

## Применение метода проекций для ускорения нового алгоритма измерения мгновенных полей скорости потока

Д. И. Зарипов<sup>1,\*</sup>, Н. И. Михеев<sup>1</sup>, Н. С. Душин<sup>1</sup>, А. К. Аслаев<sup>2</sup>, Р. Р. Шакиров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский научный центр РАН, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет, Россия

\*Контактный e-mail: zaripov.d.i@mail.ru

Исследована возможность применения метода проекций для ускорения нового оптического метода измерения мгновенных полей скорости потока по результатам дымовой визуализации. Алгоритм основан на анализе интегральных проекций изображений на координатные оси. Исследовано изменение случайной и систематической ошибок измерения в зависимости от величины однородного смещения частиц с диаметрами 2.2 и 10 пикс. На примере синтезированных изображений размерами  $16 \times 16$ ,  $32 \times 32$  и  $64 \times 64$  пикс показано, что применение алгоритма ускорения позволяет увеличить скорость обработки результатов измерений примерно в 16, 140 и 1060 раз соответственно, однако снижает точность полученных данных по отношению к новому методу Smoke Image Velocimetry при обработке изображений с крупными частицами (10 пикс), моделирующих дымовые структуры. Тем не менее результаты, полученные с применением алгоритма ускорения, не уступают по точности аналогичным данным, полученным с применением метода Particle Image Velocimetry. Отмечается, что областью применения алгоритма ускорения может быть предварительное определение начального значения смещения с последующим его уточнением при использовании более точных алгоритмов вычисления.

*Ключевые слова:* снижение вычислительных затрат, оптический метод, дымовая визуализация, PIV- и SIV-методы, оценка точности, измерение поля скорости.

### Введение

Оптические методы измерения полей скорости потока за последние два десятилетия стали надежным инструментом исследования кинематической структуры потока жидкостей и газов. Эти методы различаются в основном алгоритмами обработки изображений, требованиями к засеву потока трассерами и степени их освещенности при съемке. К настоящему времени наибольшее распространение среди оптических методов получил метод Particle Image Velocimetry (PIV) [1–3]. В стандартном методе PIV скорость потока оценивается по смещению засеянных в поток групп частиц-трассеров за промежуток времени между двумя последовательными кадрами. Алгоритм определения смещения обычно строится по следующей схеме. В окрестности узлов предварительно

нанесенной на изображение сетки выделяется небольшая часть изображения размерами  $N \times M$  пикс (рис. 1), которую будем называть исходным фрагментом. Затем каждый исходный фрагмент на изображении  $k$  сравнивается с фрагментами таких же формы и размеров, расположенными на изображении  $k + 1$  в окрестности того же узла расчетной сетки. Наибольшую популярность при сравнении пар фрагментов получил алгоритм, основанный на вычислении кросскорреляционной функции (Cross-Correlation — CC) [1, 4, 5]:

$$R(n, m) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(k, i, j) I(k + 1, i + n, j + m). \quad (1)$$

Здесь  $I(k, i, j)$  — интенсивность свечения пикселя с координатами  $(i, j)$  изображения  $k$ ;  $I(k + 1, i + n, j + m)$  — интенсивность свечения пикселя с координатами  $(i + n, j + m)$  изображения  $k + 1$ ;  $N$  и  $M$  — размеры исходных фрагментов;  $n$  и  $m$  — параметры, требующие дальнейшего определения. Значения  $n$  и  $m$ , при которых функция (1) достигает наибольшего значения, отвечают наиболее вероятному смещению фрагмента, расположенного в окрестности соответствующего узла сетки. Во многих задачах этот алгоритм обеспечивает разумную точность определения векторов скорости [1, 2]. Однако точность оценки векторов сильно зависит от качества засева потока трассерами. Обычно при вычислении кросскорреляционной функции (1) используют либо непосредственное вычисление сумм (Direct Cross-Correlation — DCC), вычислительная сложность которого для квадратного фрагмента со стороной  $N$  составляет  $O(N^4)$ , либо алгоритм быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transform Cross-Correlation — FFT-CC) с вычислительной сложностью  $O(2N^2 \log_2 N)$ . Использование алгоритма FFT-CC позволяет существенно снизить время обработки изображений, в лучшем случае в  $N^2/(2 \log_2 N)$  раз, однако оно является причиной осциллирующего поведения систематической погрешности и увеличения случайной погрешности определения смещения по отношению к алгоритму DCC [2].

Стандартный PIV-метод хорошо зарекомендовал себя при изучении стационарных течений. Но на измерения этим методом динамики векторных полей скорости потока в нестационарных и быстропотекающих процессах накладываются серьезные ограничения по временному разрешению, связанному с характеристиками камеры и лазера для подсветки. Частота съемки ограничена в основном временем накачки мощных сдвоенных импульсных лазеров [5, 6], используемых в стандартном PIV-методе. К тому же

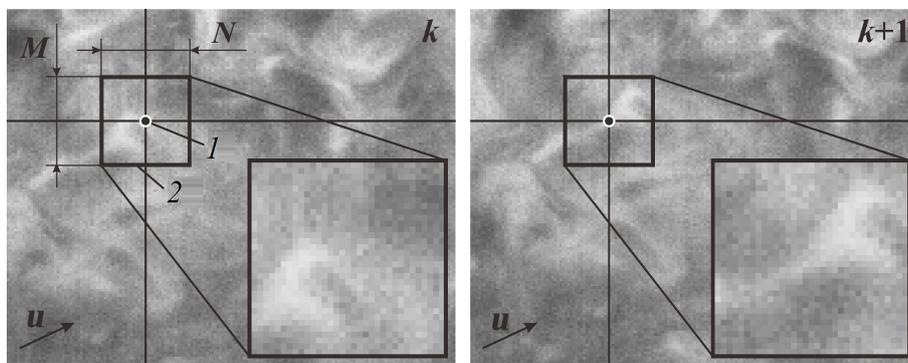


Рис. 1. Схема определения смещения фрагмента за время  $\Delta t$ : 1 — узел расчетной сетки; 2 — исходный фрагмент изображения

стоимость таких лазеров составляет порядка 60 000–100 000 евро, что является серьезным барьером для небольших компаний и научно-образовательных учреждений [7].

