

УДК 533.6.08

А.В. Глот, Н.М. Скорнякова, О.А. Евтихиева, Т.В. Богданова

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: nmskorn@mail.ru*

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ МЕТОДОМ ТЕНЕВОЙ АНЕМОМЕТРИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЧАСТИЦ

АННОТАЦИЯ

В докладе представлен метод теневой анемометрии по изображению частиц, описан его принцип действия, проведён подбор источника излучения и оптимальных параметров метода.

ТЕНЕВАЯ АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЧАСТИЦ, ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение малых скоростей является неотъемлемой частью аэродинамических измерений. Большинство практических задач, которые ставят перед аэрогазодинамикой авиация, ракетная техника, турбостроение, промышленное производство и т. д., требует для своего решения проведения экспериментальных исследований. В этих исследованиях на экспериментальных установках (аэродинамических трубах и стендах) моделируется рассматриваемое течение (например, движение самолёта с заданными величинами высоты и скорости) и определяются силовые и тепловые нагрузки на исследуемую модель. Соблюдение условий, диктуемых теорией моделирования, позволяет перейти от результатов эксперимента на модели к натуре. При решении многих задач возникает необходимость измерений суммарных сил, действующих на модель. Аэродинамическую силу, действующую на свободно летящую модель, можно определить, измеряя ускорение модели. Если размер модели не позволяет установить на ней необходимые приборы, то ускорение находят по изменению скорости v модели вдоль траектории.

2. АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЧАСТИЦ (PIV)

Анемометрия изображения частиц (Particle Image Velocimetry – PIV) [1] была впервые предложена Пакерингом, Хаивелом и Адрианом в 1984 году для векторного представления поля. Существует два направления в исследовании потоков с помощью АИЧ. Первый – общепринятый подход – изображения накапливаются на одном кадре. В этом случае изображение содержит пары частиц и с помощью автокорреляции определяется смещение частиц. Второй способ исследования состоит в записи двух последовательных разделенных изображений потока и, применяя кросскорреляцию, получают информацию о скорости потока. Такой способ был впервые предложен Виллертом и Чарибом в 1991 году. Использование кросскорреляции дает некоторые преимущества, такие как изменение диапазона, который автоматически включает ноль, обратные скорости и большой диапазон измерений скоростей.

В данный момент теория анемометрии изображения частиц достаточно хорошо разработана. В основу метода положена запись двух последовательных положений частиц, движущихся вместе с потоком в два момента времени и последующего анализа их смещения. Область измерения ограничивается либо тонким лазерным ножом (двухмерное поперечное сечение), либо освещается весь поток (полный трехмерный поток). Таким образом, АИЧ позволяет определить произвольное распределение скорости в любой заданный момент времени, а так же пространственное распределение скорости частиц для всего потока. Скорость среды определяется из анализа смещения частиц. Изображение частиц записывается с помощью фоточувствительной среды (фотопленка или матричный фотодетектор). Схема метода представлена на рис. 1.

Записанные изображения в два момента времени t_1 и t_2 складываются и затем с помощью различных средств обработки изображения, которые будут рассмотрены далее, получают информацию о скорости движения потока. Для визуализации движения всего потока строят векторное поле (рис. 2).

