v}}(x, y)|$, где $0 < a < 1$ (Host-Masden, и др., 1994).

Сложность, связанная с применением алгоритма скользящего среднего к нерегулярным данным, состоит в подборе оптимального размера области осреднения такого, чтобы гарантированно находились векторы и при этом не снижалось пространственное разрешение метода. Было предложено рассматривать большую область с учетом весовой функции по Гауссу. Таким образом, оригинальные выражения были преобразованы в следующий вид: $|\mathbf{v}(\mathbf{r}_0) - \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}_0)| < k$, где средняя локальная скорость рассчитывается с учетом веса $\bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}_0) = (\sum_{n \in N(\mathbf{r}_0)} \mathbf{v}_n w_n(\mathbf{r}_0)) / (\sum_{n \in N(\mathbf{r}_0)} w_n(\mathbf{r}_0))$, а вес является функцией Гаусса $w_n(\mathbf{r}_0) = \exp\left(-\frac{r_0 - r_n}{2\sigma^2}\right)$. Значение коэффициента рассчитывается по множеству $N(\mathbf{r}_0)$ векторов из области осреднения $k = a \cdot \max_{n \in N(\mathbf{r}_0)} |\mathbf{v}_n - \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}_0)|$.

Описанный алгоритм может быть применен итерационно. Каждая итерация удаляет векторы, наиболее отличные от среднего, рассчитанного с применением весовой функции даже в том случае, когда величина отличия мала. Дополнительные, абсолютная и относительная нижние границы, призваны ограничить отличие, достаточное для пометки вектора как неверного.

В ходе вычислительного эксперимента проводилось тестирование алгоритма

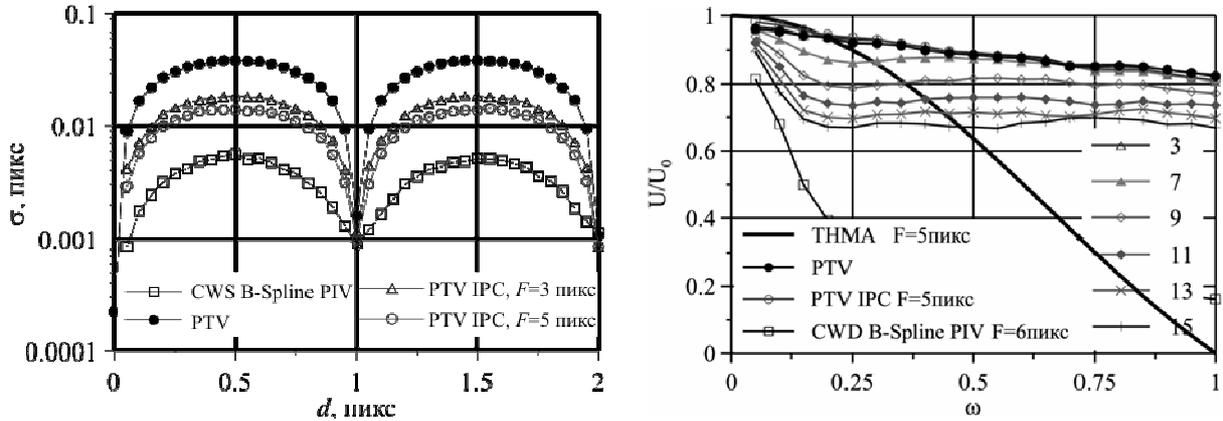


Рис. 2 Случайная ошибка как функции от смещения частиц (слева) и сравнение пространственных разрешений методов PIV и PTV для одномерного синусоидального смещения в зависимости от наложенной пространственной частоты (справа)

PTV с коррекцией IPC, для чего были созданы синтетические изображения. Результаты обработки методом PTV сравнивались с результатами обработки PIV метода (CWS B-Spline PIV). Отдельные тесты использовались для оценки: зависимости точности определения центра частицы от ее диаметра, восстановление пар частиц в зависимости от концентрации частиц, систематической и случайной ошибок в зависимости от величины смещения частиц. Исследовалось пространственное разрешение методов.