В последнее время предпринимаются попытки преодоления упомянутых ограничений [7, 8]. Основной идеей является замена сдвоенных импульсных лазеров на источник постоянного света, такого как лазер постоянного действия [8] или светодиод [9], в сочетании с высокоскоростной видеокамерой. При таком подходе отпадает необходимость в синхронизации камеры со вспышками лазера. К тому же стоимость лазеров постоянного действия меньше примерно в 100 раз по сравнению со светодиодной техникой. Несмотря на очевидные преимущества такого подхода, есть и значительные недостатки, связанные с коротким временем экспозиции высокоскоростных видеокамер (обычно порядка 10–20 мкс [8]) и относительно малой мощностью постоянных источников света. Это снижает интенсивность рассеиваемого частицами света и приводит к слабой засветке сенсора камеры. В работе [8] отмечается, что дальнейшее улучшение описанного высокоскоростного PIV-метода требует выбора камер с более светочувствительными сенсорами и увеличения мощности постоянного источника света, что даст возможность измерения скорости потока до 100 м/с.

Недавно появившаяся техника измерений Smoke Image Velocimetry (SIV) [10, 11] отличается от классического PIV-метода использованием многократно более высокой концентрации трассеров. Для засева частицами применяются такие же, как в PIV-методе, генераторы аэрозоля. Частицы хорошо визуализируют движение несущей газовой фазы, но из-за более высокой концентрации аэрозоль на видеоизображении выглядит не отдельными светящимися частицами, а дымом с непрерывным распределением яркости на изображении. Благодаря лучшей отражающей способности дыма по сравнению с отдельными частицами удается получать достаточную для обработки яркость изображения при съемке высокоскоростной камерой с обычной чувствительностью даже при высокой частоте кадров в световом ноже, создаваемом маломощным лазером непрерывного действия. Поэтому техника SIV позволяет с использованием достаточно простого оборудования измерить динамику двухкомпонентных векторных полей скорости потока с частотой порядка 10 кГц, что открывает новые возможности исследования нестационарных процессов.

Схема определения векторов скорости потока по результатам дымовой визуализации (рис. 1) во многом схожа с описанной выше схемой, применяемой в стандартном PIV-методе. Однако большие размеры дымовых структур по сравнению с отдельными частицами способствуют тому, что SIV-метод допускает существенно большее смещение частиц во временном интервале между двумя кадрами [10]. Вместо традиционного для PIV-метода поиска максимума кросскорреляционной функции в SIV-методе используется алгоритм определения сходства между фрагментами, основанный на минимизации абсолютных разностей (Sum of Absolute Differences — SAD), который более устойчив к большим смещениям [10]. Минимизируется функционал

$$\Phi(n, m) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |I(k, i, j) - I(k + 1, i + n, j + m)|, \quad (2)$$

вычислительная сложность которого составляет  $O(N^4)$  для квадратного фрагмента со сторонами  $N \times N$  при  $n = \overline{1, N}$  и  $m = \overline{1, N}$ . В выражении (2) значения  $n$  и  $m$ , при которых функционал (2) принимает наименьшее значение, указывают на положение фрагмента, наиболее похожего на исходный фрагмент. В работе [10] на примере син-

тезированных изображений с диаметрами “образов” частиц 10 пикс и плотностью их засева  $0.02 \text{ част./пикс}^2$  в окне размерами  $32 \times 32$  пикс показано, что алгоритм SIV — SAD дает многократно меньшую погрешность по сравнению со стандартным методом PIV — DCC, особенно при больших их смещениях. Возможность измерения скорости при больших смещениях частиц с одновременным снижением погрешности их определения позволяет увеличить динамический диапазон измеряемых скоростей, не снижая при этом частоту съемки, как это предлагается в работе [12] для увеличения допустимого смещения частиц на двух последовательных кадрах.

Однако, несмотря на увеличение точности определения векторов смещения на основе SIV — SAD по сравнению с PIV — DCC, применение функции SAD (2) к обработке изображений заметно снижает производительность алгоритма по сравнению с FFT-CC. Поэтому разработка алгоритмов, позволяющих сократить время расчета без существенного снижения достоверности получаемых результатов, является актуальной задачей.

В работе [6] предложен оригинальный подход к увеличению динамического диапазона измеряемых скоростей, основанный на группировке смежных пикселей на этапе записи 2D-изображений. Эта идея успешно применяется при обработке 3D-изображений, полученных с помощью Томо-PIV [13–15]. Однако в этом случае вместо группировки смежных пикселей используются проекции 3D-изображения на три его грани. Таким образом, вместо вычисления кросскорреляционной функции в трехмерной области можно ограничиться вычислениями в двумерных областях. В работе [14] для обозначения этого метода предложена аббревиатура PPC (Parallel Projection Correlation). В работах [14, 15] показано, что применение метода PPC к обработке 3D-изображений позволяет существенно снизить вычислительные затраты без заметного снижения точности получаемых данных. Однако, несмотря на очевидные преимущества этого метода, детальная оценка его точности не проведена и требует всестороннего изучения.

В настоящей работе исследована возможность применения подхода PPC к обработке 2D-изображений на основе техники SIV — SAD и выполнена оценка его точности с использованием синтезированных изображений.