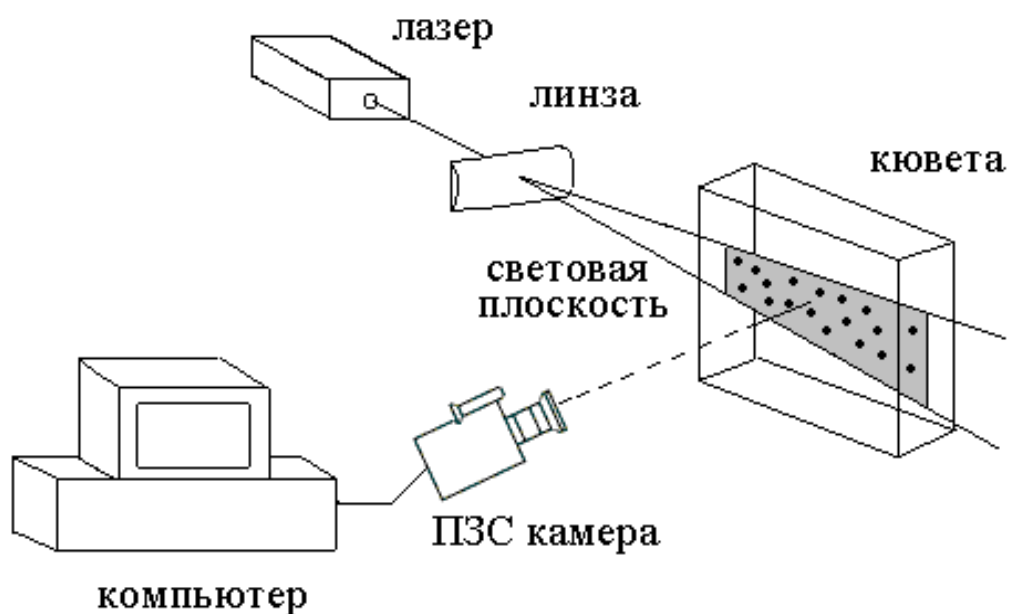


Рис. 1. Схема установки для измерения скорости с помощью АИЧ

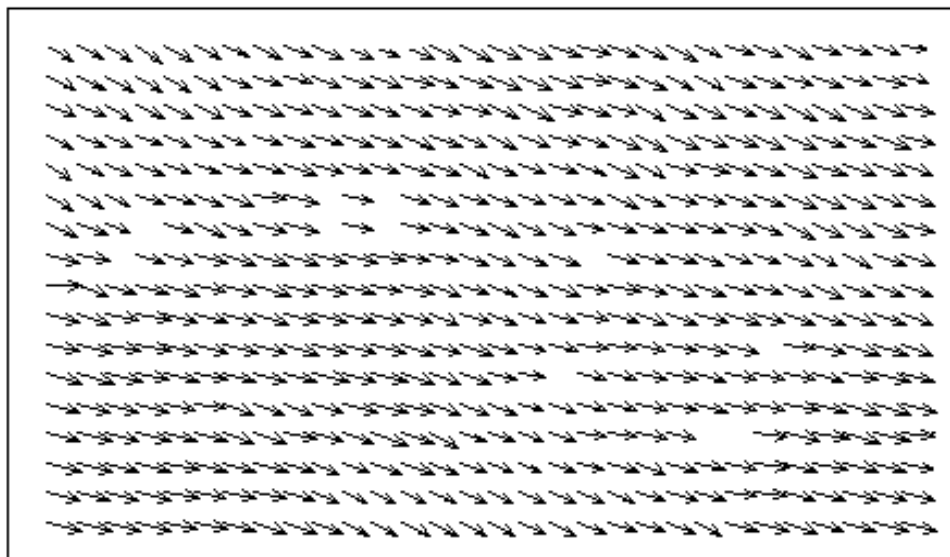


Рис. 2. Векторное поле скоростей

Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Размер, плотность и объемная концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока (см. рис. 2) считается плоскость, «вырезаемая» световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на фотографический или электронный носитель (цифровую камеру).

Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей образы частиц аппаратуры. Для измерения трех компонент скорости используют, как правило, два регистрирующих модуля, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

В качестве источника излучения обычно используются твердотельные импульсные Nd:YAG лазеры. Такие лазеры имеют малую длительность импульса ($\sim 4\text{--}10$ нс) и достаточно высокую энергию в импульсе. Использование двух лазеров, работающих на одной оптической оси, позволяет получать короткую временную задержку между импульсами, что необходимо для исследования высокоскоростных потоков. Иногда для освещения частиц применяют непрерывные лазеры, сканирующие поток при помощи вращающихся призм и зеркал.

Основными преимуществами метода являются: бесконтактность; возможность измерения мгновенных распределений скорости; широкий диапазон измеряемых скоростей – от нуля до сверхзвуковых.