Оценка точности алгоритмов проводилась при помощи синтетических изображений с равномерным горизонтальным смещением частиц в пределах от 0 до 2 пикселей. На рис. 2 (слева) представлено среднее значение случайной ошибки для PTV, PTV с коррекцией (размер окна 3 и 5 пикселей) и PIV методов. Ошибка уменьшается для PTV с коррекцией (PTV IPC, $F=5$ пикселям) больше чем в три раза по сравнению с обычным PTV, но остается выше, чем для PIV. Преимущество PIV связано с большим размером корреляционного окна и проявляется только на синтетических данных с равномерным смещением.

Пространственное разрешение методов исследовалось на синтетических изображениях с одномерным синусоидальным смещением и различными волновыми числами вертикальной компоненты скорости вдоль оси x : $v = 3 \sin\left(\frac{2\pi\omega x}{5}\right)$, где $\omega = \frac{F}{\lambda} = \frac{5}{\lambda} = 0,005 \div 1$ – безразмерное волновое число. На рис. 2 (справа) представлены графики для PTV, PTV с коррекцией и размером окна 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 пикселей. Передаточная функция для PTV и PTV с окном коррекции в 3 и 5 пикселей различается незначительно. Таким образом, по результатам вычислительного эксперимента алгоритм корреляционной коррекции с размером корре-

ляционного окна в 5 пикселей практически не уменьшает локальность метода PTV в стандартных для PIV условиях.

Два набора данных, полученных в результате экспериментов с различными размерами исследуемой области: $35 \times 25 \text{ мм}^2$ и $6,5 \times 5 \text{ мм}^2$, использовались для тестирования разработанных алгоритмов. Эксперименты были направлены на исследование характеристик турбулентной затопленной осесимметричной импактной струи. В обоих экспериментах верхняя граница области измерения совпадала с импактной поверхностью.

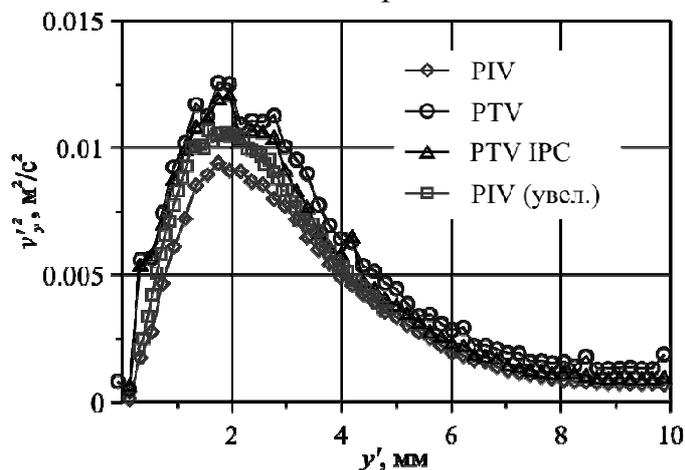


Рис. 3 Распределения осевой компоненты КЭТ в вертикальном сечении вблизи импактной поверхности

Задачи замыкания математических моделей турбулентных течений требуют точных экспериментальных данных о скоростях потока, в том числе статистические моменты высокого порядка. На рис. 3 показаны распределения компоненты среднеквадратичной пульсации скорости (кинетической энергии турбулентности – КЭТ) для вертикального сечения, рассчитанные по мгновенным полям скорости, полученным в первом и втором экспериментах с использованием методов PTV, PTV с коррекцией и адаптивного PIV.

Видно, что результаты PTV для первого эксперимента дают значение компоненты КЭТ $\langle v_{y'}^2 \rangle$, близкое к полученному методом PIV во втором эксперименте с большим пространственным разрешением. Таким образом, PTV алгоритмы позволяют учесть вклад мелкомасштабных флуктуаций скорости для эксперимента с низким пространственным разрешением, в отличие от адаптивного PIV, который недооценивает уровень флуктуаций в тех же условиях.

