

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

УДК 532.57, 533.6.08, 519.6

Е.К. Ахметбеков¹, М.Н. Карчевский², М.П. Токарев^{2,3}

¹ Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

010000, Астана, просп. Кабанбай батыра, 53, E-mail: yerbol.akhmetbekov@nu.edu.kz

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия,
630090, Новосибирск, Пирогова ул., 2, E-mail: karчевsky@gmail.com

³ Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1, E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЧАСТИЦАМИ ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ ТРЕХМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СКОРОСТИ В
ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКАХ**

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается совершенствование существующих и разработка новых подходов к обработке экспериментально полученных данных методом слежения за отдельно взятой частицей. Указанный подход может применяться на практике для решения актуальных научных и прикладных задач механики жидкости и газа, энергетики, транспортных систем и т.п.

Каждый алгоритм из семейства 3D PTV распадается на три составные части: поиск истинных положений частиц на проекциях, триангуляция положений частиц в пространстве и сопоставление каждой частице на первом кадре, пары во втором кадре. При исследовании трехмерных потоков приходится применять триангуляцию для нахождения трехмерных координат частицы в заданном объеме по двум и более проекциям с регистрирующих камер. В современных экспериментах по исследованию потоков используется 3 или 4 камеры в подавляющем числе случаев.

Для повышения производительности предполагается как разработка новых алгоритмов, так и адаптация алгоритмов для работы на высокопроизводительных вычислительных системах, в частности на графических процессорах. Также выполнено совершенствование существующих и создание новых алгоритмов реконструкции трехмерных распределений частиц в объеме потока и расчета полей скорости по перемещению этих частиц с целью снижения ресурсоемкости алгоритмов, повышения точности и пространственного разрешения измеренного поля скорости. Проведено тестирование существующих и созданных в рамках работ алгоритмов, определены их характеристики, подготовлены рекомендации по использованию различных подходов.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ В ОБЪЕМЕ ПОТОКА, АЛГОРИТМ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЧАСТИЦАМИ

ВВЕДЕНИЕ

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 оптических методах исследования. К возможным объектам исследования можно отнести обтекание самолетов, потоки реактивных двигателей, форсунки горелочных устройств и т.д.

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, роль трассеров может выполнять и пузырьки в дисперсных потоках. 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. Для получения поля скорости существуют два принципиально различных подхода обработки данных. Алгоритмы PTV (Particle Tracking Velocimetry) сопоставляют каждой частице на изображении свой расчетный вектор скорости.

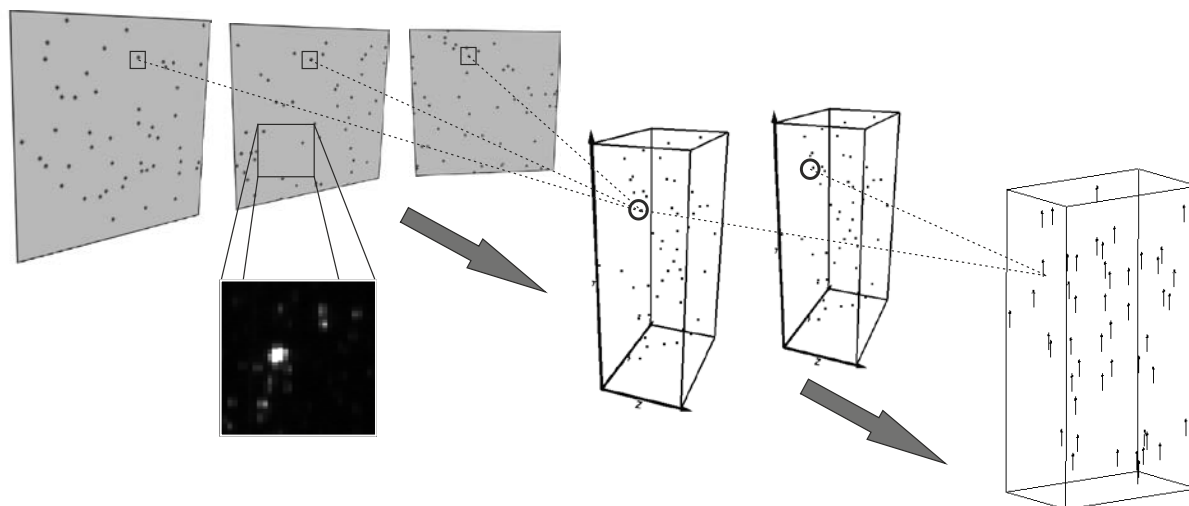
Алгоритмы слежения за частицами, в отличие от методов корреляционного анализа, обладают высоким пространственным разрешением и применимы к потокам с неоднородным засевом. В то же время применение алгоритмов слежения ограничено в связи с большой погрешностью определения смещений частиц. К тому же обработка данных занимает большое количество времени и требует значительных вычислительных ресурсов. Обработка одного эксперимента может занять до нескольких суток.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ СКОРОСТИ