3.ТЕНЕВАЯ АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЧАСТИЦ (PSV)

Метод PSV [2] является разновидностью PIV-метода. В PSV используются источники света с мощностью значительно ниже, чем у лазеров. В этом методе используется нерассеянное излучение от импульсного источника, такого как светоизлучающий диод (LED), направленное по прямой линии на матрицу камеры. Узкая

глубина резкости оптических установок используется для двумерной визуализации полёта частицы в объёме потока, и изображения похожие на "негативный" или "обратный" из обычного режима рассеивания PIV создаются с помощью теней частиц, которые падают на яркий фон. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

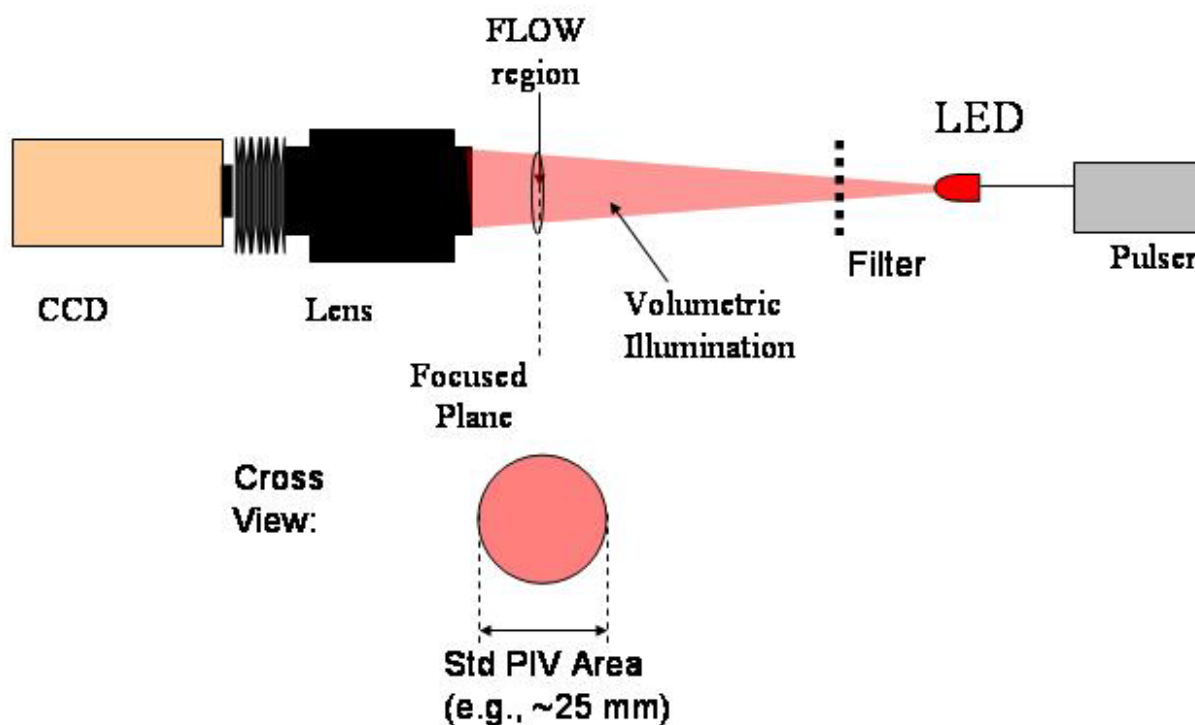


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:
 1 — камера; 2 — сильфон; 3 — объектив; 4 — область потока; 5 — светофильтр;
 6 — светодиод [1]

В схеме установки, основанной на методе PSV, глубина резкости, поле зрения и рабочее расстояние должны быть скорректированы с помощью распорки или гофрированной трубки вставленной между корпусом камеры и объективом. Глубина резкости уменьшается с расстоянием и увеличением апертуры, таким образом можно создать очень тонкую сфокусированную плоскость. В этом методе количество света, попадающего на плоскость изображения и различимость засеваемых частиц значительно увеличена, но требует значительно меньше энергии, чем в методах с рассеиванием. Различия PIV и PSV представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение PIV- и PSV- методов

Характеристика	PIV	PSV
Источник излучения	Непрерывный или импульсный лазер	Светодиод
Регистрируемое излучение	Отражение от засеянных частиц	Тень от засеянных частиц
Регистрация	CCD-камера 2 кадра с малым временем между ними	CCD-камера 2 кадра с малым временем между ними
Обработка	Кросскорреляционная обработка с построением векторного поля	Кросскорреляционная обработка с построением векторного поля

Важную роль в методе PSV играет подбор источника излучения. Выбор источника излучения производился из следующих типов: лампа накаливания (рис. 4, а), одиночные светодиоды различных размеров, типов покрытия и цвета (рис. 4, б), светодиодный прожектор (рис. 4, в), ламповый прожектор (рис. 4, г).