Результаты тестирования показали, что описанный и реализованный алгоритм коррекции IPC позволяет обеспечить уровень погрешности в методе PTV, сопоставимый с погрешностью адаптивного PIV, при возможности достижения высокого пространственного разрешения без уменьшения размеров полной исследуемой области потока в пределах одного эксперимента.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов обработки экспериментальных данных для исследования пузырьковых потоков. Новый метод плоскостной лазерно-индуцированной флюоресценции позволяет измерять поля скорости двух фаз, газосодержание и дисперсный состав при помощи одной камеры и рассчитывать требуемые характеристики потока, в том числе данные о взаимодействии фаз. Были предложены и разработаны алгоритмические подходы для разделения информации о каждой из фаз, слежения за пузырями, совместной статистической обработке. Созданные алгоритмы были протестированы в ходе экспериментального изучения пузырьковой струи.

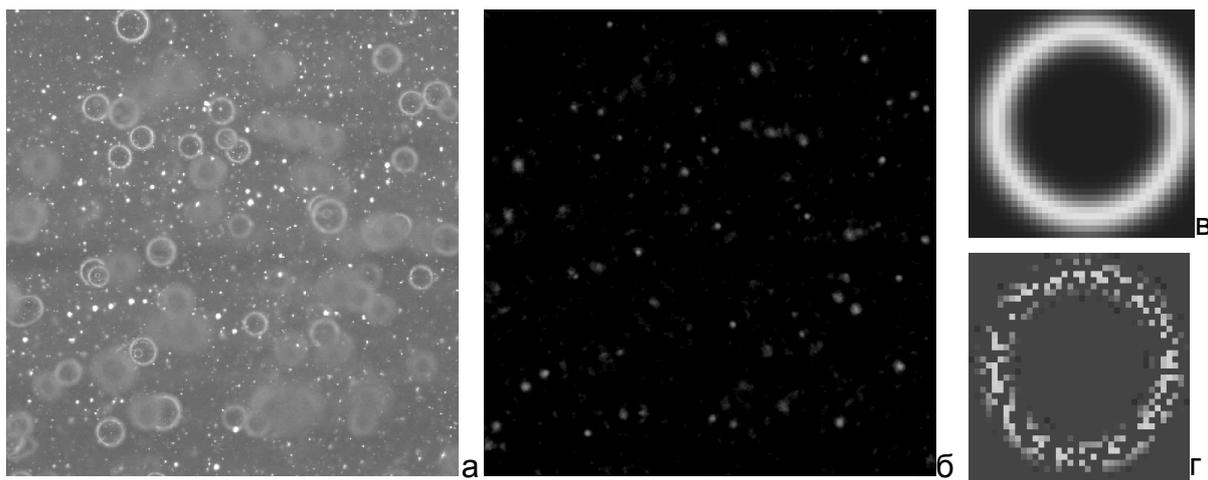


Рис. 4 Изображение, полученное методом PFBI (а), рассчитанное поле корреляций (б), сгенерированное изображение маски (в), пример разреженного изображения маски (г)

Методика плоскостной лазерно-индуцированной флюоресценции для визуализации пузырей (Planar Fluorescence for Bubble Imaging – PFBI) позволяет регистрировать одновременно информацию о газовой и жидкой фазах. На рис. 4 показаны частицы (яркие точки), отслеживающие движение жидкой фазы и пузыри (кольца) на экспериментальном изображении. Если два подобных изображения были получены с малым временным интервалом, методика PFBI может быть скомбинирована с PTV для измерения газосодержания и скорости дисперсной фазы, а также с методами PIV/PTV для оценки поля скорости жидкой фазы.

Одно из преимуществ метода PFBI – это применимость к потокам с высоким объемным газосодержанием, до 5%, тогда как существующие методы ограничены объемным содержанием дисперсной фазы в 1%. Однако, как видно из рис. 4, а при достаточно высоких значениях газосодержания изображения пузырей сильно перекрываются. Для идентификации образов пузырей был предложен алгоритм корреляционного поиска. Суть поиска заключается в расчете поля корреляции оригинального изображения с сгенерированным изображением кольца искомого радиуса (маской, рис. 4, в). Пики на таком поле соответствуют центрам пузырей (рис. 4, б). Ввиду относительно большого размера колец корреляционный алгоритм требует значительных вычислительных ресурсов. Для оптимизации обработки было предложено несколько схем. Использование прореженного изображения колец при расчете корреляционной суммы (рис. 4, г) и субдискретизация рассчитываемого поля позволили на порядок снизить время расчета.

