



ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА PIV, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ПОТОКОВ ГАЗОВ

Д.Л. Захаров, А.А. Логинова, В.П. Маслов,

Б.И. Минеев, А.К. Миронов (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Проведено комплексное исследование метода измерения мгновенных полей скоростей PIV. Выделяются и описываются характерные особенности областей применения метода, его основные преимущества. Рассмотрены алгоритмы обработки изображений, реализованные в автоматизированном комплексе PIV. В качестве примера описана отработка метода PIV при исследовании обтекания сверхзвуковым потоком моделей входных устройств авиадвигателя.

Ключевые слова: метод измерения мгновенных полей скоростей, поле скорости, алгоритмы обработки изображений.

Введение

Метод измерения мгновенных векторных полей скоростей по изображению частиц-меток PIV (Particle Image Velocimetry) позволяет измерять мгновенное поле двух или трех компонент скорости бесконтактным образом в широком диапазоне скоростей потока. На практике метод PIV очень удобен. Во-первых, результат измерений представляется в очень наглядном виде, благодаря чему метод можно считать не только измерительным, но и визуализационным. Во-вторых, метод характеризуется одновременным измерением всего поля скоростей, то есть при одном измерении получается векторное поле, содержащее несколько тысяч векторов скорости, в то время как для ЛДИС (Лазерно-доплеровский измеритель скорости) требуется много времени и действий для сканирования измеряемой области.

Метод PIV в настоящее время востребован в практических приложениях: в авиастроительной индустрии (для измерения скоростей в высокоскоростных потоках жидкости и газа, для исследования вихревых структур, в модельных камерах сгорания при исследовании шума струй, истекающих из шевронных сопел и т.д.), в автомобилестроении (в промышленных аэродинамических трубах для диагностики полной картины обтекания элементов летательных аппаратов и автомобилей), в энергетике, в химической и нефтегазодобывающей промышленности, в машиностроении (оперативная диагностика и оптимизация аэрогидродинамики в реальных аппаратах или их моделях), а также в медицине при физическом моделировании работы искусственных сосудов и клапанов.

Принцип работы метода PIV (Particle Image Velocimetry)

Принцип работы метода основан на измерении смещения частиц-маркеров в плоскости лазерного ножа за известное время между двумя последовательными кадрами изображения частиц [1]. Обыч-

но частицы-метки специально добавляются в поток жидкости или газа и движутся вместе с ним. Эти частицы освещаются в плоскости потока двумя последовательными вспышками лазера. Свет, рассеянный частицами, регистрируется на одном кадре или на последовательности кадров. При обработке полученных кадров с помощью специализированной компьютерной программы рассчитывается смещение изображений частиц между световыми импульсами. С учетом времени между кадрами вычисляется скорость частиц. Требуется глубокая обработка большого объема данных, полученных с помощью метода PIV, методами математического анализа и статистики.

Экспериментальная установка системы PIV обычно состоит из нескольких подсистем: устройства запыления потока, системы формирования лазерной плоскости, регистрирующей аппаратуры, обрабатывающего комплекса (компьютера). На рис. 1 схематично представлена типичная экспериментальная установка, оборудованная системой PIV. Поток засеивается маленькими (< 1 мкм) частицами. Предполагается, что вводимые частицы перемещаются вместе



Рис. 1. Экспериментальная установка PIV в аэродинамической трубе

с потоком без проскальзывания. Поток в изучаемой плоскости дважды освещается импульсным лазерным ножом (временная задержка между импульсами выбирается в зависимости от скорости потока). Свет, рассеянный частицами, регистрируется на специальной матрице ПЗС (прибор с зарядовой связью). Данные с матрицы ПЗС сохраняются в режиме реального времени в оперативной памяти компьютера, затем переписываются на жесткий диск.

Для оценки скорости в различных областях исследуемого потока цифровой кадр PIV разделяется на маленькие подобласти ("расчетные области"). Посредством статистических методов (авто- и кросс-корреляция) для каждой расчетной области определяется соответствующий вектор смещения изображений. Предполагается, что все частицы в пределах одной расчетной области переместились гомогенно между этими двумя импульсами. Вектор местной скорости потока вычисляется с учетом временной задержки между этими двумя импульсами и оптическим увеличением при отображении.

Процесс расчета повторяется для всех расчетных областей на снимке. Современными видеокамерами (3000 × 2000 пикселей) можно снимать более 5000 кадров в секунду. Оценка одного кадра PIV с 3600 мгновенными скоростными векторами (в зависимости от размера кадра и расчетной области) занимает несколько секунд на стандартном ПК.

Перед подробным рассмотрением метода PIV отметим несколько общих аспектов, чтобы облегчить понимание определенных технических решений.