Каждый алгоритм из семейства PTV распадается на три составные части. Поиск положения центров частиц на проекциях камер, триангуляция координат в объеме и сопоставление каждой частице на первом кадре, пары во втором кадре, т.е. находится образ той же самой частицы, переместившейся за заданный промежуток времени в другую точку пространства. Схема работы метода представлена на Рис. 1.

Один из самых простых способов обнаружения частиц на изображении является метод простой бинаризации по порогу интенсивности, за которым следует маркировка частицы и определение центра трассера (центроида). Однако этот метод применим только в случае, если исходное изображение состоит из малого количества ярких и достаточно больших частиц. Одним из улучшений данного метода, была автоматизация подбора порога для бинаризации изображений частиц, представляющих собой набор проекций полученных с различных ракурсов наблюдения и имеющих различные условия освещенности. После модификации, порог стал рассчитываться по формуле $T = k * \sigma$, где σ - среднеквадратичное отклонение интенсивности пикселей на данной проекции, k – характерный множитель. Применение метода позволило задавать единственное значение k для сегментации изображений частиц полученных с разных ракурсов в разные моменты времени. При этом производится нормировка распределений интенсивности на их характерную ширину и приведение их к одному (подобному) виду.

Другой метод по поиску трассеров на фотографии является метод PMC. PMC (Particle Mask Correlation) [1] это метод обнаружения частиц на изображении, использующий корреляционную маску. В основе этого метода лежит предположение, что представление освещенной частицы есть двумерное гауссово распределение интенсивности. Другими словами трассер на изображении имеет наибольшую интенсивность в центре и равномерно убывает от расстояния. Для нахождения положения трассеров исходное бинаризованное изображение коррелируется с гауссовым распределением, в результате чего получается корреляционное поле. Далее происходит поиск пиков по полученному полю, которые являются центрами искомых частиц на изображении.



Трассерные проекции

Восстановленное трехмерное
положение трассеров

Поле скорости

Рис. 1 Иллюстрация принципа работы алгоритма оценка поля скорости в методе 3D PTV

Задача обнаружения точного положения трассеров в объеме, заключается в обнаружении и сопоставлении частицам трехмерного вектора координат, основываясь на проекциях, сделанных фотокамерами с различных ракурсов области измерения. После триангулирования положения центров частиц необходимо произвести отсев ошибочных векторов, так называемых фантомных частиц возникающих в результате ошибки калибровки камер и погрешности работы алгоритма. Для этого используется алгоритм кластеризации описанный в [2]. В этом случае необходимо иметь более трех камер. Все множество камер разбивается на наборы по три проекции. В каждом наборе проводится определение положения трассеров и для каждого набора создается свое представление изучаемого объема. Таким образом, создается несколько наборов частиц в изучаемом объеме, информацию о которых можно использовать для увеличения надежности определения верных частиц. В целях увеличения точности всего алгоритма PTV необходимо минимизировать погрешность определения центра частицы путем подбора оптимального положения. Данную задачу можно свести к минимизации суммы квадратов разностей

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m (\mathbf{y}_i - M(\mathbf{x}, t_i))^2$$

. В данной интерпретации \mathbf{y} вступает как двумерная координата проекции данной частицы, а M как решения обратной задачи, т.е. координаты спроецированного образа на данную плоскость изображения, варьируемым параметром \mathbf{x} выступают трехмерные координаты частицы изменяемые в диапазоне погрешности. Было принято решение использовать итерационный алгоритм Левенберга — Марквардта [3], который обеспечивает достаточную скорость сходимости. Результатом работы являются оптимально подобранные координаты частицы в объеме, которые и используются в дальнейших вычислениях. Также была выполнена работа по ускорению работы алгоритма за

счет использования многоядерной архитектуры. Распараллеливание выполняется средствами OpenMP [4], которое включено в стандартную версию Microsoft Visual Studio 2010.