## 1. Основы алгоритма ускорения обработки изображений

На рис. 2 представлена схема работы алгоритма PSAD (Projection Sum of Absolute Differences), основанного на быстром определении сходства между двумя рассматриваемыми фрагментами. На двух последовательных изображениях в окрестности узла предварительно нанесенной на изображение сетки выделяются их фрагменты размерами  $N \times M$  пикс. Затем вместо двумерного массива интенсивностей  $I(i, j)$  для каждого из фрагментов строятся его интегральные проекции на оси  $I_x$  и  $I_y$ , элементы которых равны среднеарифметическому значению всех элементов в соответствующих столбцах и строках массива  $I(i, j)$ , т. е.

$$I_x(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M I(i, j), \quad I_y(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(i, j), \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}. \quad (3)$$

Здесь  $N$  и  $M$  — количество строк и столбцов массива  $I(i, j)$  соответственно.

Далее полагается, что, сравнивая попарно проекции  $I_x$  и  $I_y$  изображений  $k$  и  $k + 1$ , как показано на рис. 2, можно определить смещения дымовых структур по горизон-

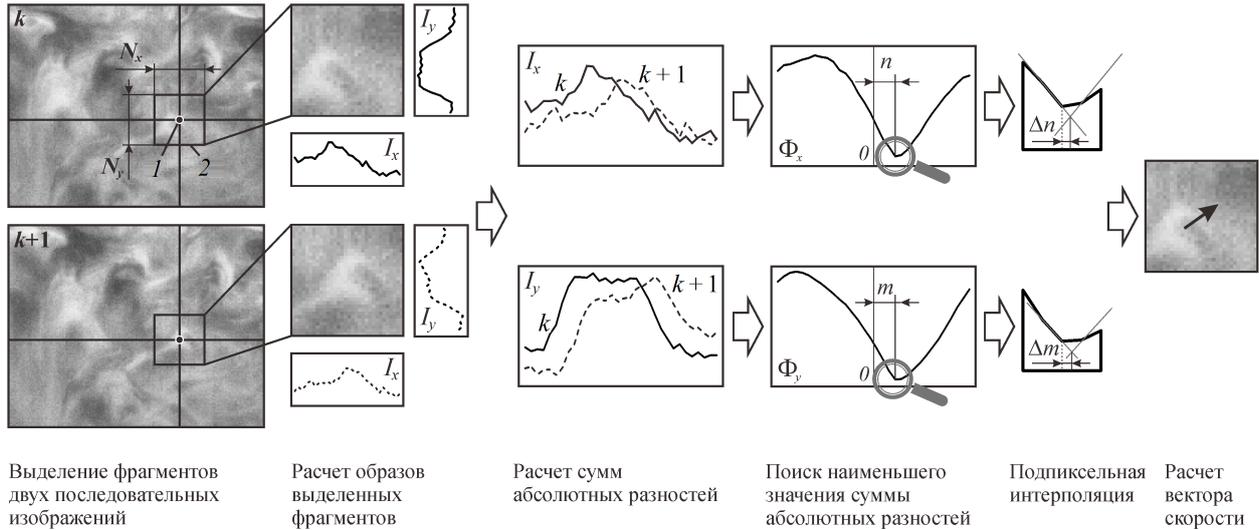


Рис. 2. Схема работы алгоритма PSAD для вычисления вектора скорости по результату дымовой визуализации: 1 – узел расчетной сетки; 2 – фрагмент изображения

тали и вертикали соответственно. Указанные смещения могут быть найдены на основе вычисления сумм абсолютных разностей SAD по следующим формулам:

$$\Phi_x(n) = \sum_{i=1}^N |I_x(k, i) - I_x(k + 1, i + n)|, \quad n = \overline{0, N - 1},$$

$$\Phi_y(m) = \sum_{j=1}^M |I_y(k, j) - I_y(k + 1, j + m)|, \quad m = \overline{0, M - 1}.$$

В результате необходимо выполнить  $2N^2$  операций сложения/вычитания при вычислении каждой из проекций  $I_x$  и  $I_y$  согласно определениям (3) и  $2N^2$  операций сложения/вычитания при вычислении каждого из функционалов  $\Phi_x$  и  $\Phi_y$  согласно (4). Таким образом, вычислительная сложность метода PSAD составляет  $O(6N^2)$  против  $O(N^4)$  для методов SIV – SAD и PIV – DCC.

Затем выполняется поиск наименьших значений  $n$  и  $m$ , при которых  $\Phi_x$  и  $\Phi_y$  достигают минимальных значений. Эти значения отвечают наиболее вероятному целочисленному смещению дымовых структур в пикселях. После этого полученные смещения уточняются с подпиксельной точностью. В работе [11] показано, что в пространстве смещений по двум координатам поверхность функционала SAD (2) в окрестности его минимума имеет форму конуса.

С учетом того что в настоящей работе оценка точности предлагаемого метода проводилась на основе анализа синтезированных изображений с однородным смещением дыма только по одной координате, подпиксельное уточнение координат минимума упрощалось и определялось на основе выражений

$$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\Phi_x(n - 1) - \Phi_x(n + 1)}{\max |\Phi_x(n - 1) - \Phi_x(n), \Phi_x(n + 1) - \Phi_x(n)|},$$

$$\Delta m = \frac{1}{2} \frac{\Phi_y(m - 1) - \Phi_y(m + 1)}{\max |\Phi_y(m - 1) - \Phi_y(m), \Phi_y(m + 1) - \Phi_y(m)|},$$

где  $(u, v) = (n, m) + (\Delta n, \Delta m)$  — полное, целочисленное и дробное значения смещения по направлениям  $x$  и  $y$  в пикселях соответственно.