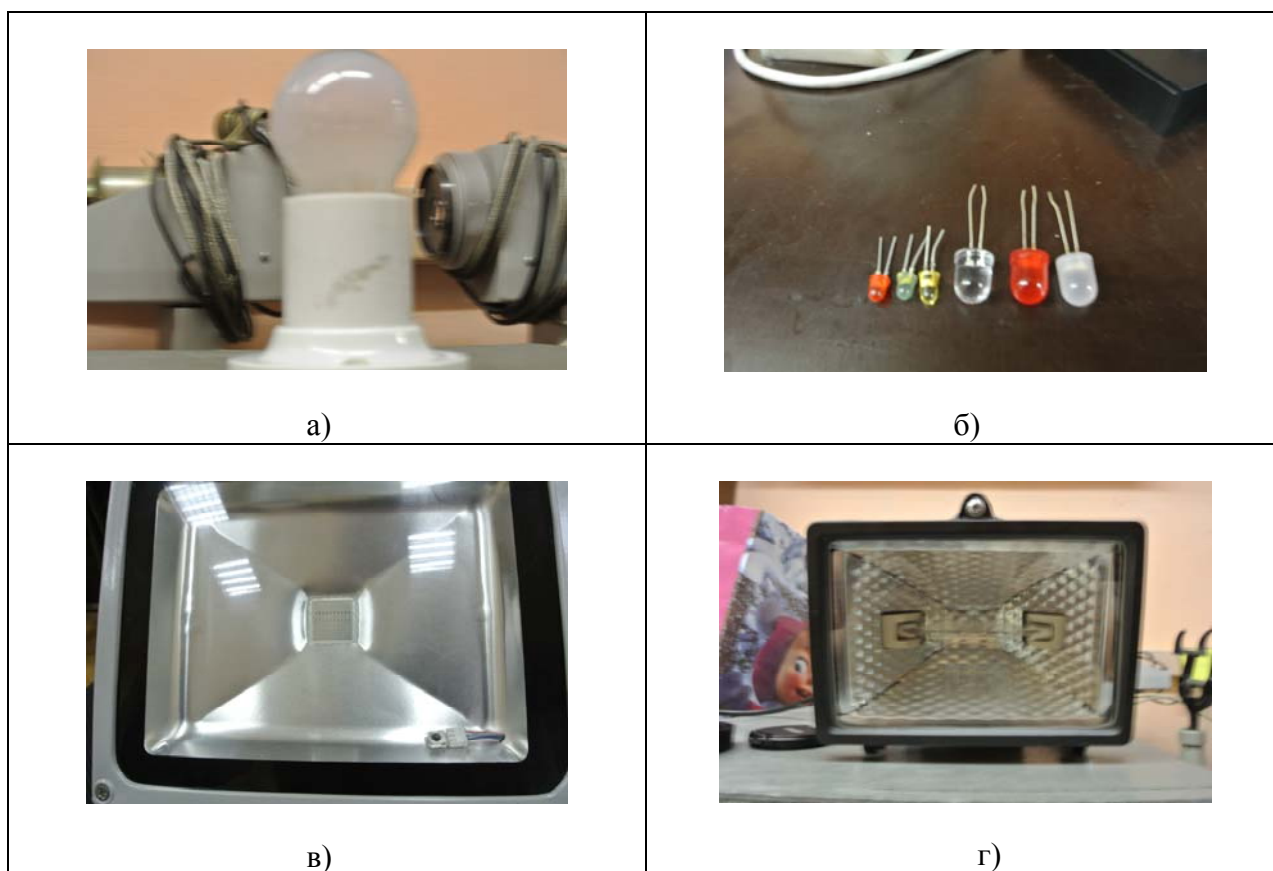


Рис. 4. Источники излучения

Определяющим фактором в выборе источника является качество тени (чёткие границы, отсутствие бликов, хороший контраст). На рис. 5 показаны тени, созданные различными источниками излучения: лампа накаливания (рис. 4, а), одиночный белый светодиод (рис. 4, б), светодиодный прожектор (рис. 4, в), ламповый прожектор (рис. 4, г).

