

*Мочалин А. Е., аспирант,
Гонтовой С. В., канд. техн. наук
Донбасский государственный технический университет*

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ТРАССЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

omigo@i.ua

Рассмотрено текущее состояние информационных технологий обработки цифровых трассерных изображений. Показано, что основными проблемами методов трассерной визуализации являются недостаточная точность при исследовании течений с большими градиентами скорости и высокие требования к параметрам изображений трассеров. Намечены дальнейшие перспективные пути совершенствования информационных технологий, используемых в трассерной визуализации. Проанализированы преимущества использования более совершенного, с технической точки зрения, оборудования в системах регистрации изображений и развития новых методов и алгоритмов обработки.

***Ключевые слова:** трассерная визуализация, система регистрации, алгоритм обработки, информационная технология.*

Постановка проблемы

Течения сплошных сред наблюдаются не только в натуральных условиях (потоки воздуха в атмосфере, течения в морях и океанах) и различных технических устройствах (двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели, кондиционеры и т.д.), но также и в биологических системах (кровоток в сосудах, движение потоков воздуха в дыхательных каналах). Поэтому изучение разнообразных потоков жидкостей и газов является одной из важнейших научно-практических задач. Довольно часто течения носят сложный характер, в частности, характеризующийся неравномерностью поля скоростей, нестационарностью и турбулентностью, что существенно затрудняет их изучение на основе известных теоретических моделей. В такой ситуации особенную ценность приобретают опытные данные, что, в свою очередь, требует развития методов и средств экспериментального анализа потоков сплошных сред.

В настоящее время существуют и активно развиваются различные оптические методы, позволяющие экспериментально получить информацию о количественных и качественных характеристиках потоков. Одним из наиболее перспективных и прогрессивных оптических методов является метод трассерной визуализации с международным названием Particle Image Velocimetry (PIV) [1]. Этот метод основан на определении мгновенных полей скорости в рассматриваемой области течения на основе определения смещений частиц - трассеров, подмешиваемых в поток, по их изображениям (рис. 1). К основным преимуществам метода PIV можно отнести отсутствия возмущающего влияния на поток и широкий динамический диапазон измеряемых скоростей.

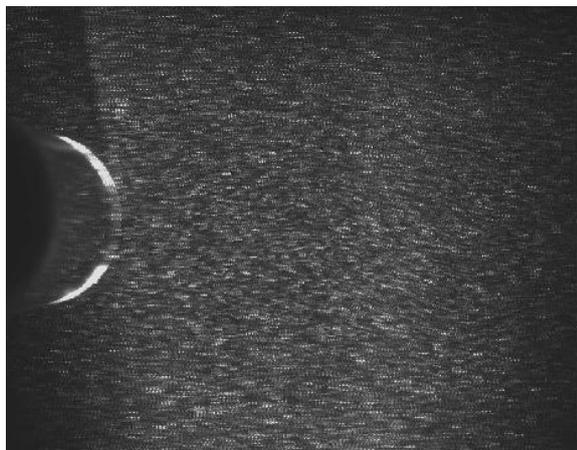
Область применения методов трассерной визуализации достаточно обширна. Она содержит в себе фундаментальные научные исследования, направленные на изучение динамики и масштабов вихревых структур в потоках жидкости и газа, получение дифференциальных и статистических характеристик, а также оценку достоверности математического моделирования и коррекцию численных моделей для турбулентных потоков. Трассерная визуализация используется при физическом моделировании технологических процессов в энергетике, химической промышленности.

Кроме этого, метод PIV широко применяется и в прикладных исследованиях. Например, он используется в медицине для получения детальных знаний о трехмерной структуре течений воздуха в легких и верхней дыхательной системе человека. Без этих знаний невозможно разработка и оптимизация вспомогательных дыхательных устройств.