Для определения пузырей с перекрывающимися и неравномерно освещенными образами была предложена схема сегментирования маски. Кольцо маски делится на секторы, и коэффициент корреляции рассчитывается для каждого сектора отдельно. Это позволяет учесть локальные условия освещенности каждого сектора и комбинировать коэффициенты корреляции нескольких соседних секторов для распознавания частей колец.

Для расчета смещения пузырей используется двухкадровый PTV. За короткий промежуток времени между кадрами изображения пузырей практически не изменяются. Поэтому для алгоритма поиска пар был выбран критерий корреляционного подобия. Для каждого пузыря в первом кадре ведется поиск пары во вто-

ром кадре в области, ограниченной значением максимально возможного смещения. Для достижения подпиксельной точности значения векторов смещения пузырей используется процедура коррекции ИРС для всех кандидатов в пары. Применение коррекции значительно снижает эффект «reak-locking», а также увеличивает уровень взаимной корреляции изображений верной пары пузырей.

В ходе начальной стадии обработки определяются положения как фокусированных так и дефокусированных пузырей. После процедуры слежения, основываясь на информации о пузыре в два момента времени, проводится отсев дефокусированных, т.е. находящихся вне лазерного ножа пузырей. Для отсева из двух коэффициентов корреляции каждого пузыря в два момента времени выбирается максимальный.

Особенность расчета совместной статистики полей скорости газовой и жидкой фаз, а также пульсаций газосодержания, заключается в учете локального объемного включения фаз. После расчета мгновенных полей скорости непрерывной фазы методом PIV результирующие данные проходят фильтрацию сначала по отношению сигнал-шум, а затем с применением адаптивной медианной схемы (Westerweel, и др., 2005). Это позволяет удалить неверные вектора, включая те, что рассчитаны по дефокусированным изображениям пузырей. В этих областях невозможно определить наличие жидкости или газа. Поэтому локальное газосодержание считалось неопределенным, и такие значения исключались из статистической обработки. Для расчета статистических данных на единой сетке нерегулярное поле скорости газовой фазы регуляризировалось с учетом шага сетки и значения перекрытия в PIV обработке. Совместная статистика газ-жидкость рассчитывалась только на границе пузырей, где была рассчитана скорость, как несущей фазы, так и дисперсной фазы.

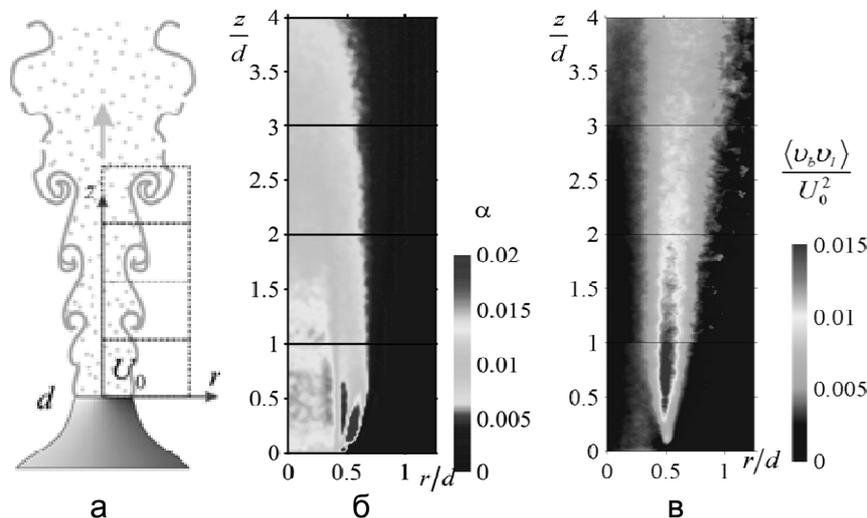


Рис. 5 Схема расположения измерительных зон (а). Пространственное распределение среднего плоскостного газосодержания (б) и корреляций скорости газовой и жидкой фаз в радиальном направлении (в)

Предложенные алгоритмы были протестированы в ходе исследования свободной пузырьковой струи. Струя формировалась сужающимся соплом с выходным диаметром $d = 15$ мм (рис. 5, а). Число Рейнольдса было равно 12 000. Объемное газосодержание двухфазного потока составляло $\beta = 0\%$, 1,2%, 2,4% и 4,2%. Для достижения большего пространственного разрешения область измерения была поделена на 4 зоны, измерения в которых проводились независимо (рис. 5, а).