Как видно из рисунков, тени от прожекторов (в, г) нас не устраивают (тени неоднородны, есть блики, границы нечёткие, присутствуют полутени, слабая контрастность). Возможно, их можно будет использовать для измерения более крупных частиц, но для нашей цели они не подходят. Одиночные источники дают тень хорошего качества, поэтому остановимся на них. Излучение от светодиода направленное, узкое и яркое, но лампа накаливания создаёт тоже очень неплохие тени, поэтому лампу можно применять при освещении большей области. Таким образом, можно остановить свой выбор на одиночном светодиоде.

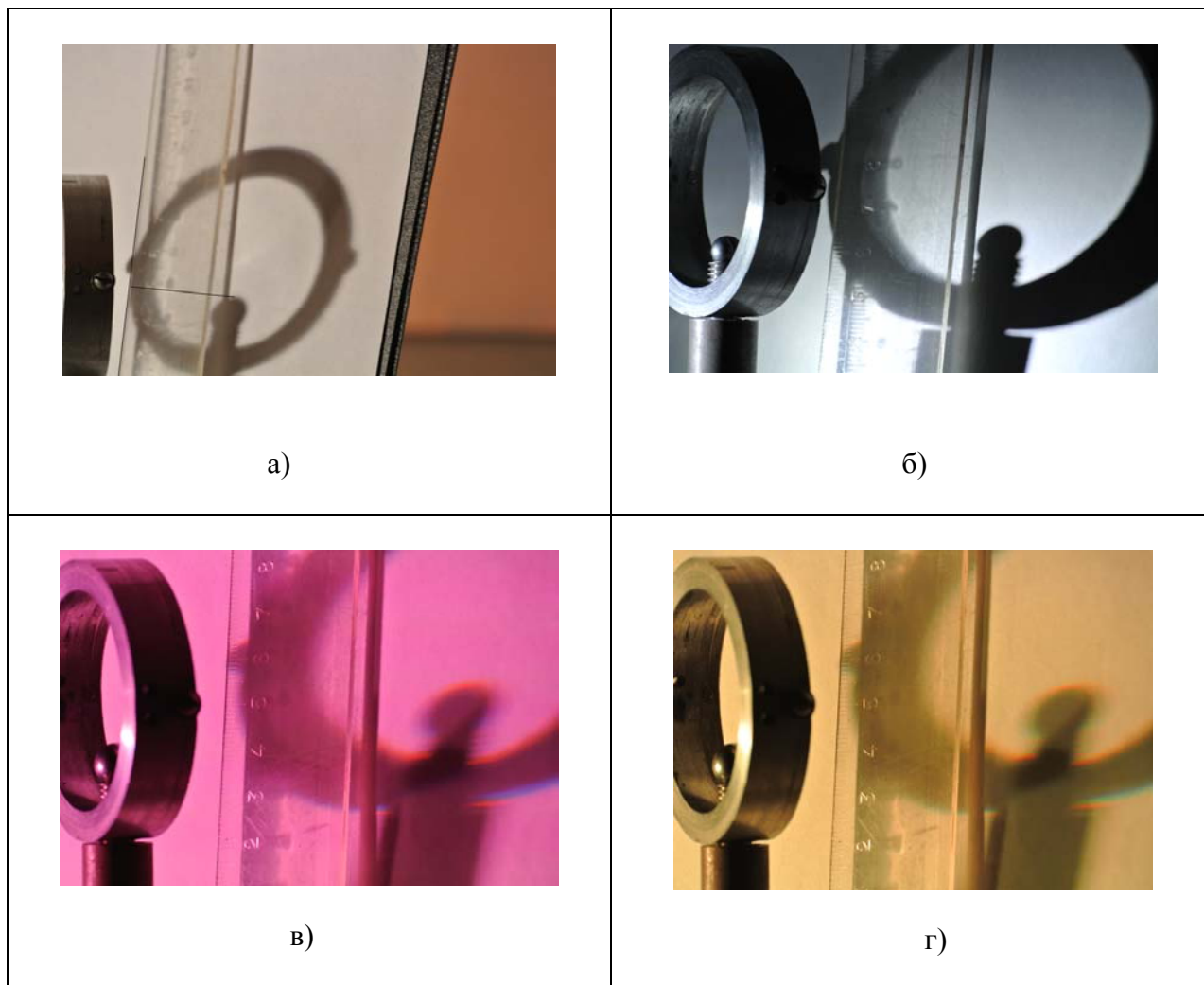


Рис. 5. Тени от различных источников

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕСТОВОГО ОБЪЕКТА

Целью эксперимента является измерение скорости падения пшена ($d = 2$ мм) в воде. Для этого будем использовать стандартную схему метода ТАИЧ.