– *Бесконтактное измерение скорости.* В отличие от контактных методов измерения скоростей, таких как трубки Пито или термоанемометра, оптический PIV метод не вносит возмущений в поток. Это позволяет применять PIV в сложных трехмерных высокотурбулентных потоках.

– *Измерение поля скорости.* PIV — метод, позволяющий рассчитывать скорость для больших областей потока в газообразных и жидких средах. Эта особенность уникальна для метода PIV. Кроме нового метода Глобального Доплеровского Измерения Скорости (DGV), предназначенного для расчета струй высокой скорости, все другие методы позволяют измерить скорость потока только в одной точке. PIV позволяет проводить измерения одновременно в большой области, тогда как временное разрешение ограничено возможностями оборудования. Эти особенности можно наблюдать, сравнивая результаты, полученные PIV, и традиционными методами. Мгновенные снимки пространственного течения, полученные с помощью PIV, позволяют обнаружить мгновенные пространственные структуры потока.

– *Косвенное измерение скорости.* PIV измеряет скорость потока косвенно — посредством измерения скорости частиц, содержащихся в потоке. В зависимости от исследуемого вещества частицы должны точно соответствовать свойствам данного вещества.

В противном случае они не будут следовать по потоку должным образом (проскальзывание, торможение), и результаты эксперимента не будут достаточно точными. Показатель преломления для частиц засева должен отличаться от жидкости (газа), которую они засевают, так чтобы лазерный нож, падающий на поток текучей среды, отражался от частиц и рассеивался по направлению к камере.

– *Погрешность измерения скорости.* Так как для косвенного измерения поля скорости потока используются частицы, то они должны двигаться со скоростью потока с определенной степенью точности. Погрешность измерения скорости в турбулентных потоках, обусловленную инертностью частиц-меток, можно оценить как отставание амплитуды акустических колебаний частиц-меток от колебаний среды по формуле:

$$A_m = 1 - \frac{K_v}{\sqrt{K_v^2 + \omega_m^2}},$$

где ω_m — частота колебаний среды,

$$K_v = \frac{18 \times \mu_0}{\rho_p \times d_p^2},$$

где μ_0 — вязкость среды, ρ_p — плотность материала частиц, d_p — диаметр частиц.

– *Освещение.* Для изучения газовых потоков требуется мощный источник светового импульса, чтобы свет, рассеянный частицами, соответствовал чувствительности камеры. В газовых потоках, как правило, используются твердотельные импульсные лазеры. В потоках жидкости могут быть использованы большие частицы, которые рассеивают намного больше света. Таким образом, здесь могут быть использованы источники света значительно менее мощные.

– *Продолжительность импульса.* Продолжительность светового импульса должна быть достаточно короткой, чтобы движение частиц было "заморожено" во время импульса. Поэтому часто используют твердотельные Nd:YAG лазеры, которые обладают малой длительностью импульса (4...10 нс). В таких лазерах в качестве активной среды используется алюмоиттриевый гранат (Y3Al5O12) с добавками неодима (Nd).

– *Временная задержка между импульсами.* Временная задержка между импульсами должна быть одновременно достаточно большой, чтобы можно было определить смещение между изображениями частиц в плоскости лазерного ножа с необходимым разрешением, и достаточно малой, чтобы избежать вылета частиц с большими нормальными компонентами скорости из плоскости лазерного ножа. Обычно этот параметр выбирают таким, чтобы смещение частиц не превышало 3/4 размера расчетной области.

– *Распределение частиц в потоке.* Для высококачественной съемки желательно добиться равномерного распределения частиц-меток. Обычно можно увидеть области потока с низкой или высокой концентрацией частиц. Неравномерность распределения частиц может быть обусловлена неверным использованием за-

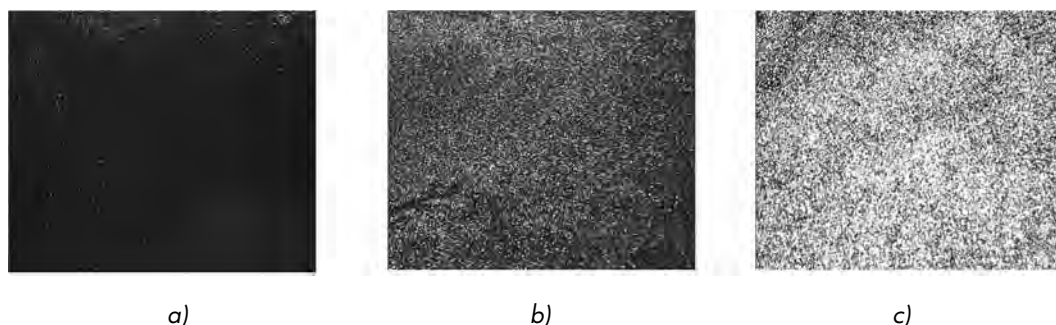


Рис. 2. Кадры с разной плотностью изображения частиц: (а) низкая (PTV), (б) средняя (PIV), (с) высокая плотность изображения (LSV)

пыляющего устройства или особенностями течения. Области течения с низкой концентрацией частиц желательнее засеять частицами дополнительно.