## 2. Генерация изображений и описание метода оценки точности

При количественной оценке точности предлагаемого метода с использованием стандартного подхода к генерации PIV-изображений [1] были сгенерированы синтетические изображения с теми же параметрами, что и в работе [10]: размеры каждой пары изображений  $2048 \times 2048$  пикс; разрядность яркости пикселей 8 бит. На практике используются частицы размером порядка 1 мкм [16]. Однако размеры “образов” этих частиц варьируются в зависимости от той или иной оптической системы. Для краткости далее термином “частица” будем обозначать “образ частицы”. Интенсивность свечения частиц на изображениях считалась непрерывной и распределенной по функции Гаусса, а их границы определялись по уровню  $e^{-2}$  от максимального значения гауссиана [1]. Интенсивность свечения каждого пикселя определялась интегрированием по площади занимаемого пикселя. При перекрытии частиц интенсивности их свечения складывались. Частицы на первом изображении были равномерно распределены по всей площади изображения с постоянной средней концентрацией  $C = 0.02$  част./пикс<sup>2</sup>, а координаты их центров задавались случайным образом. Координаты частиц на втором изображении моделировались путем их однородного горизонтального смещения на величину  $u_0$  в диапазоне от 0 до 32 пикс с шагом от 0.1 до 2 пикс.

Статистический анализ точности проводился с использованием фрагментов сгенерированных изображений размерами  $N \times M = 16 \times 16$ ,  $32 \times 32$  и  $64 \times 64$  пикс. Центры фрагментов изображений располагались в узлах расчетной сетки (см. рис. 1) с координатами  $[(i - 0.5)N + 0.5; (j - 0.5)N + 0.5]$ , где  $i = \overline{1, 32}$ ,  $j = \overline{1, 32}$  и  $N = 16, 32$  и  $64$  пикс. Таким образом, анализ точности проводился с использованием 1024 фрагментов изображений размерами  $16 \times 16$ ,  $32 \times 32$  и  $64 \times 64$  пикс без перекрытия.

В настоящей работе проведен анализ устойчивости результатов расчета к наложенному на изображение шуму, связанному с выходом частиц из плоскости светового ножа, путем удаления 10 и 20 % частиц со второго изображения. Оценка точности проводилась при двух диаметрах частиц:  $d_p = 2.2$  и 10 пикс. На рис. 3 показаны типичные пары фрагментов изображений при этих диаметрах частиц. Видно, что крупные части-

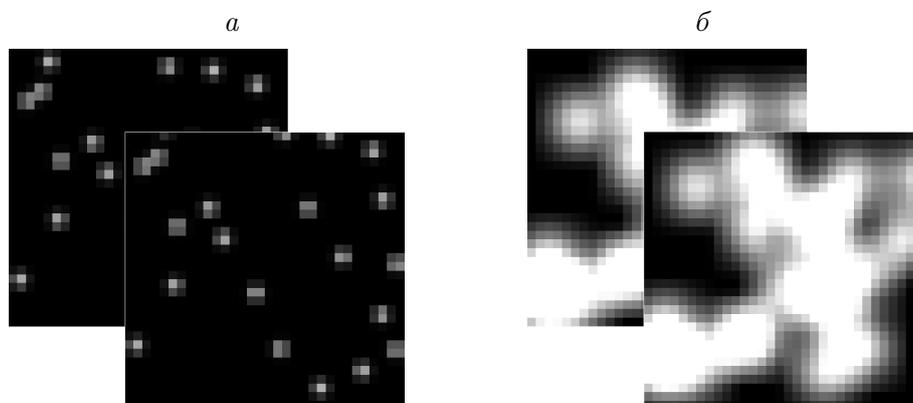


Рис. 3. Пара фрагментов при  $C = 0.02$  част./пикс<sup>2</sup>:  $d_p = 2.2$  пикс (а) и  $d_p = 10$  пикс (б)

цы больше напоминают дымовые структуры, чем отдельные частицы, как, например, на рис. 3, а, на котором изображены мелкие частицы. Полагается, что это сходство можно использовать при моделировании дыма.

Проведен сравнительный анализ точности определения смещений частиц, изображенных на каждой паре фрагментов, с использованием методов PSAD, SIV – SAD и PIV – DCC. Непосредственное вычисление сумм DCC вместо FFT-CC в методе PIV используется для получения явной формы зависимости погрешности метода от варьируемых параметров. Известно, что применение используемой в этом случае кросскорреляционной функции (1) приводит к пологому максимуму, который близок к распределению Гаусса [1]. Наиболее исследованным типом подпиксельной интерполяции является интерполяция по трем точкам кривой в виде распределения Гаусса [1, 2, 4]:

$$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\ln R(n-1, m) - \ln R(n+1, m)}{\ln R(n-1, m) - 2 \ln R(n, m) + \ln R(n+1, m)},$$

$$\Delta m = \frac{1}{2} \frac{\ln R(n, m-1) - \ln R(n, m+1)}{2 \ln R(n, m-1) - 2 \ln R(n, m) + \ln R(n, m+1)},$$

которая используется в настоящей работе. В методе PSAD используется сумма абсолютных разностей SAD (4) с применением выражений (5) при определении дробных значений смещений. Основные выражения, используемые в рассмотренных в настоящей работе методах, приведены в таблице.

При анализе точности оценивались случайная  $\sigma$  и систематическая  $\beta$  погрешности определения смещения частиц:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (u_i - \bar{u})^2}, \quad \beta = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (u_i - u_0) = \bar{u} - u_0,$$

где  $u_i$  – значение смещения для  $i$ -го измерения;  $\bar{u}$  – среднее значение смещения по  $K = 1024$  измерениям;  $u_0$  – истинное значение смещения. В настоящей работе ошибоч-

