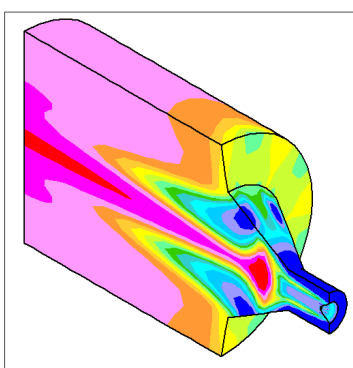


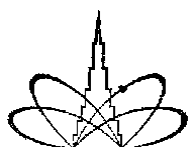
**Х ШКОЛА-СЕМИНАР  
молодых ученых и специалистов  
академика РАН В.Е.АЛЕМАСОВА**

**КАЗАНЬ РОССИЯ 13-15 сентября 2016г.**



**МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ**

**ПРОБЛЕМЫ  
ТЕПЛОМАССОБМЕНА  
И ГИДРОДИНАМИКИ В  
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ**



**КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
КАЗАНЬ 2016**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**ПРОБЛЕМЫ  
ТЕПЛОМАССООБМЕНА  
И ГИДРОДИНАМИКИ В  
ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИИ**

**Материалы X школы-семинара  
молодых ученых и специалистов  
академика РАН В.Е.Алемасова**

**13 – 15 сентября 2016 г.**

**Казань 2016**

**Научный редактор – д.т.н., проф. В. Н. Шлянников**

**П78 Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении:  
Материалы докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов  
академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 13 – 15 сентября 2016 г. – Казань:  
КазНЦ РАН, 2016. – 393 с.**

**ISSN 2078 - 6476**

Организационный комитет

X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова  
«Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении»:

**д.т.н., проф. Шлянников В.Н. (председатель оргкомитета); академик АН РТ, д.т.н.,  
проф. Гортышов Ю.Ф. (заместитель председателя оргкомитета); д.ф.-м.н., проф. Зарипов  
Р.Г.; д.т.н., проф. Попов И.А.; д.т.н., проф. Михеев Н.И.; д.т.н. Молочников В.М.; к.т.н.  
Бойченко Н.В. (ученый секретарь); к.т.н. Гольцман А.Е. (ученый секретарь).**

В сборнике опубликованы материалы докладов, включенных в программу X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (г. Казань, 13 – 15 сентября 2016г). Тематика работ охватывает наиболее актуальные вопросы гидродинамики и тепломассообмена, интенсификации процессов добычи и переработки углеводородного сырья, надежности и долговечности элементов энергооборудования, инженерной химии, экологии и энергосбережения. В работе семинара приняло участие более 120 специалистов из разных городов России.

Финансовую поддержку конференции оказал  
Российский фонд фундаментальных исследований (проект № 16-48-161050 p\_r)  
и правительство Республики Татарстан.

**ISSN 2078 - 6476**

© КазНЦ РАН  
© Оформление С.Ю. Кислова

---

Отпечатано с готового оригинала-макета в ИП Гарипова,  
РТ, г.Казань, ул.Профсоюзная, 17в, тел.: (843) 292 27 25  
Подписано в печать 01.09.2016г.

## АЛГОРИТМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЫМОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

**Р.Р. ШАКИРОВ<sup>1</sup>, Н.С. ДУШИН<sup>2</sup>, Д.И. ЗАРИПОВ<sup>2</sup>**  
radiffshakirov@mail.ru, ndushin@bk.ru, zaripov.d.i@mail.ru

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)

<sup>2</sup> Казанский научный центр Российской академии наук

За последние два десятилетия оптические методы стали популярным методом измерения кинематической структуры различных течений. Наиболее широкое распространение получил метод Particle Image Velocimetry (PIV) [1]. В работе [2] предложен альтернативный метод Smoke Image Velocimetry (SIV), показавший свою эффективность с точки зрения повышения точности определения больших смещений частиц при анализе изображений с достаточно неравномерной степенью их засева. В методах PIV и SIV скорость потока оценивается по смещению группы частиц-трассеров и фрагментов дыма, соответственно, за промежуток времени  $\Delta t$  между двумя последовательными кадрами. В методе SIV дым визуализируется в световом пучке непрерывного лазера с использованием генератора аэрозоля и снимаются скоростной видеокамерой [2]. Предполагается, что фрагменты дыма за время  $\Delta t$  не претерпевают значительных изменений.

Процесс определения вектора смещения строится следующим образом. В окрестности узлов, предварительно нанесенной на изображение сетки, выделяется небольшая часть изображения с размерами  $N_x$  и  $N_y$  пикселей, которую будем называть исходным фрагментом изображения. Затем каждый исходный фрагмент на изображении  $k$  сравнивается с фрагментами такой же формы и размеров, расположенными на изображении  $k+1$  в окрестности того же узла расчетной сетки. Сходство между фрагментами определяется по величине кросс-корреляционной функции (СС) [1] или суммы абсолютных разностей (SAD) [2]. Координаты максимума для СС или минимума для SAD определяют вектор смещения (скорости). Известно, что такой подход к поиску вектора смещения накладывает ограничение на величину определяемого смещения, т.к., согласно этому подходу, смещение частиц на фрагменте изображения не должно превышать половины размера того же фрагмента. Одним из способов решения этой проблемы при больших смещениях является последовательное сравнение исходного фрагмента на изображении  $k$  со смещенными относительно его центра фрагментами такой же формы и размеров, расположенными на изображении  $k+1$ . Обычно для ускорения процедуры обработки изображений вокруг каждого узла сетки задается область поиска исходного фрагмента на изображении  $k+1$ . Однако в ряде случаев это может являться причиной ошибочного определения вектора смещения, поскольку фрагмент, наиболее похожий на исходный фрагмент, может находиться за областью поиска. Кроме того, поиск смещения фрагмента по всей области поиска требует больших вычислительных ресурсов. Другим способом решения отмеченной выше проблемы является уменьшение величины смещения частиц между двумя последовательными кадрами, которое может быть достигнуто уменьшением времени между кадрами или, что то же самое, увеличением частоты съемки. Однако это также приводит к ряду трудностей [3].