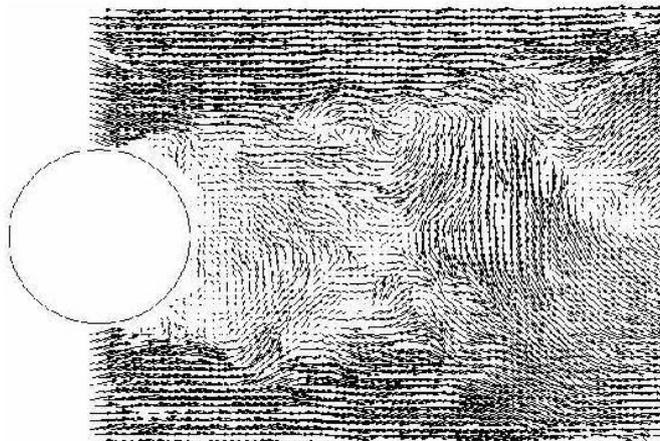
В последние десятилетия микрофлюидные устройства успешно используются в химической отрасли и в различных биотехнологиях. Тем не менее, до сих пор нет полного понимания гидродинамических процессов проходящих внутри данных устройств. Micro PIV измерения позволили значительно расширить знания о процессах происходящих в микропотоках. Впоследствии эти знания применялись для получения эффективной конструкции микросмесителей, микронасосов, микротеплообменников.

Важнейшей составной частью метода PIV является информационная технология обработки трассерных изображений [2] (фотографий маленьких частиц (трассеров), добавляемых в жидкость или газ), которая включает в себя метод обработки, алгоритмы, реализующие задан-

ный метод, и соответствующее программное обеспечение. Данная технология позволяет определять распределение скорости в исследуемом потоке по паре трассерных кадров.



а



б

Рис. 1. Совмещенные трассерные изображения (а) и рассчитанное по ним поле скоростей (б)

Современные проблемы трассерной визуализации и возможные пути их решения

Впервые термин «particle image velocimetry» применил в своей работе в 1984 году R. J. Adrian. С тех пор прошло уже больше 25 лет и различными авторами было разработано огромное количество методов, применяемых в информационных технологиях обработки трассерных изображений. Число публикаций, посвященных методам трассерной визуализации, за один 2000 год превысило несколько сотен и с каждым годом продолжает расти. Все это

Цель данной работы – выделить основные нерешенные проблемы метода PIV и охарактеризовать возможные пути развития информационных технологий обработки трассерных изображений.

определяет растущую популярность трассерной визуализации.

Современные алгоритмы обработки трассерных изображений позволяют определять смещение трассеров на изображениях с точностью до десятых пикселя. В основе большинства из них лежит стандартный кросскорреляционный подход (рис. 2). Однако используемые в большинстве случаев адаптивные итерационные алгоритмы не подвержены негативному влиянию таких эффектов как «peak locking» [3] и «lose of pairs» [4] в отличие от стандартного кросскорреляционного метода.

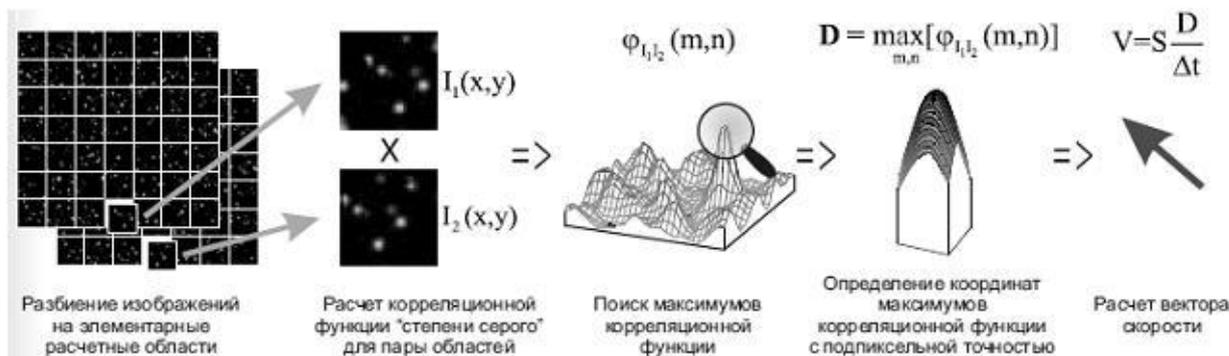


Рис.2. Основные этапы кросскорреляционного алгоритма

Среди основных проблем экспериментального исследования течений методом PIV следует указать неспособность корректно, с заданной точностью, обрабатывать изображения трассеров с большими локальными градиентами скорости и высокие требования к параметрам изображений (концентрация и размер трассеров, величина их дробного смещения).