Выражения, используемые при определении смещения с подпиксельной точностью

Метод	Поиск степени схожести выделенных фрагментов изображений	Подпиксельная интерполяция
PSAD	$\Phi_x(n) = \sum_{i=1}^N  I_x(k, i) - I_x(k+1, i+n) $	$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\Phi_x(n-1) - \Phi_x(n+1)}{\max  \Phi_x(n-1) - \Phi_x(n), \Phi_x(n+1) - \Phi_x(n) }$  $\Delta m = \frac{1}{2} \frac{\Phi_y(m-1) - \Phi_y(m+1)}{\max  \Phi_y(m-1) - \Phi_y(m), \Phi_y(m+1) - \Phi_y(m) }$
	$\Phi_y(m) = \sum_{j=1}^M  I_y(k, j) - I_y(k+1, j+m) $	
SIV – SAD	$\Phi(n, m) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M  I(k, i, j) - I(k+1, i+n, j+m) $	
PIV – DCC	$R(n, m) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(k, i, j) I(k+1, i+n, j+m)$	$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\ln R(n-1, m) - \ln R(n+1, m)}{\ln R(n-1, m) - 2 \ln R(n, m) + \ln R(n+1, m)}$  $\Delta m = \frac{1}{2} \frac{\ln R(n, m-1) - \ln R(n, m+1)}{2 \ln R(n, m-1) - 2 \ln R(n, m) + \ln R(n, m+1)}$

ные значения векторов смещений распознавались с использованием локального медианного теста с ядром  $3 \times 3$  пикс [17] и корректировались средним значением корректных значений соседних векторов смещений [18].

### 3. Результаты и обсуждение

Предварительно выполнены тестовые расчеты смещения частиц с применением метода PIV—DCC. На рис. 4 представлены случайная и систематическая погрешности определения смещения частиц с диаметром  $d_p = 2.2$  пикс в зависимости от величины их смещения от 0 до 2 пикс. Из рисунка видно, что случайная и систематическая погрешности метода PIV—DCC, полученные без применения фильтрации, согласуются с результатами работ [1, 4], в которых также рассматривались синтезированные изображения с теми же исходными данными для концентрации и диаметра частиц. В частности, видно, что случайная погрешность (рис. 4, а) возрастает линейно в области смещения  $u_0 = 0 \sim 0.5$  пикс и далее сохраняет приблизительно постоянное значение. Применение медианного фильтра приводит к снижению случайной погрешности (рис. 4, а), однако не оказывает заметного влияния на систематическую погрешность (рис. 4, б).

Далее проводился сравнительный анализ случайной и систематической погрешностей, полученных с применением методов PSAD, SIV—SAD и PIV—DCC. На рис. 5 представлены случайная и систематическая погрешности в зависимости от величины смещения частиц с диаметрами 2.2 и 10 пикс для различных размеров фрагментов изображений. Из рис. 5 видно, что применение метода PSAD, основанного на алгоритме ускорения, к определению смещения частиц с диаметром 2.2 пикс увеличивает значение случайной погрешности (рис. 5, а) и амплитуду периодической составляющей систематической погрешности (рис. 5, в), хотя среднее значение систематической погрешности в интервале смещения 1 пикс остается постоянным. Также видно, что чем больше размер фрагмента изображения, тем больше PSAD проигрывает в точности методам SIV—SAD и PIV—DCC. В частности, из рис. 5, а следует, что для фрагмента размерами  $64 \times 64$  пикс случайная погрешность при использовании PSAD выше приблизительно в три раза, однако для фрагмента размерами  $16 \times 16$  пикс все три метода дают примерно одинаковый результат.