Рис. 5, б иллюстрирует пространственное распределение среднего плоскостного газосодержания для свободной струи ($\beta = 1.2\%$). То, что мгновенные поля скорости обеих фаз также как и пульсации плоскостного газосодержания были измерены одновременно, позволило рассчитать совместную статистику. Рис. 5, в иллюстрирует корреляцию между пульсациями радиальных компонент скорости газовой и жидкой фаз для $\beta = 1,2\%$.

Четвертая глава посвящена разработке измерительной системы и программного обеспечения для лазерной диагностики потоков. В главе дается описание измерительной системы и отдельных устройств, детально описывается архитектура программного обеспечения и реализация его компонент, приводится описание тестовых экспериментов и результаты исследований, выполненных в аэродинамических трубах при помощи созданной системы.

Программное обеспечение (ПО) ActualFlow было разработано как часть измерительной системы (ИС) «ПОЛИС», которая реализует методы PIV, Stereo PIV, PTV, PFBI, Laser Induced Fluorescence (LIF), Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF), Interferometric Particle Imaging (IPI), Tomographic PIV, Micro PIV. Указанные методы возникли недавно и получили широкое распространение благодаря бесконтактному способу измерения и возможности получения принципиально новой информации об объекте. Метод PLIF позволяет регистрировать мгновенные поля температуры (или концентрации) в потоках жидкости и газа. Метод IPI позволяет исследовать спреи со сферическими частицами дисперсной фазы.

Программное обеспечение ActualFlow позволяет управлять работой нескольких аппаратных устройств (лазеры, камеры, синхронизирующий процессор и др.), сохранять полученные с них данные, а также обрабатывать данные и отображать результат обработки пользователю различными способами. ActualFlow представляет собой расчетный комплекс с распределенной модульной архитектурой, основанной на СОМ-технологии межсервисного и межкомпонентного взаимодействия. В качестве основных единиц декомпозиции продукта можно выделить следующие: 1) блок хранения данных; 2) пользовательский интерфейс с возможностями импорта/экспорта и отображения данных; 3) блок управления экспериментом; 4) блок обработки данных, включающий набор готовых алгоритмов.

Модуль интеграции оборудования и модуль управления обработкой предоставляются пользователю с открытым интерфейсом (Application Programming Interface - API), что делает систему гибкой и расширяемой.

Программное обеспечение разбито на три основных логических слоя: уровень представления, уровень предметной области и уровень источника данных. Деление на слои позволяет уменьшить зависимости между уровнями системы, увеличить локальность изменений в программе, добавить альтернативную реализацию базового слоя, улучшить понимание программы разработчиками. Модуль управления данными находится на уровне источника данных и изолирует конкретную организацию базы данных, реализуя интерфейс взаимодействия. На том же уровне находится журнал исключительных ситуаций, используемый всеми модулями для трассировки событий, происходящих в системе. Уровень предметной области включает блок обработки данных и блок управления экспериментом.

Этот уровень открыт для расширения за счет интеграции новых расчетных процедур и устройств. Замыкает послойное разбиение верхний уровень представления, который образован интерфейсом пользователя и компонентом визуализации данных.