— *Плотность изображений частиц при записи PIV.* Качественно по плотности изображения частиц-меток можно отличить три различных типа кадров, которые проиллюстрированы на рис. 2. В случае низкой плотности (рис. 2а) можно увидеть изображения отдельных частиц, и на парных кадрах могут быть идентифицированы изображения, соответствующие той же самой частице. Низкая плотность изображения при оценке поля скорости требует методов «слежения». Соответствующий метод называется Particle tracking velocimetry (PTV). В случае средней плотности (рис. 2б) можно увидеть изображения отдельных частиц. Однако теперь нельзя распознать изображения на двух последовательных кадрах, соответствующие одной и той же частице. При средней плотности изображения частиц лучше всего применять стандартные статистические методы оценки, такие как PIV. В случае высокой плотности изображения (рис. 2с) уже нельзя обнаружить изображения отдельных частиц, поскольку они перекрываются, образуя сложные формы. Соответствующий метод обработки таких кадров называют laser speckle velocimetry (LSV).

— *Число компонент вектора скорости.* При использовании одной фотокамеры в стандартном методе PIV могут быть определены только две компоненты вектора скорости. Существуют методы получения третьей компоненты вектора скорости (стерео метод PIV, голографическая регистрация, топографический метод). Метод PIV, использующий две фотокамеры, называют стерео PIV.

— *Расширение объема наблюдения.* Общим способом расширения объема наблюдения является голографический метод. Существуют другие методы, такие как установка нескольких параллельных лазерных ножей или просмотр объема во временной последовательности.

— *Размер расчетной области.* Размер расчетной области должен быть достаточно малым, чтобы точно выявить вектор скорости. Кроме того, размер определяет число независимых векторов скорости и, следовательно, максимальное пространственное разрешение поля скоростей, которое может быть получено при данном пространственном разрешении камеры.

Таким образом, мы рассмотрели основные особенности метода PIV. Главное преимущество метода состоит в том, что он позволяет получить мгновенное векторное поле скоростей потока в большой области пространства.

Алгоритмы обработки изображений

Одной из основных операций метода PIV является обработка полученных в эксперименте изображений. Все поле течения разбивается на элементарные расчетные области, для каждой из этих областей вычисляется корреляционная функция сдвигов частиц. Различают несколько модификаций количественной стробоскопической визуализации в зависимости от концентрации частиц и соответственно методов обработки. В качестве критерия обычно используется параметр N_i — плотность образов частиц, определяемый как

$$N_i = C \times \Delta z_0 \times \left(\frac{D_i}{M_0}\right)^2,$$

где C — счетная концентрация частиц-меток, Δz_0 — толщина лазерного ножа, D_i — размер расчетной области, M_0 — коэффициент увеличения. При $N_i \ll 1$ применяются подходы, в основе которых лежит анализ перемещений каждой частицы (Particle Tracking Velocimetry — PTV), при $N_i \gg 10$ проводится анализ спекловых картин (Laser Speckle Velocimetry — LSV). Метод PIV, для которого $N_i \approx 10$, предполагает использование корреляционных алгоритмов обработки изображений частиц-меток.

Существуют два основных корреляционных алгоритма: автокорреляционный — в этом случае на одном кадре записаны как начальные положения частиц-меток, так и конечные; и кросскорреляционный, когда начальные и конечные положения частиц-меток фиксируются на разные кадры. Использование кросскорреляционных алгоритмов является предпочтительным, поскольку в автокорреляционных алгоритмах начальные и конечные положения частиц-меток равнозначны и смещение определяется с точностью до знака. Для однозначного определения направления скорости в этом случае необходимо либо привлекать априорные знания о направлении потока, либо использовать дополнительные технические решения (разделение двух кадров по длине волны рассеиваемого излучения, мно-

гоимпульсные модификации с различными временными задержками и т.д.).

Кратко сущность кросскорреляционного подхода заключается в следующем. Имеются два изображения, на одном из которых зафиксированы частицы в момент первой вспышки, а на другом — в момент второй вспышки лазера. Каждое изображение разбивается на элементарные расчетные области размером $d_x \times d_x$. Интенсивность отраженного от частиц и зарегистрированного камерой света (степень серого) можно представить дискретной функцией двух переменных x и y : $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ для первого и второго кадра соответственно.