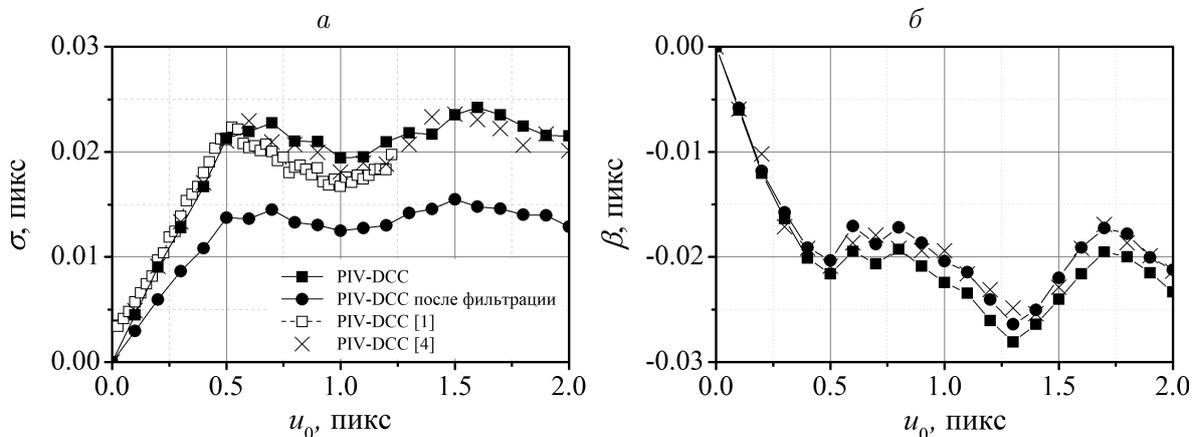


Рис. 4. Случайная (а) и систематическая (б) погрешности:  $d_p = 2.2$  пикс

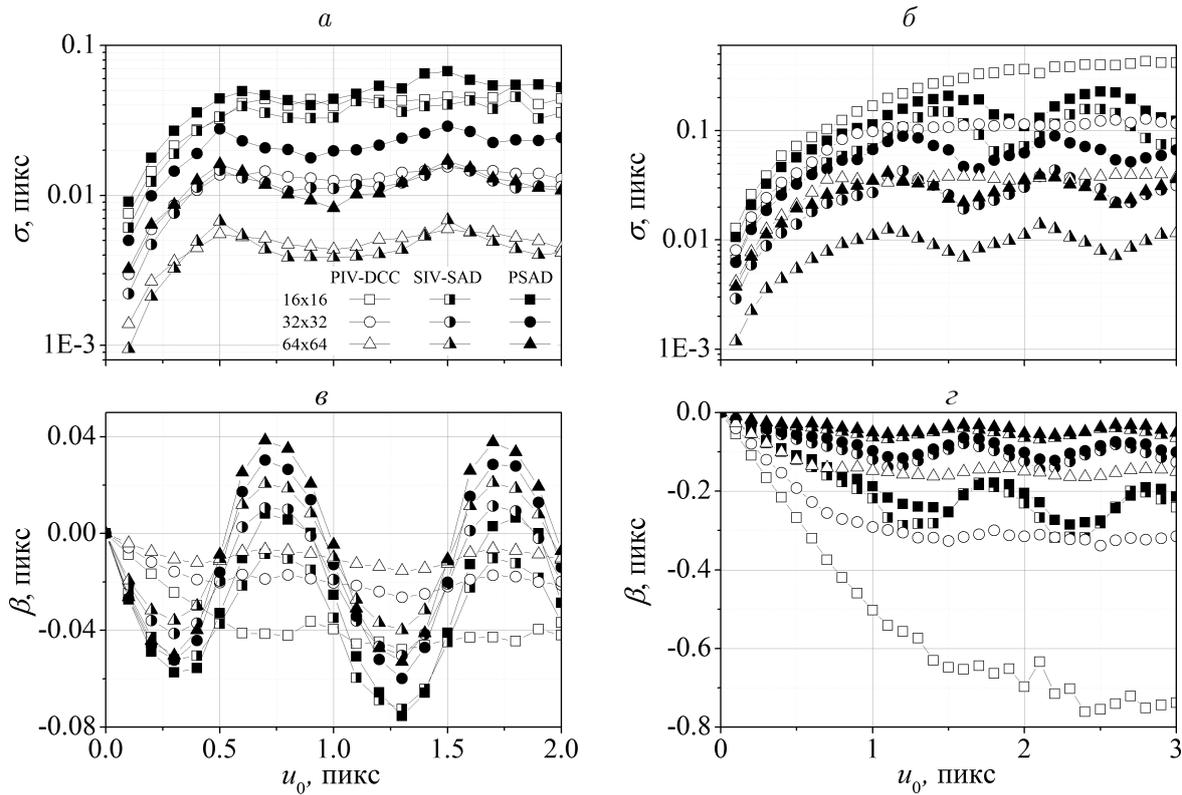


Рис. 5. Случайная (а, б) и систематическая (в, г) погрешности: а, в —  $d_p = 2.2$  пикс; б, г —  $d_p = 10$  пикс

Применение метода PSAD для анализа изображений с диаметрами частиц 10 пикс также увеличивает значения случайной погрешности (рис. 5, б) по отношению к таковым для метода SIV — SAD, однако полученные значения ниже соответствующих погрешностей метода PIV — DCC. При этом алгоритм ускорения, заложенный в методе PSAD, в интервале смещений от 0 до 3 пикс практически не увеличивает систематическую погрешность метода SIV — SAD (рис. 5, г). Следует отметить, что применение функционалов (2) и (4) в совокупности с соответствующими выражениями для подпиксельной интерполяции (5) значительно снижает величину систематической погрешности при анализе изображений с диаметром частиц 10 пикс (рис. 5, г).

Анализ производительности методов показал, что алгоритм ускорения, примененный в методе PSAD при исследовании фрагментов изображений размерами  $16 \times 16$ ,  $32 \times 32$  и  $64 \times 64$  пикс, позволяет снизить время расчета примерно в 16, 140 и 1060 раз соответственно по отношению к методам PIV — DCC и SIV — SAD. При оценке времени расчета учитывались следующие этапы обработки изображений: прямой расчет кросскорреляционной функции (1) или функционалов (2) и (4) в зависимости от рассматриваемого метода; расчет интегральных проекций изображений для метода PSAD; поиск глобального экстремума, отвечающего наиболее вероятному смещению частиц на изображении; подпиксельная интерполяция.

Таким образом, применение метода PSAD значительно повышает производительность вычислений, а по погрешности определения смещения частиц с диаметром 10 пикс этот метод занимает промежуточное положение между методами PIV — DCC и SIV — SAD, заметно уступая последнему по величине случайной погрешности.

Пользователей средств измерений скорости потока чаще всего интересует относительная погрешность результатов измерений. На рис. 6 показаны относительные случайная  $\sigma/u_0$  и систематическая  $\beta/u_0$  погрешности в области относительного смещения частиц  $u_0/N = 0 \sim 0.5$  с диаметром 10 пикс. Как видно из рис. 6, погрешности метода PSAD при анализе фрагментов изображений размерами  $32 \times 32$  и  $64 \times 64$  пикс монотонно снижаются в интервале относительного смещения частиц от 0 до  $u_0/N = 0.34$ , оставаясь ниже соответствующей погрешности метода PIV—DCC. Для фрагментов изображений с размерами  $16 \times 16$  пикс случайная погрешность метода PSAD изменяется немонотонно, но остается ниже соответствующих значений погрешности метода PIV—DCC. Следует также обратить внимание на то, что метод PSAD уступает по точности методу SIV—SAD для всех рассматриваемых размеров фрагментов изображений во всем рассматриваемом диапазоне изменения относительного смещения  $u_0/N$ .