Релаксационный алгоритм [5] поиска пары, основывается на предположении, что локально поток с трассерами движется примерно в одном направлении. На основе этой гипотезы строится вероятностная модель о наиболее вероятной возможности перехода частицы из первого кадра во второй. В области локального параллельного движения выбирается окружность с заданным радиусом, считается что трассеры из первого кадра попавшие в эту окружность двигаются примерно в одном направлении с максимальным отклонением от центральной частицы. Начальная вероятность совпадения пары выставляется как равновероятная для каждой частицы попавшей в окружность максимального сдвига частицы. Далее вычисляется вероятность перехода частицы. Идея расчета заключается в следующем: чем больше соседних частиц найдут пару в направлении данной частицы, тем больше будет вероятность истинности совпадения текущей частицы. Данный алгоритм является итерационным, качество конечного поля скорости улучшается с ростом количества итераций. Одним из недостатков данного алгоритма является зависимость от внешних параметров, таких как максимальный сдвиг трассера или радиус локального движения потока. Алгоритм также плохо работает на данных с большой плотностью засева, что является общей проблемой всех алгоритмов PTV. В этом случае возрастает количество итераций и время работы. В целом алгоритм показал отличные результаты на практике и является одним из приоритетных методов PTV в исследовании потоков. Релаксационный алгоритм претерпел множество изменений и переработок. В частности Ахметбековым [2], было сделано усовершенствование на предположении, что влияние частиц с ростом расстояния до них должно падать. Поэтому влияние частиц берётся с весовой функцией. Другое существенное изменение было сделано Оми [5], который полностью переработал формулу итерационного пересчета вероятностей. Предложенная формула учитывает более полно тот случай, когда для частицы с первого кадра не было найдено своего образа на втором кадре, т.е. вероятности потери пары частицей.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

На Рис. 2 приведены результаты тестирования влияния процедуры оптимизации на основные параметры алгоритма, полученные на модельных синтетических изображениях частиц. Синтетические изображения сгенерированы искусственно по набору частиц со случайными, но известными координатами в объёме. Полная ошибка расчета смещения частиц определялась как среднеквадратичное отклонение между известными и

рассчитанными значениями смещений во всём объёме: $\delta = \sqrt{1/n \sum_{i=0}^n (\Delta_i - \Delta_{M_i})^2}$, где Δ_i

и Δ_{M_i} точные и оцененные значения смещения в i -ой точке. Поле смещений (скорости) в синтетических изображениях было периодическим по координате Y и постоянным градиентом скорости по оси Z . $\Delta(X, Z) = \Delta_0(2w/w_{img})[(Z+d)/d]\sin(2\pi X/w)$, где (X, Y, Z) - координаты точек в объёме, w и d – полуширина и полуглубина объёма соответственно. Размеры измерительной области составляли $2w \times 2w \times 2d = 20 \times 20 \times 5$ мм. Начало лабораторной системы координат совпадало с центром объёма. Смещение в центральной плоскости объёма составляло $\Delta_0 = 0,18$ мм. Для расчетов были сгенерированы несколько наборов синтетических изображений и проекций. Концентрация частиц на проекциях N_{ppp} изменялась от 0,01 до 0,1 частиц/пиксель. В тесте камеры были расположены в углах квадрата, плоскость которого параллельна (X, Y) . Угол наблюдения был 30 градусов для всех проекций. Дисторсия и шум изображений не применялись. Размер проекций был выбран $w_{img} \times w_{img} = 256 \times 256$ пикселей.

На Рис. 2 а показано влияние процедуры минимизации ошибки положения частиц в синтетическом тесте. Видно, что использование оптимизации уменьшает ошибку расчета смещений частиц до 0,06 мм. Это составляет 16% от максимального перемещения в измерительном объеме. На Рис. 2 б продемонстрировано влияние алгоритма минимизации ошибок на количество восстанавливаемых частиц после процедуры кластеризации. Было замечено, что при выборе радиуса кластеризации сравнимого с поправкой ошибки процедурой оптимизации, например, 0,1 мм количество определенных частиц увеличивается на 1-10%. Это является дополнительным преимуществом данной процедуры. Однако при увеличении радиуса кластеризации до 0,5 мм и выше включение оптимизации перестает влиять на количество определенных частиц. Это связано с тем, что смещения центра области поиска с увеличенным радиусом больше не дает новых еще не рассмотренных частиц.