Рассчитывается взаимная корреляционная функция для двух случайных дискретных величин [2]:

$$C_{I_1, I_2}(m, n) = \sum_{l=-\frac{d_y}{2}}^{\frac{d_y}{2}} \sum_{k=-\frac{d_x}{2}}^{\frac{d_x}{2}} I_1(k, l) \times I_2(k+m, l+n), \text{ где } k, l, m, n \text{ — координаты пикселей.}$$

В применяемых в методе PIV алгоритмах используются преобразования Фурье [3]. Такой метод значительно быстрее «прямого» расчета корреляционной функции по формуле, приведенной выше.

Максимум корреляционной функции соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной расчетной области (рис. 3). При этом в идеальном случае предполагается, что скорость потока в расчетной области неизменна, и все частицы совершают одинаковое перемещение, то есть у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума. Для более точного определения координат максимума используется подпиксельная интерполяция корреляционной функции в окрестности ее максимума.

Интерполяция может проводиться независимо по обеим координатам, а интерполирующая функция может быть самой различной (например, полином второй степени или функцией Гаусса). Расстоянием смещения частицы считается координата максимума интерполирующей функции, определяемая с точностью выше 1 пикселя.

Зная временную задержку между вспышками лазера Δt и рассчитав наиболее вероятное перемещение частиц D в данной расчетной области, можно вычислить скорость:

$$V = \frac{S \times D}{\Delta t},$$

где S — масштабный коэффициент для пересчета скорости в размерность м/с.

Подобная операция, проведенная для каждой расчетной области, на которые разбито все поле течения,

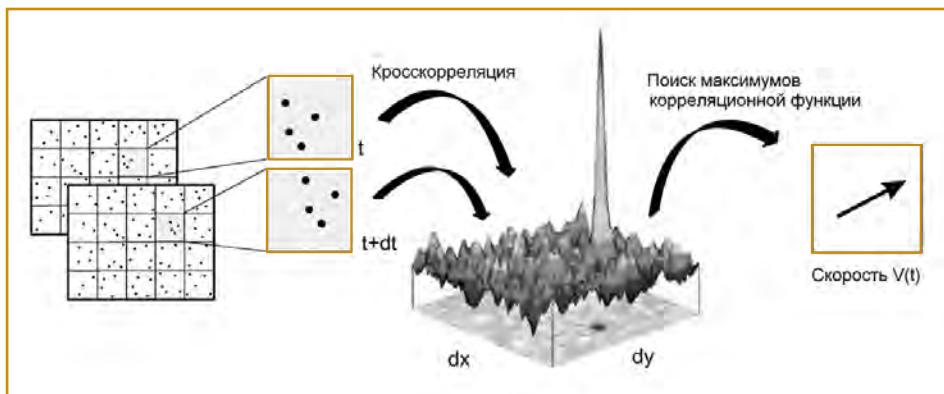


Рис. 3. Процесс получения величины смещения изображения частиц

позволяет рассчитать мгновенное поле скорости. Обычно используется регулярное разбиение с определенной степенью перекрытия ячеек. Здесь и далее по тексту под мгновенным полем скорости понимается поле скорости, осредненное за время между вспышками лазера.

Фильтрация ошибочных векторов

Автоматическая обработка изображений неизбежно приводит к появлению ошибочных векторов. Источником подобных ошибок могут быть различные факторы, такие как низкое качество изображения в данной измерительной ячейке, недостаточное число частиц-меток, большие величины градиентов, существенные значения перпендикулярной лазерному ножу компоненты скорости и т.д. Число ошибочных векторов определяет качество измеряемых данных и при оптимальных параметрах эксперимента не превышает 3...5% от общего числа векторов. Для определения ошибочных векторов обычно используются следующие критерии.

1) Отбор по абсолютному значению скорости основан на априорных представлениях о структуре потока. Рассчитанный вектор считается ошибочным, если его абсолютное значение (или значение одной из компонент) не лежит в задаваемых рамках.

2) Отбор по отношению сигнал/шум — один из основных способов отбора. Критерием такого отбора служило соотношение максимумов корреляционной функции или Q -фактор:

$$Q = \frac{M1 - \text{мин}}{M2 - \text{мин}} > 1,$$

где мин — наименьшее значение корреляционной функции, $M1$ — наибольшее значение корреляционной функции, $M2$ — второе по величине значение корреляционной функции (рис. 4).