База данных (БД) предназначена для хранения информации о проводимых экспериментах и включает в себя информацию об устройствах и параметрах их работы. Структура БД древовидная и представляет собой систему файлов с вложенными подкаталогами. Описание узла хранится в XML файле. Использование XML формата позволяет обеспечить совместимость версий форматов представления данных. Ссылки в пределах базы данных относительные, что позволяет копировать и переносить БД

Модуль управления обработкой и библиотека расчетных процедур (алгоритмов) реализуют функции обработки. В настоящий момент автором созданы следующие процедуры обработки данных:

- расчет поля скорости методом релаксационного PTV (Ваек, и др., 1996);
- расчет поля скорости гибридным методом PIV\PTV;
- отсев ошибочных векторов по критерию локальной гладкости векторного поля;
- корреляционный анализ изображений, полученных методом PFBI, для идентификации образов пузырей;
- слежение за образами пузырей при помощи критерия корреляционного подобия для расчета поля скорости газовой фазы в двухфазных потоках;
- универсальная процедура расчета статистических моментов измеряемых величин (до 4-го порядка включительно);
- метод статистического анализа двухфазных потоков с учетом включения газовой и жидкой фаз для метода PFBI;
- универсальный метод расчета гистограмм.

Кроме указанных выше, в состав ПО ActualFlow входит большое количество алгоритмов, написанных другими разработчиками. В их числе алгоритмы для методов PIV, PLIF, IPI, а также утилитарные алгоритмы для работы с изображениями и данными.

Блок управления экспериментом отвечает за управление периферийными устройствами, установку параметров эксперимента и отдельных устройств, синхронизацию устройств во время проведения эксперимента, опрос состояния устройств, передачу полученных данных в пользовательский интерфейс (см. рис. 6). Система предполагает расширение не только за счет поддержки новых камер и лазеров, но и появления принципиально новых устройств. По этой причине архитектура блока управления экспериментом построена на использовании минимального количества допущений об устройстве.

Представление данных осуществляется модулем визуализации. Архитектура модуля является гибкой и легко расширяемой, так как система постоянно развивается и введение новых видов данных зачастую требует введения новых способов визуализации. Реализована визуализация изображений, полей скорости (PIV, PTV), полей температур и др. Кроме того есть возможность визуализации гистограмм и графиков.



Рис. 6 Взаимодействие устройств ИС «ПОЛИС»

Созданная ИС применялась для измерения поля скорости в свободном потоке и на моделях в аэродинамической трубе Т-327Б в ИТПМ СО РАН. Были проведены измерения поля скорости при обтекании сверхзвуковым потоком пластины под углом атаки и в следе при обтекании цилиндрического кососрезного газодинамического свистка в режиме автоколебаний.

Измерения поля скорости в свободном потоке также выполнялись в импульсной гиперзвуковой аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН при числе Маха потока $M = 6$. Особенностью потока в аэродинамической трубе является наличие в нем малых долей паров металла, которые возникают при испарении электродов разрядного устройства в момент разряда. При расширении воздуха в сопле пары конденсируются в микрочастицы и могут быть использованы в качестве трассирующих частиц. Впервые на импульсной установке ИТ-302М была выполнена лазерная количественная визуализация гиперзвукового потока при помощи естественного засева.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

- Создан набор алгоритмов для измерения поля скорости методом слежения за частицами. Реализованы алгоритмы для определения образов частиц и слежения за частицами. Предложен новый метод отсева неверных векторов для PTV на основе фильтра скользящего среднего, который учитывает вклад соседних векторов с гауссовым весом. Такой подход позволяет сохранить высокое пространственное разрешение метода PTV в условиях неравномерного засева частиц. Реализован алгоритм корреляционной коррекции векторов смещения частиц.
- Выявлено уменьшение полной ошибки смещения частиц в три раза после применения коррекции. Определен оптимальный размер корреляционного окна алгоритма коррекции, равный пяти пикселям, который позволяет не снижать пространственное разрешение метода слежения. Экспериментальное исследование гидродинамики осесимметричной импульсной струи показало, что применение предложенной коррекции позволяет уменьшить ошибку, связанную с эффектом «peak-locking», до уровня адаптивного PIV. При этом сохраняется высокое пространственное разрешение PTV метода.