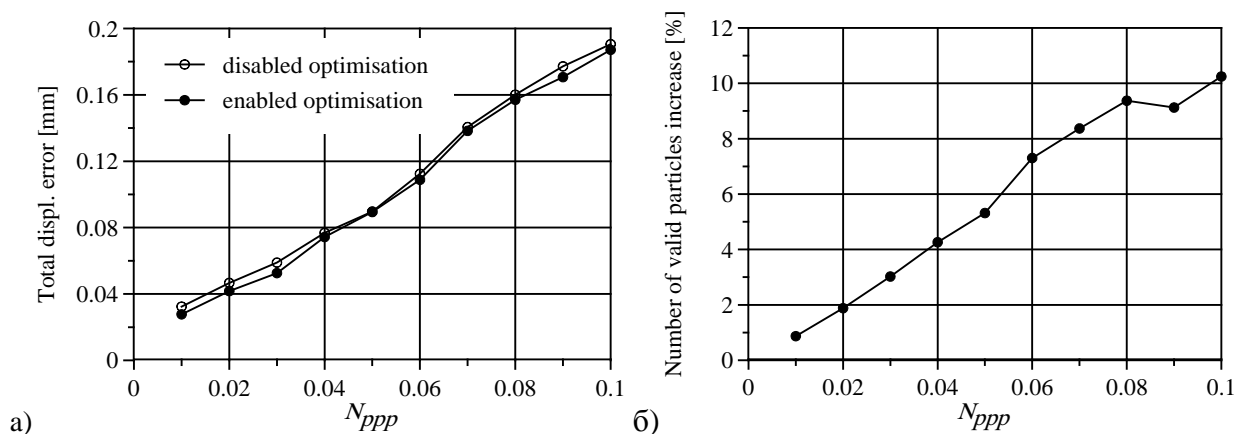


Рис. 2 Полная ошибка оценки смещения частиц по сгенерированным синтетическим проекциям частиц для версии с оптимизацией положения частиц и без а); относительный прирост числа определенных частиц при включении оптимизации в зависимости от количества частиц на проекции б).

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Главным отличием текущих результатов от результатов предыдущих исследований [2], является использование скоростной съемки 770 Гц вместо 10 Гц, которая технически более сложно реализуема (малая мощность лазера, низкая чувствительность камер) однако позволяет увидеть эволюцию крупномасштабных когерентных вихрей во времени. Для измерений использовалось следующее диагностическое оборудование: скоростной сдвоенный Nd:YLF импульсный лазер Pegasus PIV (10 мДж в импульсе с частотой повторения пары вспышек 1 кГц), КМОП камеры PCO 1200HS для проведения скоростной съемки (частота кадров 625 Гц в полном разрешении 1280×1024 пикс). Фотография созданного экспериментального стенда показана на Рис. 3 а. Причем, на установке проводились исследования как изотермической турбулентной прямоочной воздушной струи сформированной соплом диаметром 15 мм при режиме течения $Re = 6000$, так и турбулентного пламени предварительно перемешанной пропановоздушной смеси, фотография которого приведена здесь. В данной работе анализировались результаты только изотермического эксперимента.

Для измерения полей мгновенной скорости использовалась Томо PIV система «ПОЛИС». Увеличение частоты съемки в двухкадровом режиме до 770 Гц достигалось за счет использования только части полного изображения размером 1280×400 пикс. Задержка между парами кадров составляла 1,3 мс. Задержка между кадрами в паре была установлена 120 мкс, что соответствовало частоте 8,3 кГц. Для формирования лазерного ножа использовались фокусирующая и цилиндрическая линзы, так что толщина ножа в области измерения составила 6 мм и вертикальный разворот ножа около 100 мм. Поток засеивался частицами оксида алюминия (средний диаметр 4 мкм). Камеры системы располагались под углами в $\pm 45^\circ$, $\pm 15^\circ$ относительно нормали к плоскости измерения.