Если параметр Q близок к 1, то вектор — ошибочный. Необходимо указывать такие значения Q , чтобы отбраковать все ошибочные вектора и наименьшее количество верных векторов. Типичное значение порогового уровня равно 1,3.

3) Отбор по локальному среднему, в основе которого лежат соображения о локальной неразрыв-

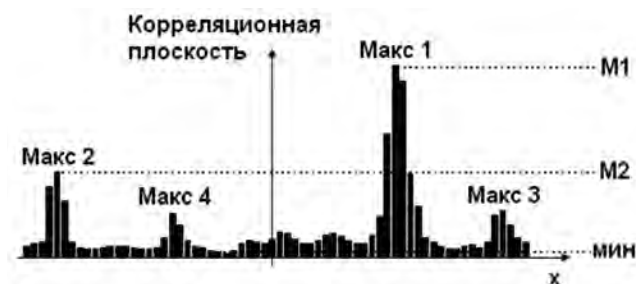


Рис 4. Проекция графика корреляционной функции

ности поля скорости. Каждая компонента V^i вектора $V(V^x, V^y, V^z)$ проверяется на соответствие условию: $V^i_{median} - r \times V^i_{rms} < V^i < V^i_{median} + r \times V^i_{rms}$, где r — коэффициент отбора. Компоненты V^i восьми соседних векторов сортируются в порядке возрастания, и значение V^i_{median} определяется как среднее между третьим и четвертыми числами в получившейся последовательности. V^i_{rms} определяется следующим образом:

$$V^i_{rms} = \max(1, \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (V^i_j - V^i_{median})^2}),$$

где $N=6$, так как в расчете не учитываются самое большое и самое маленькое значения $V^i_j - V^i_{median}$. Если хотя бы одна из компонент вектора не удовлетворяет условию отбора, то вектор отбраковывается и проверяются вектора, соответствующие другим трем максимумам корреляционной плоскости (рис. 4). Если все компоненты одного из этих векторов соответствуют условию: $V^i_{median} - p \times V^i_{rms} < V^i < V^i_{median} + p \times V^i_{rms}$, то вектор считают верным и подставляют его значение в поле векторов. В большинстве расчетов значения коэффициентов отбора следующие: $r = 4$; $p = 2$.

Обработка метода PIV при исследовании обтекания моделей входных устройств авиадвигателей сверхзвуковым потоком

С разнообразными результатами применения PIV в течениях, характерных для ГТД, можно ознакомиться в работе [4]. В данной работе в качестве примера

успешного применения PIV представлено исследование обтекания сверхзвуковым потоком моделей входных устройств авиадвигателя (воздухозаборник). Эксперимент проводился на сверхзвуковой аэродинамической трубе (рис. 5).

Для введения лазерного ножа и аэрозоля в канал аэродинамической трубы используется специальное устройство. Нижняя стенка устройства располагалась на той же высоте, что и верхняя стенка канала, чтобы не образовывался уступ или каверна в стенке канала. Также в эту стенку было вмонтировано оптическое окно (5) для передачи лазерного излучения в канал аэродинамической трубы на зеркало (3). К нижней стенке устройства крепилось зеркало (3) с помощью штанги (4) под углом 45° к оси канала. Штанга (стальной стержень диаметром 16 мм) могла вращаться вокруг своей оси для возможности юстировки передающей оптической схемы.

Ниже по потоку от зеркала крепился цилиндрический зонд-распылитель (6), через который подавались частицы-маркеры для засеивания потока.

В эксперименте были проведены измерения полей двух компонент скорости в продольном сечении модели пространственного воздухозаборника, проходящем через ее ось симметрии. При этом использовались значения числа набегающего потока $M = 2; 2,1; 2,5$ для различных значений степени дросселирования воздухозаборника, которые варьировались в диапазоне $1...0,4$. Расчет полей средней и пульсационной скорости проводился по измерениям 500 мгновенных полей. Регистрация картин визуализации производилась с частотой 4 Гц.

Для расчета мгновенных полей скорости использовалась многопроходная схема расчета полей скорости. При первом проходе расчета размер окна опроса составлял 32×32 пикселя с весовой функцией, вытянутой вдоль осевой компоненты (в соотношении 2:1). Такая весовая функция лучше, чем круговая (соотношение 1:1), подходит для обработки изображений частиц, имеющих большее смещение в горизонтальном направлении вдоль оси канала.