На рис. 7 показано влияние шума на погрешность определения смещения частиц диаметром 10 пикс при анализе фрагментов изображений с размерами  $32 \times 32$  пикс. Из рис. 7, *а* видно, что метод PSAD менее устойчив к шуму по сравнению с методами PIV—DCC и SIV—SAD: случайная погрешность возрастает примерно в 10 раз при удалении 20% частиц со второго изображения, в то время как для методов PIV—DCC и SIV—SAD та же величина возрастает примерно в два раза. Систематическая погрешность метода PSAD также возрастает с увеличением уровня шума по сравнению

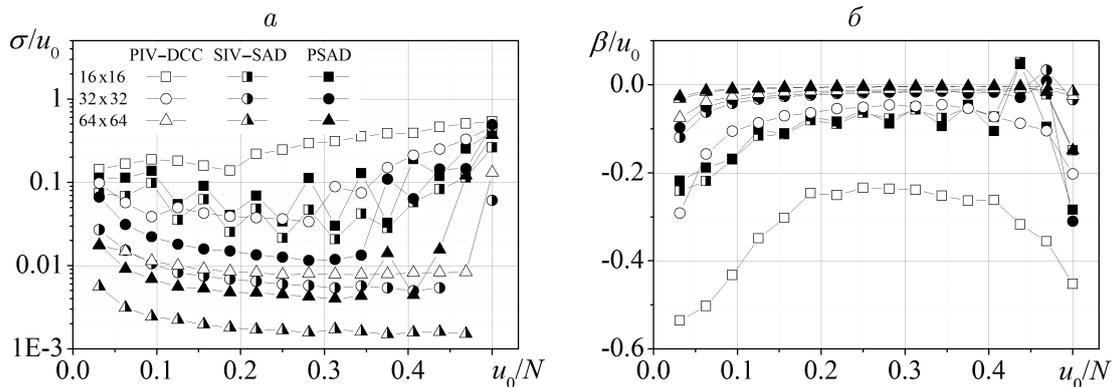


Рис. 6. Относительные случайная (*а*) и систематическая (*б*) погрешности:  $d_p = 10$  пикс

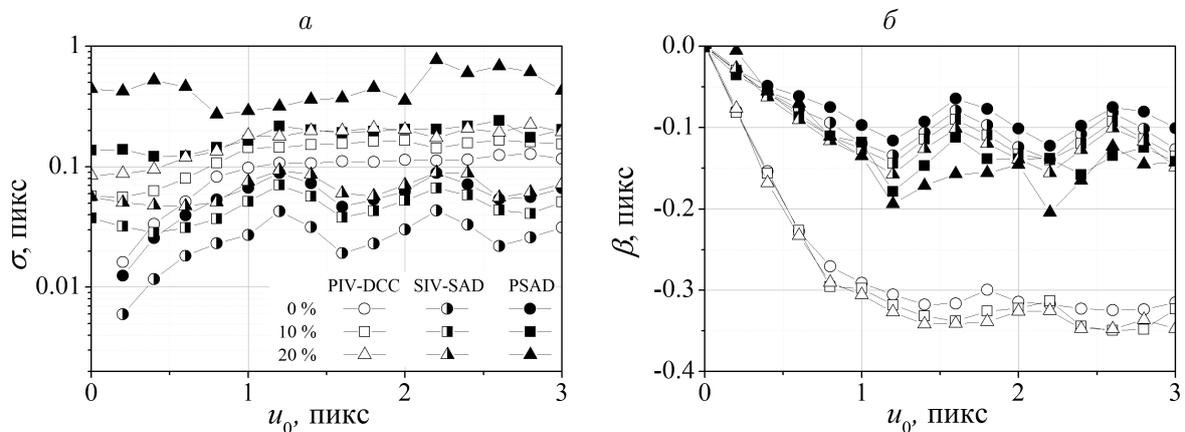


Рис. 7. Случайная (*а*) и систематическая (*б*) погрешности в зависимости от уровня шума для фрагмента изображения размерами  $32 \times 32$  пикс:  $d_p = 10$  пикс

с методами PIV — DCC и SIV — SAD (рис. 7, б), хотя и в меньшей степени по сравнению со случайной погрешностью. Тем не менее полная погрешность метода PSAD не превышает 1 пикс для всех рассматриваемых размеров фрагментов изображений и смещений.

Таким образом, метод PSAD по погрешности определения смещения существенно уступает методу SIV — SAD, но позволяет с высокой производительностью и разумной погрешностью надежно определять начальное приближение этого смещения. В этом качестве метод PSAD имеет хороший потенциал использования для повышения производительности многошаговых подходов анализа изображений, в том числе может быть применен в качестве предварительного шага перед использованием метода SIV — SAD. Поскольку полная погрешность метода PSAD не превышает 1 пикс, после такого шага при использовании SIV — SAD можно многократно уменьшить область поиска минимума функционала (2), вплоть до  $\pm 1$  пикс по каждой из целочисленных переменных  $m$  и  $n$  относительно найденного методом PSAD начального приближения смещений по двум координатам. Это многократно сократит объем вычислений по сравнению с поиском минимума функционала (2) во всей области возможных значений  $m$  и  $n$ .

## Заключение

Предложен алгоритм ускорения нового оптического метода измерения векторных полей скорости потока на основе обработки изображений дымовой визуализации турбулентного потока (PSAD) и выполнена оценка его производительности и точности на примере синтезированных изображений размерами  $16 \times 16$ ,  $32 \times 32$  и  $64 \times 64$  пикс. В настоящей работе рассмотрены изображения с концентрацией частиц  $C = 0.02$  част./пикс<sup>2</sup> диаметрами 2.2 и 10 пикс.

На примере фрагментов изображений размерами  $16 \times 16$ ,  $32 \times 32$  и  $64 \times 64$  пикс показано, что использование метода PSAD позволяет снизить вычислительные затраты примерно в 16, 140 и 1060 раз соответственно по отношению к методам PIV — DCC и SIV — SAD. По погрешности определения смещения частиц диаметром 10 пикс в диапазоне смещений примерно до  $1/3$  размера фрагмента изображения метод PSAD занимает промежуточное положение между этими методами, заметно уступая SIV — SAD.

Практической областью применения алгоритма ускорения PSAD может быть предварительное определение начального значения смещения с последующим его уточнением при использовании более точных алгоритмов и методов вычислений.

## Список литературы / References

- [1] Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., Kompenhans, J. Particle image velocimetry. A practical Guide. Springer, 2007. 468 p.
- [2] Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.  
Tokarev, M.P., Markovich, D.M., Bil'skiy, A.V. Adaptive algorithms for PIV image processing // Comput. Technologies. 2007. Vol. 12, No. 3. P. 109–131. (In Russ.)
- [3] Westerweel, J., Elsinga, G.E., Adrian, R.J. Particle image velocimetry for complex and turbulent flow // Annual Rev. of Fluid Mech. 2013. Vol. 45. P. 409–436.