Для калибровки оптической системы использовалась плоская калибровочная мишень размером 60x60 мм с опорными точками-окружностями на декартовой сетке с шагом 3 мм. Также использовался алгоритм самокалибровки оптической системы по отдельным изображениям частиц с целью повышения точности реконструкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На Рис. 4 представлен результат работы алгоритма 3D PTV. Данное трехмерное распределение скорости было получено при обработке зарегистрированных в эксперименте проекций частиц. В данном исследовании использовалось 100 последовательно заснятых пар изображений, что позволяет отследить некоторые динамические характеристики потока, а не только статическое поле скорости. В частности, на поле скорости отчетливо видно треки движения отдельных частиц. Используя эти данные, можно отобразить характерные линии тока, характерные для изучаемого потока, что трудно сделать с достаточно хорошим разрешением корреляционными PIV алгоритмами. Другой интересный аспект отслеживания движения частиц заключается в том, что можно рассчитать ускорение движения частицы по всему пути ее следования или Лагранжево ускорение с точностью выше, чем это позволяют корреляционные методы [6]. Данный член входит как слагаемое в уравнения Навье-Стокса и его оценка позволит определять мгновенное поле давления для несжимаемых изотермических потоков. Так же информация о скорости частиц на траектории их движения позволяет получать Лагранжеву статистику для частиц, движущихся в потоке.

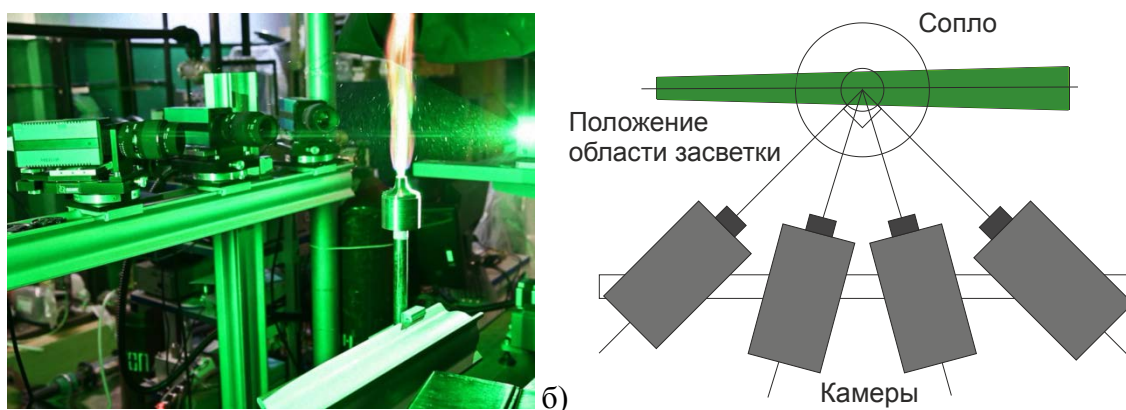


Рис. 3 Фотография экспериментального стенда во время проведения измерений а), схема оптической конфигурации измерительной системы б)

Обработанные данные с помощью представленного метода позволяют увидеть вихревые структуры, в слое смешения струйного течения, а также огибающие линии тока, проходящие ближе к краям измерительной области.

Существенной проблемой, возникавшей в ходе обработки, было значительное количество неверных векторов, из-за чего поле скоростей получало множество неверных направлений. Данная проблема возникла в результате слишком большой плотности засева, ввиду того, что параметры эксперимента были оптимизированы специально для томографических измерений, а не для трассировки отдельных частиц. Отсев заведомо не корректных векторов осуществлялся алгоритмом, основанным на локальной непрерывности потока, который обеспечивает достаточную гладкость конечного поля. Другой сложностью эксперимента стала существенная неоднородность засева потока частицами, вследствие отсутствия явного засева внешней области течения. Особенностью эксперимента является большая концентрация трассеров в ядре струи, или центральной части изучаемой области, при почти полном их отсутствии на краях области измерения. Данное обстоятельство создавало дополнительные трудности для получения полной картины движения потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена настройка процедуры оптимизации Левенберга-Марквардта положения трассерных частиц полученных в результате триангуляции по набору плоских проекций. Выполнено тестирование влияния оптимизации на точность оценки поля смещения частиц на синтетически сгенерированных проекциях с известным аналитически заданным смещением частиц. Показано, что полная ошибка оценки смещения уменьшается до 0,06 мм (16%) при максимальной амплитуде смещения в 0,36 мм. Показано, что при использовании величины радиуса кластеризации сравнимого с поправкой положения частиц вызванной процедурой минимизации количество определенных частиц увеличивается на 1-10% в зависимости от концентрации трассеров в измерительном объеме.