Большое окно опроса в первом проходе необходимо для определения скоростей в диапазоне порядка ± 700 м/с (для осевой компоненты). Однако при этом пространственное разрешение измерений очень низкое, так как 32 пикселя соответствуют расстоянию ≈ 2 мм между векторами, что недостаточно для качественного пространственного разрешения скачков. Для увеличения пространственного разрешения выполнялись дополнительные проходы с уменьшенными окнами опроса. Второй и третий проходы имели

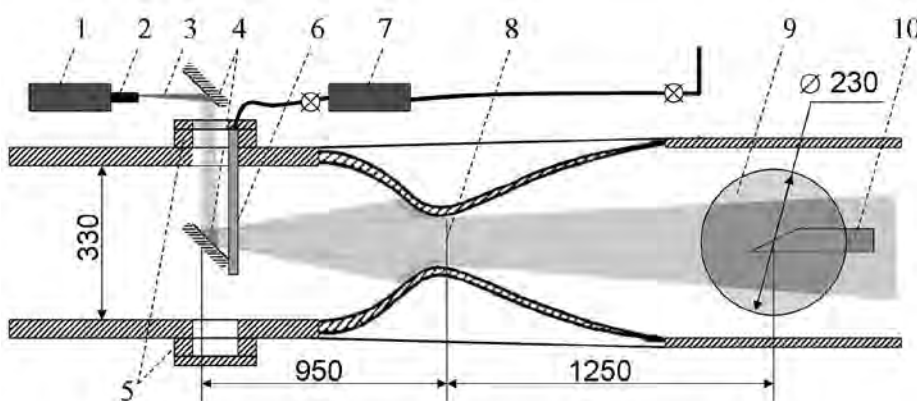


Рис. 5. Схема сверхзвуковой аэродинамической трубы, где 1-импульсный лазер, 2- цилиндрическая линза, 3- лазерный луч, 4- зеркала, 5-патрубки, 6-зонд-распылитель аэрозоля, 7- генератор частиц, 8-критическое сечение сверхзвукового сопла, 9- окно в области размещения модели, 10- модель входного устройства.