- [4] **Kim, B.J., Sung, H.J.** A further assessment of interpolation schemes for window deformation in PIV // *Experiments in Fluids*. 2006. Vol. 41. P. 499–511.
- [5] **Jambunathan, K., Ju, X.Y., Dobbins, B.N., Ashforth-Frost, S.** An improved cross correlation technique for particle image velocimetry // *Measurement Sci. & Technol.* 1995. Vol. 6. P. 507–514.
- [6] **Nasibov, H., Kholmatov, A., Akselli, B., Nasibov, A., Baytaroglu, S.** Performance analysis of the CCD pixel binning option in particle-image velocimetry measurements // *IEEE/ASME Transact. on Mechatronics*. 2010. Vol. 15, No 4. P. 527–540.
- [7] **Cierpka, C., Hain, R., Buchmann, N.A.** Flow visualization by mobile phone cameras // *Experiments in Fluids*. 2016. Vol. 57. P. 108.
- [8] **Willert C.E.** High-speed particle image velocimetry for the efficient measurement of turbulence statistics // *Experiments in Fluids*. 2015. Vol. 56. P. 17.
- [9] **Willert, C., Stasicki, B., Klinner, J., Moessner, S.** Pulsed operation of high-power light emitting diodes for imaging flow velocimetry // *Measurement Sci. & Technol.* 2010. Vol. 21(7). P. 075402.
- [10] **Зарипов Д.И., Аслаев А.К., Михеев Н.И., Душин Н.С.** Оценка точности нового оптического метода измерения мгновенных полей скорости потока // *Тр. Академэнерго*. 2016. № 1. С. 42–52.  
**Zaripov, D.I., Aslaev, A.K., Mikheev, N.I., Dushin, N.S.** Estimation of accuracy of new optical method of instantaneous flow velocity field measurement // *Transact. of Academenergo*. 2016. No. 1. P. 42–52. (In Russ.)
- [11] **Mikheev, N.I., Dushin, N.S.** A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization videos // *Instrum. and Experimental Techniques*. 2016. Vol. 59, No. 6. 882–889.
- [12] **Scharnowski, S., Kahler, C.J.** On the effect of curved streamlines on the accuracy of PIV vector fields // *Experiments in Fluids*. 2013. Vol. 54. P. 1435.
- [13] **Discetti, S., Astarita, T.** Fast 3D PIV with direct sparse cross-correlations // *Experiments in Fluids*. 2012. Vol. 53. P. 1437–1451.
- [14] **Bilsky, A.V., Dulin, V.M., Lozhkin, V.A., Markovich, D.M., Tokarev, M.P.** Two-dimensional correlation algorithms for tomographic PIV // *Proc. of 9th Intern. Symp. on Particle Image Velocimetry*. Kobe Univ., Kobe, Japan, 2011.
- [15] **Earl, T., Jeon, Y.J., Lecordier, B., Laurent, D.** Accuracy and speed assessment of 3D cross-correlation algorithms for two-frame and multi-frame PIV // *Proc. of 11th Intern. Symp. on Particle Image Velocimetry*. Santa Barbara, California, 2015.
- [16] **Melling A.** Tracer particles and seeding for particle image velocimetry // *Measurement Sci. & Technol.* 1997. Vol. 8. P. 1406–1416.
- [17] **Westerweel, J., Scarano, F.** Universal outlier detection for PIV data // *Experiments in Fluids*. 2005. Vol. 39. P. 1096–1100.
- [18] **Westerweel, J., Draad, A.A., van der Hoeven, J.G.Th., van Oord, J.** Measurement of fully-developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry // *Experiments in Fluids*. 1996. Vol. 20. P. 165–177.

*Поступила в редакцию 18 октября 2016 г.,  
с доработки — 26 сентября 2017 г.*

## Application of projection method to speed-up a new algorithm for the measurement of instantaneous flow velocity field

ZARIPOV, DINAR I.<sup>1,\*</sup>, MIKHEEV, NIKOLAY I.<sup>1</sup>, DUSHIN, NIKOLAY S.<sup>1</sup>, ASLAEV, ALBERT K.<sup>2</sup>, SHAKIROV, RADIF R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KazanSc of RAS, Kazan, 420111, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, 420111, Russia

\*Corresponding author: Zaripov, Dinar I., e-mail: [zaripov.d.i@mail.ru](mailto:zaripov.d.i@mail.ru)

Applicability of projection method has been investigated to speed-up a new optical method for the measurement of flow velocity fields using smoke visualization. The algorithm is based on the analysis of integral projections of images on coordinate axes. The variation of random and bias measurement errors while changing the magnitude of uniform displacement of particles has been studied for the particle diameters of 2.2 and 10 pix.

Synthetic images with sizes  $16 \times 16$ ,  $32 \times 32$  and  $64 \times 64$  pix have been used to show that the application of projection method to image processing speeds up the processing time of the measurements by approximately 16, 140 and 1060 times, respectively. However, if compared with a new method of Smoke Image Velocimetry, it reduces the accuracy of the obtained data when processing the images with large particles (10 pix) imitating smoke structures. Nevertheless, the results obtained by the proposed speed-up algorithm are not inferior in accuracy to similar data obtained by Particle Image Velocimetry.

It is noted that the proposed speed-up algorithm can be applied to preliminary evaluation of initial displacement field with its subsequent refinement using more accurate computational algorithms and methods.

*Keywords:* computational cost reduction, optical method, smoke visualization, PIV, SIV, accuracy assessment, velocity field measurement.

*Received 18 October 2016*

*Received in revised form 26 September 2017*