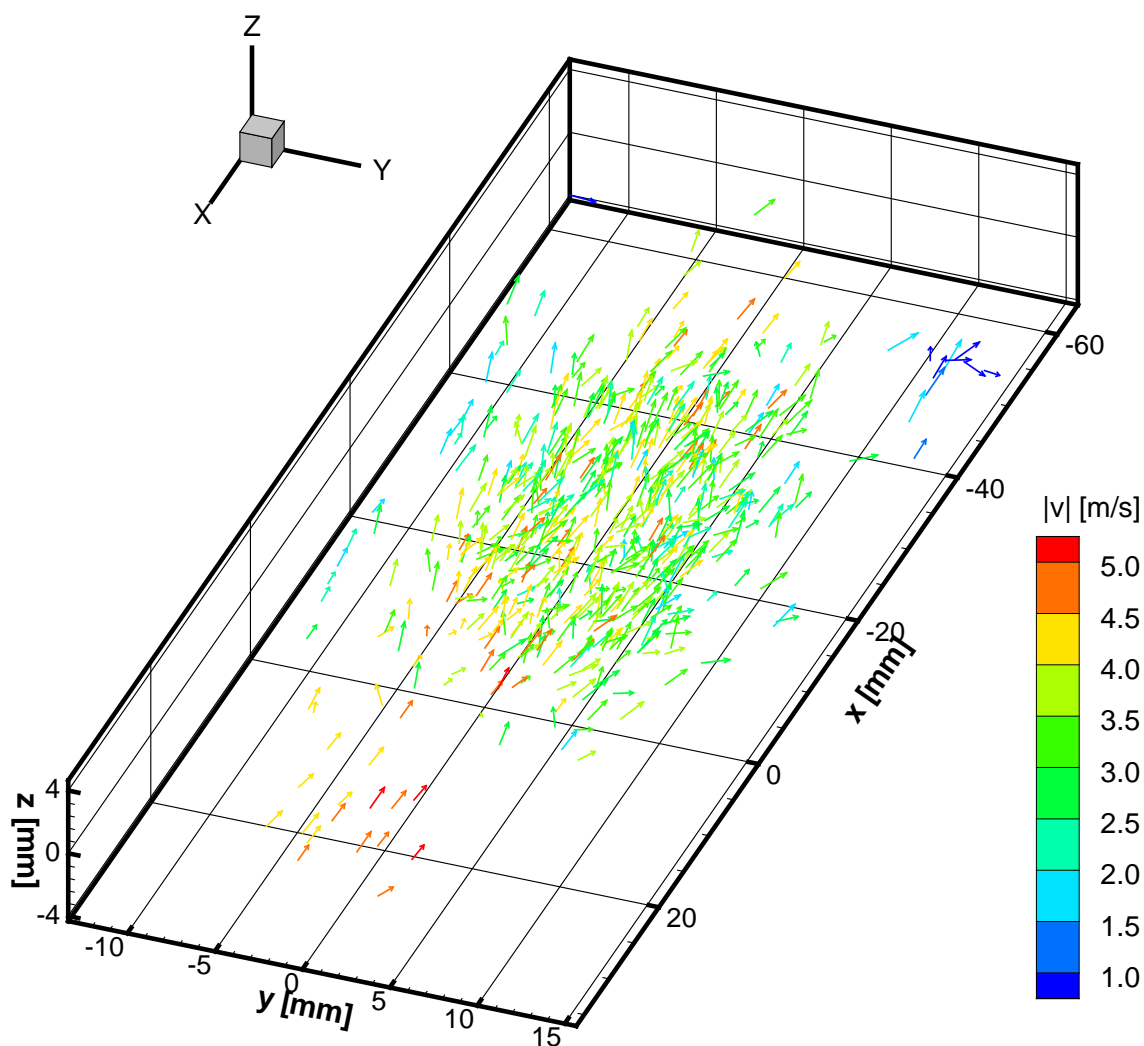


Рис. 4 Полученное трехмерное распределение скорости в измерительном объеме (объединено 100 мгновенных последовательных распределений скорости за время измерения 142 мс). На рисунке визуализируются треки частиц.