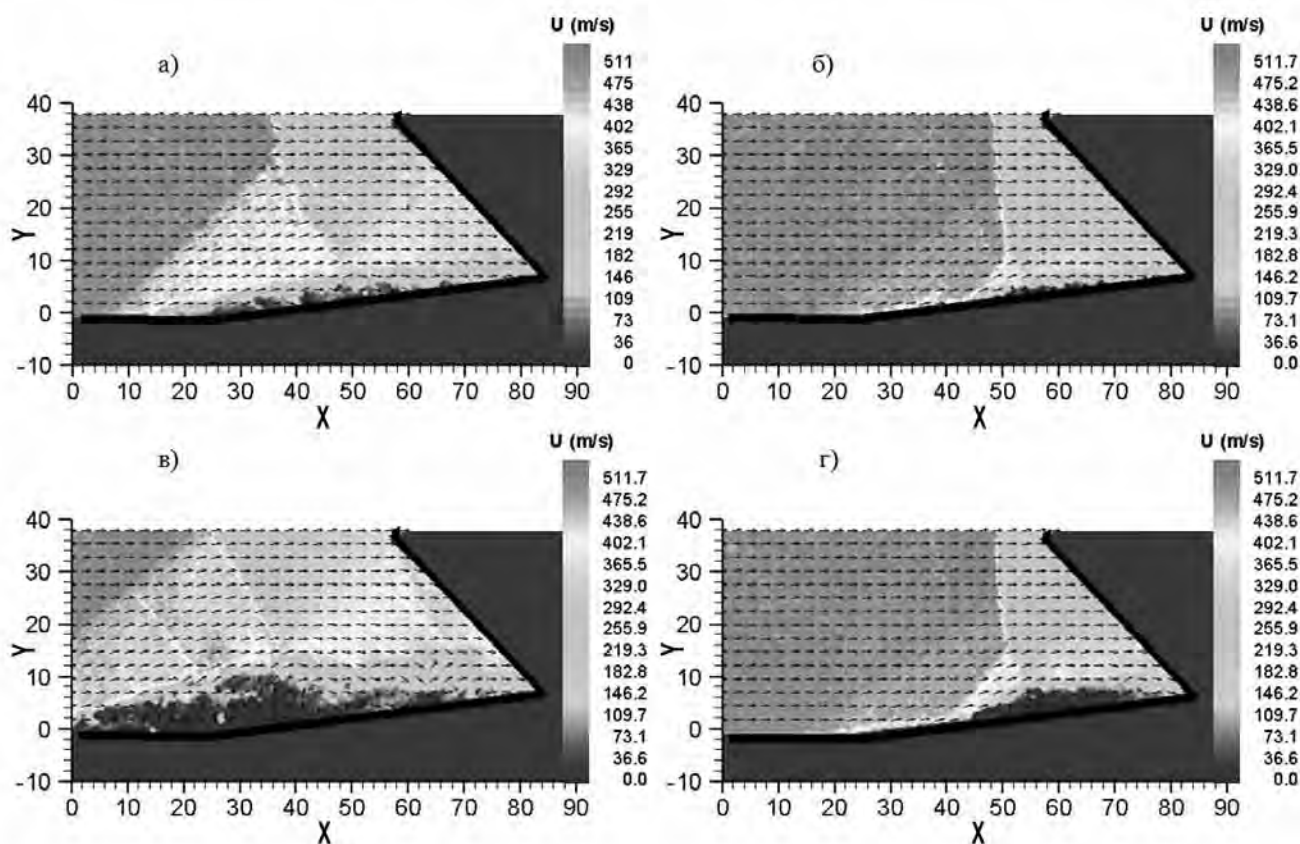


Рис. ба-г. Мгновенные поля вектора скорости, измеренной при числе M набегающего потока 2 для степени дросселирования, равной 1 (без дросселирования). Поля вектора скоростей отображаются цветовой палитрой в соответствии со шкалой U

окна опроса 16×16 и 12×12 пикселей соответственно. В последнем проходе расчета размер окна опроса составлял 8×8 пикселей с 50% перекрытием окон опроса. Первый проход выполнялся без смещения окон опроса, в последующих проходах окна опроса смещались на расстояние, соответствующее скорости вычисленной при предыдущем проходе, что позволяет уменьшить погрешность вычисления больших значений скорости (больших смещений частиц). В итоге локальность измерений скорости в плоскости лазерного ножа (размер области пространства, которому присваивается одно значение

вектора скорости) составляла $0,25 \times 0,25$ мм. Такое высокое пространственное разрешение необходимо для определения положения скачков уплотнения, возникающих при сверхзвуковом обтекании модели.

Из-за неравномерного распределения концентрации частиц на изображениях обработка по стандартному кросскорреляционному алгоритму давала много ошибочных векторов. С целью уменьшения числа ошибочных векторов была применена специальная процедура — постобработка. Характер течения на разных режимах существенно различается. Существуют режимы

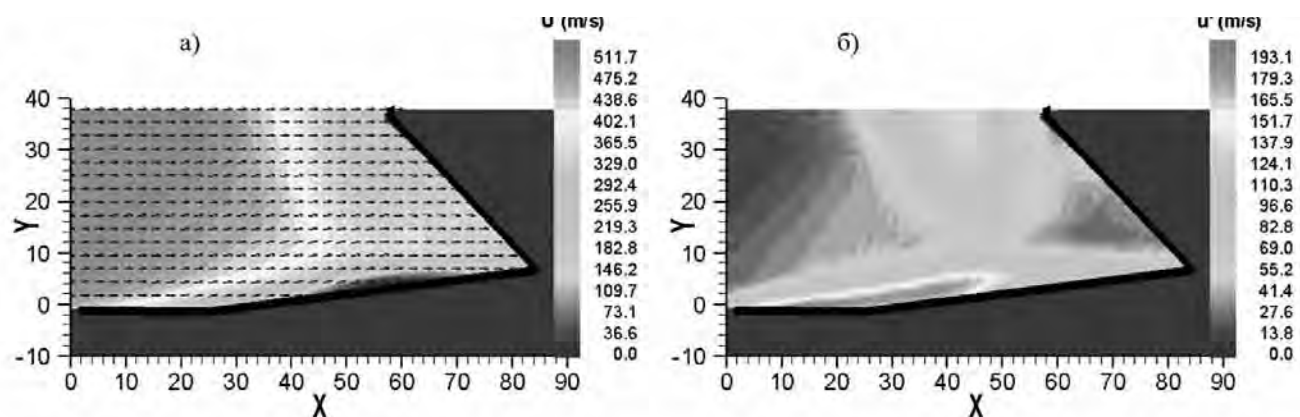


Рис. 7. а) Поле средней скорости, б) поле пульсаций скорости при числе M набегающего потока 2 для степени дросселирования, равной 1 (без дросселирования). Поля скоростей отображаются цветовой палитрой в соответствии со шкалой U на (а) и U' (б)