Схема эксперимента представлена на рис. 6, она состоит из источника излучения (И) (синий светодиод), кюветы с водой (К), исследуемого объекта (О) (пшено) и фотоаппарата (Ф).

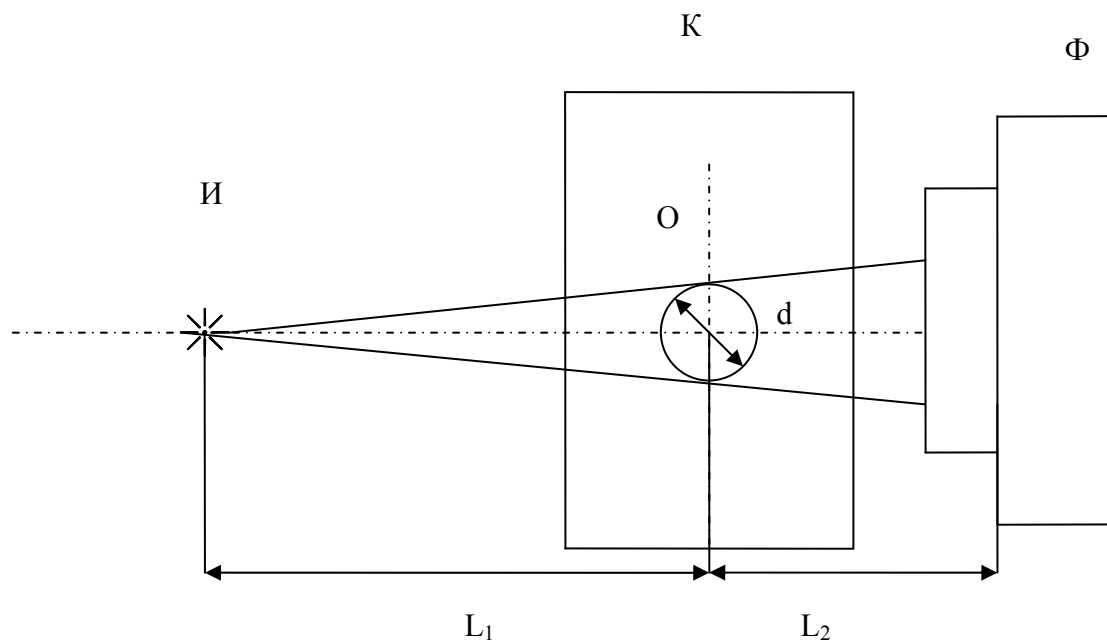
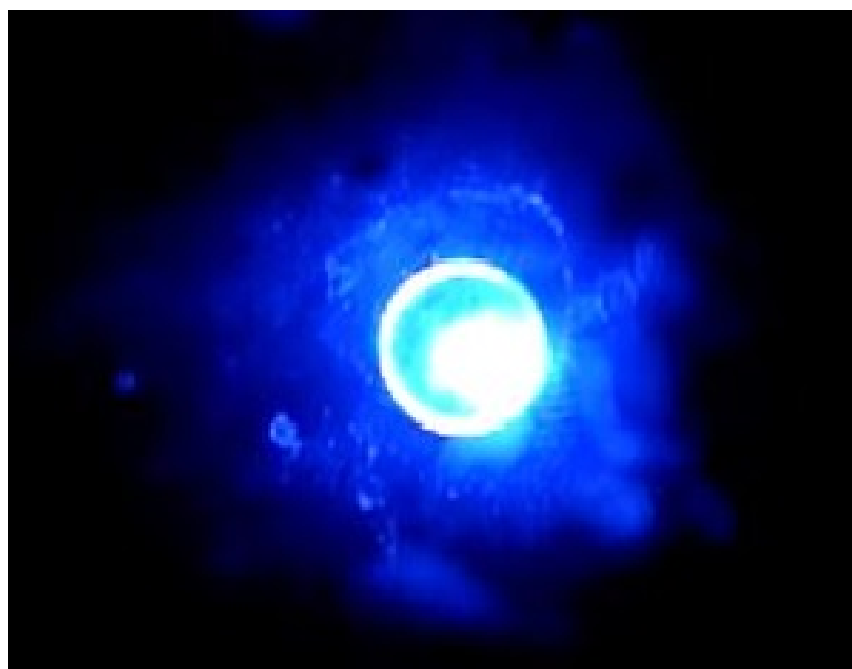
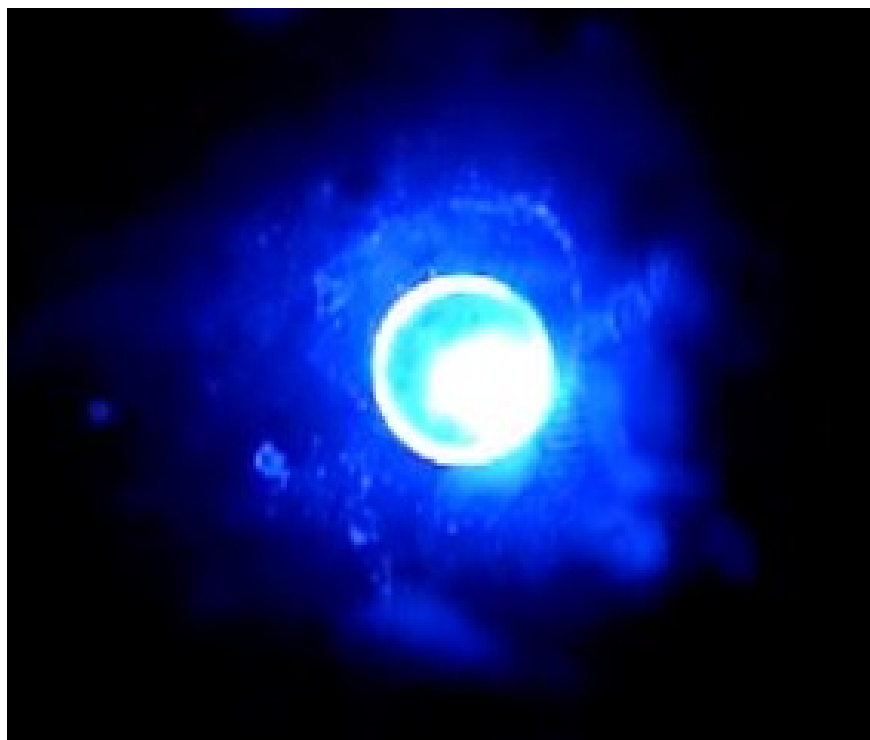