Указанная нелинейная оптимизация позволила снизить погрешность определения смещения зарегистрированных частиц в объеме потока максимум на 0,09 мм для реального тестового эксперимента по исследованию турбулентной затопленной струи жидкости. Это составило около 11% от максимального смещения частиц в потоке (0,8 мм).

Выполнено распараллеливание кода процедуры триангуляции положения частиц в объеме потока с использованием технологии OpenMP. Время обработки данных снизилось в 4,7 раз по сравнению с последовательным режимом обработки.

Применение модифицированного метода в томографическом эксперименте, продемонстрировало применимость данного алгоритма к такому сорту данных с получением новых характеристик потока.

В целях дальнейшего повышения качества получаемых данных и извлечения новой информации, планируется модификация алгоритма, направленная на извлечение треков отдельно взятых частиц. Также в будущем планируется создание методов для оценки поля скорости в объеме путем отслеживания положений отдельных частиц по реконструированному томографическими методами объемному изображению. Это позволит повысить рабочую концентрацию трассеров в измерительном объеме для алгоритмов трассировки отдельных частиц, по сравнению с получением распределения частиц путем триангуляции по зарегистрированным проекциям используемому в настоящее время. Все это даст возможность более детально изучать дисперсные потоки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа была поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант №13-08-01356), Федеральной целевой программой “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–013 гг. (проект № 8233) и Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (договор №1839)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Takehara, K. and Etoh, T.** A Study on Particle Identification in PTV Particle Mask Correlation Method // 1999 The Visualization Society of Japan and Ohmsha, Ltd. Journal of Visualization, Vol. 1, No. 3 (1999) 313-323
2. **Akhmetbekov Y.K., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P.** Multiset Triangulation 3D PTV and its Performance Compared to Tomographic PIV // 9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – PIV’11 Kobe, Japan, July 21-23, 2011
3. **Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O.** METHODS FOR NON-LINEAR LEAST SQUARES PROBLEMS 2nd Edition // Informatics and Mathematical Modelling Technical University of Denmark
4. OpenMP Application Program Interface // <http://openmp.org>
5. **Ohmi K., Li H.-Y.** Particle-tracking velocimetry with new algorithms // Osaka Sangyo University, Department of Information Systems Engineering, 3-1-1 Nakagaito, Daito-shi, Osaka 574-8530, Japan
6. **Novara M., Scarano F.** Lagrangian acceleration evaluation for tomographic PIV: a particle-tracking based approach // In: 16th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, pp 09–12 July, 2012

Akhmetbekov Y.K.,¹, Karchevskiy M.N.², Tokarev M.P.^{2,3}

¹ Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan
53, Kabanbay batyr Ave., Astana, 010000, Republic of Kazakhstan,
E-mail: yerbol.akhmetbekov@nu.edu.kz

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 2, E-mail: karchevskymi@gmail.com

³ Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave., 1, E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

APPLICATION OF PARTICLE TRACING VELOCIMETRY ALGORITHMS FOR DIAGNOSTIC OF THREE DIMENSIONAL VELOCITY DISTRIBUTION OF DISPERSED FLOW

The present paper is concerned with the improvement of existing and development of new approaches to the processing of experimentally obtained data by tracking individual particle. The approach can be applied in practice to address current scientific and applied problems in fluid mechanics and gas, energetics, transportation systems, etc.

Each algorithm of the family of 3D PTV is divided into three parts: the search for the true position of particles in registered particle projections, the particle triangulation in 3D space and the matching of each particle in the first frame, a pair in the second frame. The study of three-dimensional flows has to use triangulation to find the three-dimensional coordinates of particles in a given volume by means of two or more projections with recording cameras. Modern three-dimensional experiments use 3 or 4 cameras to investigate flows in the majority of cases.

To improve performance it is planned to develop new algorithms and modify an existing code to make use of high performance computing systems, particularly graphic processors. Also the improvement of the existing and creation of new algorithms for the reconstruction of three-dimensional distributions of particles in a flow volume was done. Besides the calculation of the velocity field was performed in order to reduce the resource intensity of the algorithms, to improve the accuracy and spatial resolution of the measured velocity field. Testing of the existing or created algorithms in this work, defining their characteristics, making recommendations for using of different approaches was carried out.

PARTICLE TRACING VELOCIMETRY, THREE DIMENSIONAL VELOCITY