Между тем, на практике встречаются течения с большими и разнонаправленными потоками. Применение существующих подходов к анализу таких потоков приводит к многократному увеличению времени расчета. В настоящей работе предлагается

альтернативный существующим подход к предварительному определению поля скорости. Алгоритм предварительного определения поля векторов смещения (скорости) строится следующим образом:

1. С помощью быстрого алгоритма определения смещения для первых двух кадров видеоряда определяются смещения  $\Delta x_0$  и  $\Delta y_0$  всего изображения. Быстрый алгоритм основан на использовании образов  $I_x(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(i, j)$ ,  $I_y(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M I(i, j)$ , вместо матриц интенсивностей свечения пикселей  $I_{ij}$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, M}$ , где  $N$  и  $M$  – количество строк и столбцов матрицы  $I$ ;
2. Согласно выражению  $L = \max(N_x, N_y, d \cdot \Delta x_0, d \cdot \Delta y_0)$ , изображение разбивается на фрагменты  $L \times L$ , где  $d \approx 4$  – коэффициент, учитывающий, что смещения частиц на изображении не превышают четверти фрагмента размером  $L \times L$ . Как правило, размер изображения не кратен  $L$ , поэтому на практике размеры фрагментов могут отличаться на 1 пиксель;
3. Каждый фрагмент размером  $L \times L$  на 1-ом изображении сравнивается с соответствующим несмещенным, относительно 1-го, фрагментом 2-ого изображения. Результатом сравнения являются смещений  $\Delta x$  и  $\Delta y$  определенные для каждого фрагмента размером  $L \times L$ ;
4. Исключение ошибочных векторов, путем применения пространственного медианного фильтра  $3 \times 3$ .

Полученное таким образом поле смещения (скорости) является "начальным" приближением при дальнейшем определении векторов смещения (скорости) в узлах сетки. Следует отметить, что предложенный алгоритм позволяет определять смещения в узлах сетки без использования области поиска, выполняя поиск наиболее похожего фрагмента лишь в окрестности предварительно найденных значений смещений  $\Delta x$  и  $\Delta y$  относительно соответствующих узлов сетки.

На рис. 1,а и рис. 1,б представлены два последовательных изображения видеоряда, снятого в камере Эйфеля с равномерным профилем скорости в середине канала (течение слева направо) и с небольшим возвратным течением вне ядра потока (снизу и сверху изображений). На рис. 1,в можно увидеть скалярное поле абсолютной скорости в виде интенсивностей свечения в зависимости от величины скорости. Результаты предварительно определенного поля скорости хорошо согласуются с результатами, полученными с применением метода SIV [2].

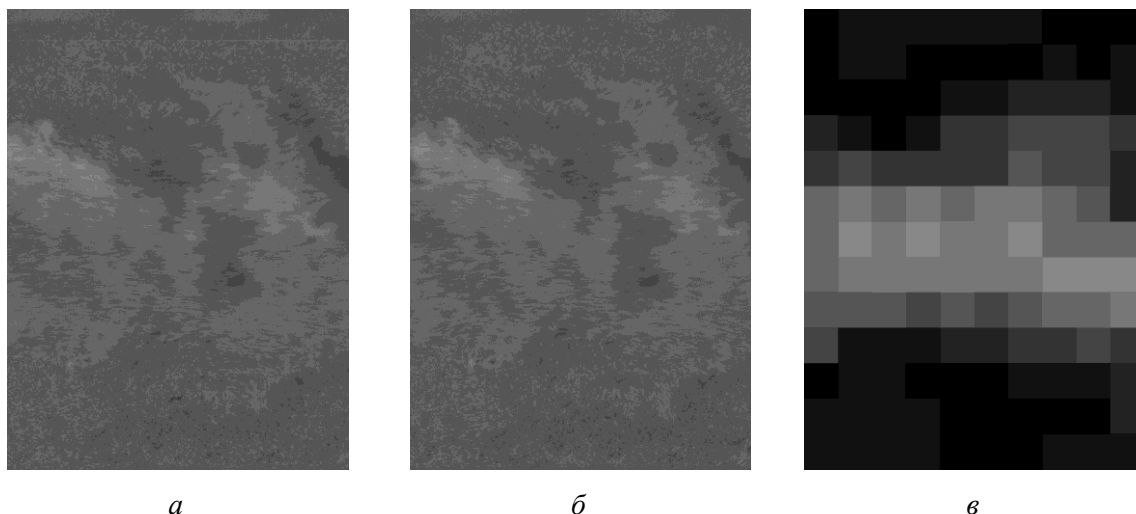


Рис.1. Иллюстрация алгоритма предварительного определения поля скорости (а) – 1-е изображение; (б) – 2-е изображение; (в) – скалярное поле абсолютной скорости

## Литература

1. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer. Germany, 1998. – 448 p.
2. Зарипов Д.И., Аслаев А.К., Михеев Н.И., Душин Н.С. Оценка точности нового оптического метода измерения мгновенных полей скорости потока // Труды Академэнерго. – 2016. – № 1. – С. 42-52.
3. Christian E. Willert. High-speed particle image velocimetry for the efficient measurement of turbulence statistics // Exp. Fluids. – 2015. – 56:17.