Сложности в обработке трассерных кадров для течений с большими локальными градиентами скорости связаны с основной идеей кросскорреляционного подхода. Она предполагает, что все частицы внутри одной расчетной области (небольшой участок изображения, обычно имеющий форму квадрата) совершают одинаковое перемещение. Однако из-за наличия градиентов скорости трассеры могут совершать раз-

ные смещения в пределах одной расчетной области за время между фиксацией первого и второго кадров. Некоторые современные адаптивные кросскорреляционные алгоритмы пытаются преодолеть этот недостаток, за счет уменьшения размеров расчетных областей с каждой новой итерацией. Другим возможным решением данной проблемы является разработка нового метода, основанного не на кросскорреляционном подходе. В работе [5] автором предложен такой метод и показаны его преимущества.

Как уже указывалось выше, точность методов, используемых в информационных технологиях обработки трассерных изображений, зависит от различных параметров этих изображений. Например, в работе [6] указываются следующие рекомендации к характеристикам трассерных кадров:

- оптимальный размер частиц на изображении должен быть 1.5 – 2 пикселя;
- эффективное количество частиц должно быть не меньше 8 в одной отдельно взятой расчетной области (с учетом эффекта «потери пары»);
- максимально измеряемый сдвиг частиц в пределах одной расчетной области не должен превышать четверти этой области.

Иногда очень сложно выдержать все рекомендации при проведении эксперимента. Поэтому разработка методов, на точность которых слабо влияют различные характеристики изображений, является актуальным направлением совершенствования информационных технологий обработки цифровых трассерных кадров.

Для многих исследовательских учреждений, основным препятствием к использованию методов трассерной визуализации является высокая стоимость систем регистрации изображений частиц (рис. 3). Обычно система регистрации включает импульсный твердотельный лазер (чаще всего иттрий-алюминий-гранатовый Nd:YAG) с двойной головкой, используемый в качестве источника освещения, маленькие частицы - трассеры, добавляемые в исследуемое течение, и специальные кросскорреляционные камеры, регистрирующие свет, отраженный частицам.

Естественно, от технических характеристик оборудования, используемого в системах регистрации, зависят возможности метода PIV. Например, для исследования высокоскоростных турбулентных потоков, должны применяться лазеры с продолжительностью импульса порядка нескольких наносекунд. С другой стороны, в работе [7] продемонстрирована возможность за счет использования новых подходов к обработке трассерных изображений снизить технические

требования, предъявляемые к аппаратуре и условиям регистрации трассерных изображений.

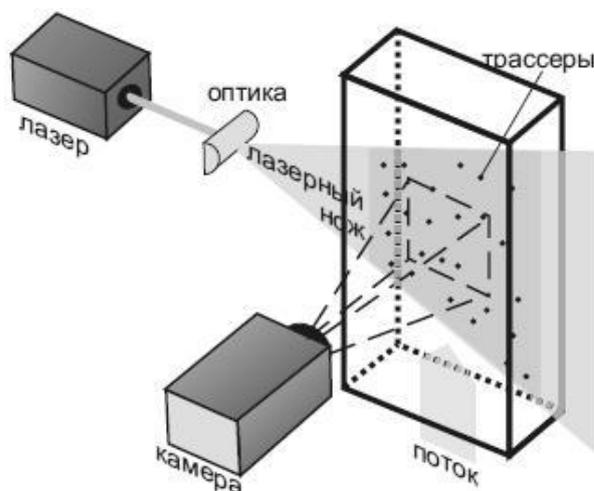


Рис. 3. Система регистрации трассерных изображений

При детальном анализе течений обычно необходимо обработать сотни, а иногда и тысячи пар трассерных кадров. В этом случае время расчета, которое напрямую зависит от выбранного метода обработки и применяемого алгоритма, становится критическим фактором. Возможным способом уменьшения временных затрат является использование параллельных либо распределенных вычислений. Вместе с этим, оно еще не нашло широкого применения в информационных технологиях обработки трассерных изображений. В работе [8] автором представлен алгоритм обработки, использующий возможности математических вычислений на графических процессорах, который позволил сократить время счета в 24 раза. При этом дополнительные затраты на оборудование минимальны, так как большинство современных видеокарт поддерживают программно-аппаратную архитектуру параллельных вычислений. Возможно, в ближайшем будущем информационные технологии обработки трассерных изображений будут в полной мере использовать кластерные системы, что позволит обрабатывать огромные массивы информации. Особенно остро вопрос скорости счета стоит в 3D PIV системах, которые позволяют получить три компоненты скорости, но при этом требуют значительных вычислительных ресурсов.