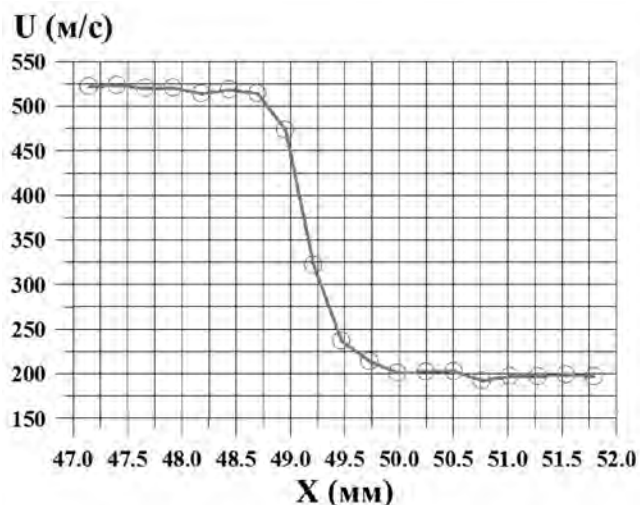


Рис. 8. Профиль скорости частиц при прохождении прямого скачка уплотнения, скорость набегающего потока $M=2$

со стационарным режимом течения, на некоторых режимах наблюдается существенная нестационарность (менялось положение системы скачков, появлялись нестационарные зоны отрыва течения). Поэтому параметры постобработки необходимо определять индивидуально для каждого режима путем анализа полученных предварительных полей скорости. Так, например, нижняя граница допустимого диапазона скоростей осевой компоненты на разных режимах варьировалась от -400 до 0 м/с, при верхней границе, соответствующей $600...700$ м/с. Диапазон поперечной компоненты устанавливался в пределах $\pm 200... \pm 400$ м/с.

В качестве примеров полученных результатов измерений на рис. 6а-г показаны мгновенные поля вектора скорости, измеренной при числе M набегающего потока 2 для степени дросселирования, равной 1 (без дросселирования). Толстой черной линией на всех рисунках обозначен контур входной части воздухозаборника в поперечном сечении.

На рис. 7а показано поле средней скорости и пульсаций скорости рис. 7б потока для этого режима течения ($M=2$ при степени дросселирования 1).

Из рис. 6 а-г видно, что система скачков, образующихся на входе в воздухозаборник, имеет нестационарный характер. В результате на поле средней скорости, показанном на рис. 7а, для этого режима течения границы скачков размазаны. Вблизи нижней стенки воздухозаборника наблюдается зона отрыва пограничного слоя. Пульсации скорости в области скачков и особенно в области отрыва потока, имеют очень высокие значения $100...200$ м/с, $\frac{u}{\langle U_0 \rangle} \approx 20...40\%$. В на-

бегающем потоке значение пульсаций скорости $\frac{u}{\langle U_0 \rangle} \approx 2.5\%$.

При измерениях в сверхзвуковых течениях важным методическим вопросом является длина релаксации частиц, используемых для запыления потока, (расстояние, на котором скорость частиц приобретает скорость воздушного потока при прохождении через скачок уплотнения). Используя результаты измерений, можно оценить длину релаксации частиц аэрозоля, которые использовались в описанных выше экспериментах, при скорости набегающего потока $M = 2$. На рис. 8 показан профиль скорости частиц при прохождении прямого скачка уплотнения, полученный из мгновенного поля скорости, рис. 6 б, координата $Y = 30$ мм.

Из рис. 8 видно, что длина релаксации используемых частиц аэрозоля составляет величину порядка 1 мм, что соответствует теоретическим оценкам [5]. Такая длина релаксации является удовлетворительной для данных экспериментов.

Заключение

Приведенный пример иллюстрирует, что реализованные в автоматизированном комплексе PIV алгоритмы обработки изображений, позволяют получать трехмерное поле скорости для достаточно сложных потоков. Результат обработки PIV изображений представляется в виде наглядной картинки визуализации потока.

Таким образом, использование стерео PIV метода для исследования сложных газовых потоков является наиболее перспективным, поскольку с допустимой погрешностью решает как задачу измерений, так и задачу визуализации.

Список литературы

1. Raffel M., Willert C.E., Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry: A practical guide. 2nd edn, Springer, Heidelberg, 2001.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. «Теория систем автоматического регулирования». М.: Наука, 1972.
3. Васильев К.К., Глушков В.А., Дормидонтов А.В., Нестеренко А.Г. Теория электрической связи: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2008.
4. Захаров Д.Л. Отработка методики измерения полей скоростей и концентраций с помощью PIV в течениях характерных для ГТД // Труды МАИ. Электронный журнал. 2011. № 45.
5. Scarano F. Overview of PIV in Supersonic Flows. Topics Appl. Physics, vol. 112, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 445-463, 2008.

Захаров Дмитрий Леонидович — начальник сектора,

Логинова Анна Андреевна — инженер (студент МГТУ им. Н.Э.Баумана),

Маслов Владимир Павлович — начальник сектора,

Минеев Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, начальник отдела, главный метролог,

Миронов Алексей Константинович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

Контактный телефон (499) 763-57-47.

E-mail: zdl@ciam.ru