Рис. 6. Схема эксперимента

Рассчитаем скорость пшена с помощью PSV метода. Для получения двух кадров был использован режим быстрой съёмки (400 кадров/с). Кадры представлены на рис. 7.



а)



б)

а) Первый кадр и б) второй кадр

Рис. 7. Кадры в различные моменты времени

Зная скорость съёмки мы находим время между кадрами $t = 0,0025$ с. Из кадров находим пиксельный диаметр пшена, путём вычитания верхней и нижней координаты:

$$d_{\text{пкс.}} = y_{1\text{пкс.}} - y_{2\text{пкс.}} = 62\text{пкс} - 50\text{пкс} = 12\text{пкс}$$

Далее находим коэффициент перевода из пикселей в мм:

$$k = \frac{d}{d_{\text{пкс.}}} = \frac{2}{12} = 0,167 \text{ мм/пкс}$$

Теперь найдём смещение тени на втором кадре относительно первого:

$$l_{\text{пкс.}} = y_{1\text{кадра}} - y_{2\text{кадра}} = 66 \text{ пкс} - 62 \text{ пкс} = 4 \text{ пкс}$$

На рис. 8 представлен пример расчёта смещения с помощью пиксельной сетки.

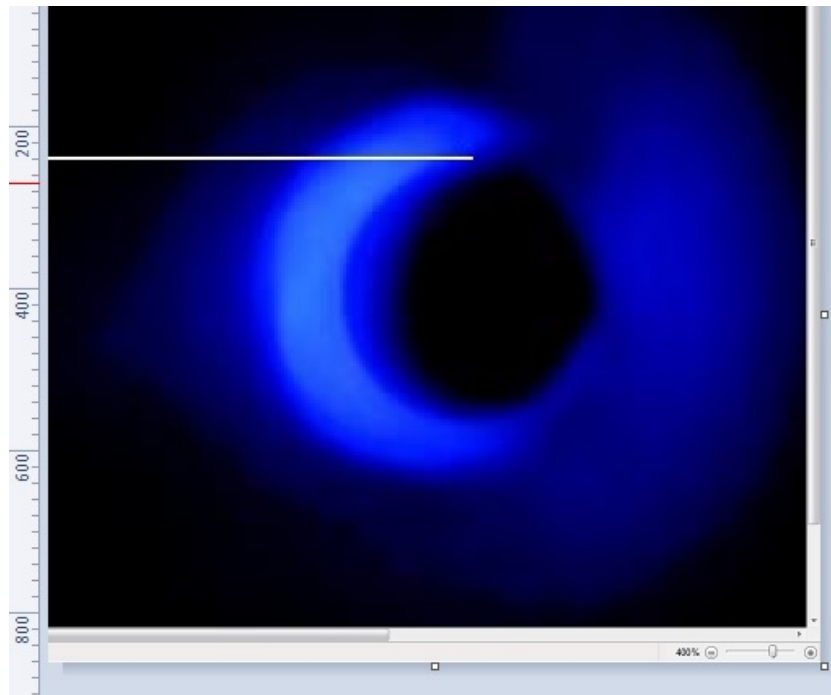


Рис. 8. Пример расчёта с помощью пиксельной сетки

Переведём смещение в мм, используя коэффициент перевода:

$$l = l_{\text{пикс.}} \cdot k = 0,668 \text{ мм}$$

Наконец, находим значение скорости:

$$V = \frac{0,668 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 0,267 \text{ м/с}$$

Проведём теоретический расчёт скорости по 3 закону Ньютона:

$$d_{\text{пшеница}} = 2 \text{ мм}$$

$$m_{\text{пшеница}} = 7 \text{ мг}$$

$$\eta_{\text{воды}} = 0,89 \text{ мПа} \cdot \text{с} \text{ (25}^\circ \text{C)}$$

$$F = m \cdot g - \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g - 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot V$$

$$F = 0 \Rightarrow V = \frac{m \cdot g - \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} = 0,261 \text{ м/с}$$

Найдём относительную погрешность измерения:

$$\delta_V = \frac{\Delta V}{V} \cdot 100\%$$

$$\Delta V = 0,267 - 0,261 = 0,006 \text{ м/с}$$

$$\delta_V = \frac{0,006}{0,261} \cdot 100\% = 2,3\%$$

Из расчётов следует, что относительная погрешность измерения метода составляет 2,3%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Освоение метода PSV позволяет заменить мощные источники излучения, используемые в анемометрии по изображению частиц (PIV), на более слабые, простые и компактные. При измерении скорости симметричных частиц метод не требует высокоточной юстировки, что значительно упрощает и ускоряет процесс измерения. В результате измерений получено значение скорости 0,261 м/с с относительной погрешностью 2,3 %.

6. БЛАГОДАРНОСТИ.

Работа выполнена по гранту РФФИ 13-07-00929а.

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Современные** оптические методы исследования потоков: Коллективная монография / Под ред. Б.С. Ринкевичюса. – М.: Оверлей. 2011
2. **Эстевадеордал Дж., Госс Л.** АИЧ со светодиодом: теневая анемометрия по изображению частиц // Innovative Scientific Solutions, Inc., Dayton, OH, 2005.

A.V. Glot, N.M. Skornyakova, O.A. Yevtikhieva, T.V. Bogdanova

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: nmskorn@mail.ru*

MEASUREMENT OF LOW VELOCITY BY PARTICLE SHADOW VELOCIMETRY

This report presents a shadow particle velocimetry method, its principle of operation and optimal parameters.

PARTICLE SHADOW VELOCIMETRY, MEASUREMENT OF LOW VELOCITY