Еще одним направлением совершенствования информационных технологий обработки является разработка фильтров, подавляющих шум на изображениях трассеров. Источниками шума на трассерных кадрах могут быть самые различные факторы: несовершенство фотосенсора регистрирующей камеры, плохая освещен-

ность потока и многие другие [9]. Использование различных методик борьбы с шумом на изображениях позволяет существенно повысить точность конечных результатов.

Выводы

На основе изложенного материала можно говорить о растущей популярности информационных технологий, используемых в трассерной визуализации при экспериментальном исследовании потоков жидкости и газа. Хотя современные методы обработки трассерных изображений и обладают большим количеством преимуществ, однако не лишены и недостатков, о которых говорилось выше.

Дальнейший прогресс методов трассерной визуализации связан с совершенствованием систем регистрации изображений и развитием новых алгоритмов обработки.

Использование более совершенного, с технической точки зрения, оборудования в PIV экспериментах позволит:

- уменьшить промежуток времени между кадрами, что в свою очередь даст возможность количественно анализировать сложнейшие высокоскоростные потоки;

- увеличить качество получаемых изображений частиц, тем самым повысив точность экспериментального определения поля скорости;

- исследовать течения в микро и даже нано каналах, которые имеют свои отличительные особенности;

- конструировать мобильные, легко переносимые и быстро настраиваемые системы регистрации трассерных кадров.

Развитие новых методов и алгоритмов обработки трассерных кадров должно обеспечить высокую точность исследования турбулентных течений, а также снизить требования, предъявляемые к качеству входных изображений. За более чем двадцатилетнюю историю постоянного совершенствования, алгоритмы, основанные на кросскорреляции, практически исчерпали дальнейшие возможности увеличения точности. Поэтому, перспективным направлением является разработка методов трассерной визуализации, основанных на новых подходах анализа изображений частиц.

Одним из главных преимуществ кросскорреляционных подходов являлись низкие временные и вычислительные затраты. Однако использование различных технологий параллельных и распределенных вычислений позволит создавать новые алгоритмы, не уступающие по временной сложности, а возможно и превосходящие, современные адаптивные итерационные

методы, используемые в информационных технологиях обработки трассерных изображений.

В целом, совершенствование информационных технологий позволит, не снижая точности расчета искомого поля скоростей, уменьшить требования к техническим характеристикам систем регистрации, тем самым снизив их высокую стоимость, которая является одним из основных сдерживающих факторов применения методов трассерной визуализации для многих исследовательских групп.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Willert C. E. Digital particle image velocimetry / C. E. Willert, M. Gharib // *Exp. in Fluids*. – 1991. – Vol. 10, No. 4. – P. 181 – 193.
2. Мочалин О. Є. Розвиток інформаційних технологій обробки цифрових трасерних зображень / О. Є. Мочалин, С. В. Гонтовий // *Наукові праці. Серія «Комп'ютерні технології»*. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Вип. 130, Т 143. – С. 88 – 93.
3. Christensen K. T. The influence of peak-locking errors on turbulence statistics computed from PIV ensembles / K. T. Christensen // *Exp. in Fluids*. – 2004. – Vol. 36, No. 3. – P. 484 – 497.
4. Adrian R. J. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics / R. J. Adrian // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1991. – Vol. 269. – P. 261 – 304.
5. Мочалин А.Е. Информационная технология трассерной визуализации, основанная на оптимизации реконструированного изображения // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – Харків, 2010. – № 4. – С. 174 – 178.
6. Токарев М. П. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для обработки изображений в методах трассерной визуализации: дис. канд. техн. наук. 05.13.18. – Новосибирск, 2010 – 190 с.
7. Мочалин А.Е. Оценка точности алгоритма обработки цифровых трассерных изображений, основанного на оптимизации реконструированного кадра // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – Харків, 2011. – № 4. – С. 60 – 65.
8. Мочалин А. Е. Использование графических процессоров в алгоритмах обработки трассерных изображений // *Технологический аудит и резервы производства*. – Харьков, 2012. – № 6/4(8). – С. 39 – 40.
9. Мочалин А.Е. Фильтрация зашумленных трассерных изображений при их обработке с построением реконструированного // *Восточно – европейский журнал передовых технологий*. – Харьков, 2012. – № 1/2(55). – С. 58 – 63.