- Для нового, разработанного в соавторстве, экспериментального метода исследования пузырьковых потоков, основанного на плоскостной лазерно-индуцированной флюоресценции (Planar Fluorescence Bubble Imaging - PFBI), который позволяет исследовать двухфазные потоки с объемной долей газовой фазы до 5%, предложены и разработаны алгоритмы, позволяющие идентифицировать образы пузырей в условиях неравномерного освещения и перекрытия образов, следить за перемещениями пузырей с высокой подпиксельной точностью и рассчитывать совместную статистику полей скорости и объемной доли непрерывной и дисперсной фаз. Применение данных подходов для исследования пузырьковой газонасыщенной турбулентной струи позволило получить двумерные распределения локального газосодержания и скоростей газовой и жидкой фаз, а также статистические моменты второго порядка пульсаций этих величин. Впервые были рассчитаны совместные корреляции пульсаций скорости пузырей и жидкой фазы в слое смешения течения струи.

- Создан комплекс проблемно-ориентированных программ ActualFlow для управления ИС «ПОЛИС» на основе методов лазерной диагностики потоков PIV, Stereo PIV, PTV, PFBI, LIF, PLIF, IPI, Tomo PIV, Micro PIV. Предложены и реализованы возможности системы по сбору данных. Предложены и в составе коллектива реализованы принципы хранения массива экспериментальных данных, позволяющие оперировать сотнями тысяч измерений мгновенных показателей течения, без уменьшения производительности системы. Созданное ПО отличается от аналогичных возможностью расширения за счет алгоритмов и поддержки новых устройств, режимом одновременной обработки нескольких разнородных наборов данных, повторным использованием компонент при реализации алгоритмов. Созданная ИС «ПОЛИС» используется в 18 научных и учебных учреждениях России. Разработанные алгоритмы и программные средства в составе ИС «ПОЛИС» были применены для измерений полей средней скорости и пульсаций скорости в импульсной и стационарной аэродинамических трубах. Показана возможность измерений в импульсной гиперзвуковой установке с помощью естественного засева потока конденсатом паров металлов. Впервые получены данные о течении в следе за кососрезным газодинамическим свистком, обтекаемым сверхзвуковым потоком в режиме автоколебаний.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S. (2010). Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet // *Exp. Fluids*, 48, стр. 615-629.
2. Ахметбеков Е.К., Маркович Д.М., Токарев М.П. (2010). Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках // *Вычислительные технологии*. 15(4), стр. 57-72.
3. Ахметбеков Е.К., Дулин В.М., Первунин К.С. (2010). Турбулентная структура газонасыщенных свободных и импактных струй // *Тепловые процессы в технике*, 2 (1), стр. 2-6.
4. Ахметбеков Е., Бильский А., Маркович Д., Маслов А., Поливанов, П., Цырюльников И., Ярославцев М. (2009). Применение лазерного измерительного

комплекса “ПОЛИС” для измерений полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика , 16 (3), стр. 343-352.

5. Ахметбеков Е., Бильский А., Ложкин Ю., Маркович Д., Токарев М., Тюрюшкин А. (2006). Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование , 7, стр. 79-85.

6. Алексеенко С.В., Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Дулин В.М., Маркович Д.М., Первунин К.С. (2010). Экспериментальное исследование модификации турбулентности в пузырьковых струйных потоках // Фундаментальные проблемы моделирования турбулентных и двухфазных течений. А.А. Саркисов, Г.А. Филиппов. М:Наука, Т.1, стр. 7-55.

7. Akhmetbekov Y. K., Markovich D. M., Tokarev M. P. (2007). A novel correction algorithm for PTV // Proceedings of "7th International Symposium on PIV. Rome.

8. Akhmetbekov Y., Alekseenko S., Dulin V., Markovich D. (2007). Application of a novel PLIF technique combined with PIV and PTV to bubble turbulent jets study // Proceedings of "7th International Symposium on PIV". Rome.

9. Akhmetbekov Y., Alekseenko S., Dulin V., Markovich D., Pervunin K. (2009). Statistics of turbulent fluctuations in free and confined axisymmetric bubble jets // Proceedings of the 6th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. Rome.

10. Akhmetbekov Y., Alekseenko S., Dulin V., Markovich D., Pervunin K. (2008). Study of Bubble Jet Structure by Means of a Novel PLIF Approach Combined with PIV and PTV // Proceedings of the 13th International Symposium on Flow Visualization, (стр. 15). Nice.

11. Akhmetbekov Y., Alekseenko S., Dulin V., Markovich D., Pervunin K. (2009). Turbulent Structure of Bubble Free and Confined Jets // Proceedings of the 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2, стр. 865-870. Seoul.

12. Алексеенко С., Ахметбеков Е., Дулин В., Маркович Д., Первунин К. (2007). Применение PLIF метода в комбинации с PIV и PTV для изучения гидродинамической структуры газонасыщенных струйных потоков // Труды IX Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков", (стр. 18-21). Москва.

13. Ахметбеков Е., Токарев М. (2008). Алгоритм корреляционной коррекции для PTV // Труды молодежной конференции "Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей. Новосибирск.

14. Ахметбеков Е., Токарев М. (2007). Новый метод коррекции для измерения поля скорости методом слежения за частицей // Труды IX Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков", (стр. 134-137). Москва.

15. Ахметбеков Е., Дулин В., Первунин К. (2008). Разработка алгоритмов для исследования пузырьковых потоков оптическим методом PLIF // Тезисы докладов X всероссийской школы-конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики". Новосибирск.

16. Ахметбеков Е., Дулин В., Первунин К. (2007). Исследование структуры газонасыщенной импактной струи методом лазерно-индуцированной флуоресценции // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках", 2, стр. 455-458. Санкт-Петербург.
17. Ахметбеков Е., Дулин В., Первунин К. (2009). Разработка алгоритмов для исследования пузырьковых потоков оптическим методом Planar Fluorescence Bubble Imaging // Труды X Международной научно-технической конференции "Оптические методы исследования потоков", (стр. 246-249). Москва.
18. Ахметбеков Е., Дулин В., Первунин К. (2008). Турбулентная структура газонасыщенной свободной струи // Тезисы докладов X всероссийской школы-конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики", (стр. 21-22). Новосибирск.
19. Ахметбеков Е., Дулин В., Первунин К. (2009). Турбулентная структура газонасыщенных свободных и импактных струй // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях", (стр. 9-13). Жуковский.
20. Ахметбеков Е., Дулин В., Первунин К. (2007). Экспериментальное исследование турбулентной структуры газонасыщенной осесимметричной струи // Труды V научной школы-конференции "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики", (стр. 65-67). Алушта.
21. Ахметбеков Е., Дулин В., Первунин К. (2007). Экспериментальное исследование турбулентной структуры газонасыщенной осесимметричной струи // Труды Всероссийской школы-семинара молодых ученых «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии», посвященная 50-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, (стр. 15-16). Новосибирск.

Список литературы

1. Etoh R., Takehara K. (1999). A study on particle identification in PTV—particle mask correlation method. // J. Visualiz., 1, Стр. 313–323
2. Baek S., Lee S. (1996). A new two-frame particle tracking algorithm using match probability. // Exp. Fluids, 22, Стр. 23-32.
3. Stanislas M., Okamoto K., Kaehler C., Westerweel J., Scarano F. (2008). Main results of the third international PIV challenge. // Exp. Fluids, 45 (1), Стр. 27-71.
4. Theunissen R., Stitou A., Riethmuller M. (2004). A novel approach to improve the accuracy of PTV methods. // 12-th International Symposium on Applications of Laser to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal.
5. Heinz O., Ilyushin B., Markovich D. (2004). Application of a PDF's method for the statistical processing of experimental data. // Int. Journal of Heat and Fluid Flow , 25, Стр. 846-874.
6. Host-Masden A., McCluskey D. (1994). On the Accuracy and Reliability of PIV measurements. // 7th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Flow Measurements. Lisbon, Portugal.
7. Westerweel, J., & Scarano, F. (2005). Universal outlier detection for PIV data. // Exp. Fluids, 39, Стр. 1096-1100.

Подписано к печати 03.11.2011. Заказ № 34.
Формат 60/84/16. Объем 1,1 уч.-изд. л. Тираж 120 экз.

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