



УДК 533.6.08

С.Ю. Колесников, С.В. Баюн, Н.М. Скорнякова, Н.Л. Рязанова

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: KolesnikovSY@mpei.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА В МЕЛКОДИСПЕРСНОМ АЭРОЗОЛЕ МЕТОДОМ АИЧ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию процесса движения воздушного потока внутри прозрачной кубической камеры, наполненной аэрозолем. Входное отверстие для подачи воздуха расположено по центру на одной из боковых граней куба. Для проведения эксперимента был использован бесконтактный оптический метод – анемометрия по изображениям частиц (АИЧ, PIV). Представлены поля мгновенных скоростей, построены графики распределения средней скорости в различных режимах работы генератора воздушного потока.

Для оценки соответствия результатов, полученных методом АИЧ, реальным значениям определение скорости частиц было проведено с помощью крыльчатого анемометра. Показана возможность исследования ламинарных воздушных потоков в аэрозоле методом АИЧ.

**АИЧ, PIV, АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ,
АЭРОЗОЛЬ.**

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, связанные с газо- и гидродинамическими потоками, присутствуют во многих технических устройствах и машинах, в различных научных установках. Подобные явления возникают, к примеру, при обтекании воздухом находящихся в движении транспортных средств или при работе винтовых двигателей корабля в водной среде. Многообразие аналогичных эффектов привело к возникновению множества методов для изучения закономерностей распределения вихревых и турбулентных течений в разного рода объектах. Поскольку условия распространения потоков могут быть достаточно жесткими – высокая температура (тысячи градусов) или большие скорости (единицы км/с) – преимущество получают оптические бесконтактные методы, которые не вносят никаких возмущений в исследуемый процесс. Одним из таких вариантов является анемометрия по изображениям частиц (АИЧ, PIV).

АИЧ используется для измерения скорости в выбранном сечении потока в гидро- и аэродинамических экспериментах [1, 2]. Благодаря данной технологии можно визуализировать двухкомпонентные векторные поля мгновенных скоростей жидких и газообразных течений путем цифровой обработки изображений. Достоинства применяемого метода – отсутствие влияния на поток и широкий диапазон измеряемых скоростей [3], что позволяет использовать его для исследования крупномасштабных вихревых структур,

сложных турбулентных течений, слоев смешения. Экспериментальные данные в значительном объеме набираются и обрабатываются на обычном персональном компьютере. Благодаря этому методу возможно получить информацию о динамике и структуре потока, масштабе, а также рассчитать статистические и дифференциальные характеристики течения.

Метод АИЧ в настоящее время широко распространен и востребован в различных технических сферах, таких как автомобиле- и авиастроение, энергетика, машиностроение. Также АИЧ находит применение в разнообразных научных областях: для изучения явлений в экологии и метеорологии. К примеру, АИЧ применяется для моделирования процессов загрязнения прибрежной зоны океана системами сброса сточных вод и измерения параметров потока воздуха над взволнованной поверхностью [4], а также для исследования характеристик потока в факеле форсунки газотурбинного двигателя [5].

Быстрое развитие лазерной техники, электроники, регистрирующей аппаратуры всячески способствует усовершенствованию методики экспериментов, позволяя измерять мгновенные поля скорости с более высоким пространственным и временным разрешением и автоматизировать процесс обработки.

PIV-метод в настоящее время широко используется во всевозможных областях науки и производства, постоянно расширяются границы его применения, однако, на данный момент не исследована его применимость к изучению аэродинамики топочных камер – котлов, в которых происходит сжигание топлива. В данных объектах в объем топки подается специальная топливно-воздушная смесь, сгорающая внутри камеры.

Целью данной работы является исследование возможности использования метода АИЧ для реализации его в модели топочной камеры. Оценка производится по картинам поля скоростей потока, построенных для случаев распространения специального аэрозоля на выходе из круглого отверстия в пространстве кубического аквариума, и сравнении профилей средней скорости тем значениям, которые получены с помощью крыльчатого анемометра.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для измерения мгновенной скорости потока использовалась PIV система диагностики потоков LaVision FlowMaster. Она состояла из импульсного Nd:YAG лазера фирмы Litron Lasers, работающего на двух длинах волн волны – 532 нм и 1064 нм (частота следования пар импульсов 6 Гц, длительность импульсов 6 – 9 нс с энергией в импульсе 150 мДж, задержка между импульсами в паре 0,01с). В качестве приемника излучения выступала CCD камера Imager pro SX 5M (разрешение 5 Мп, разрядность 12 бит) и синхронизирующего процессора. Управление системой, сбор, хранение и обработка данных осуществлялась при помощи компьютера с программным обеспечением DaVis. Поток аэрозоля (средний диаметр 1 мкм) освещался лазерным ножом толщиной 3 мм. Для регистрации частиц, рассеивающих лазерное излучение, использовался оптический фильтр.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки для исследования распространения воздушного потока в наполненном аэрозолем аквариуме через круглое отверстие. Маркерами в данном опыте являются частицы мелкодисперсного аэрозоля, которые поступают в аквариум через отверстие в нижней части одной из стенок куба. Камера с закрытой верхней крышкой наполняется смесью, затем генератор выключается. Поток воздуха через входное отверстие диаметром 40 мм, расположенным в центре стенки куба, создается бытовым пылесосом. Измерения проводилось в разных режима скорости подачи частиц (№1, №2 и №3). Для обеспечения ламинарности струи трубка, по которой двигался воздух, максимально удлинялась. Лазерная плоскость, создаваемая с помощью специальной оптической насадки, подсвечивает исследуемый поток, и CCD камера, синхронизированная с импульсами лазера, регистрирует изображения трассеров, попавших в выбранное сечение. Источник излучения

«стреляет» парами импульсов: один импульс с длиной волны 532 нм, второй – с длиной волны 1064 нм. Соответственно, камера фиксирует изображения парами – этот режим съемки называется Double Frame (двойной кадр).

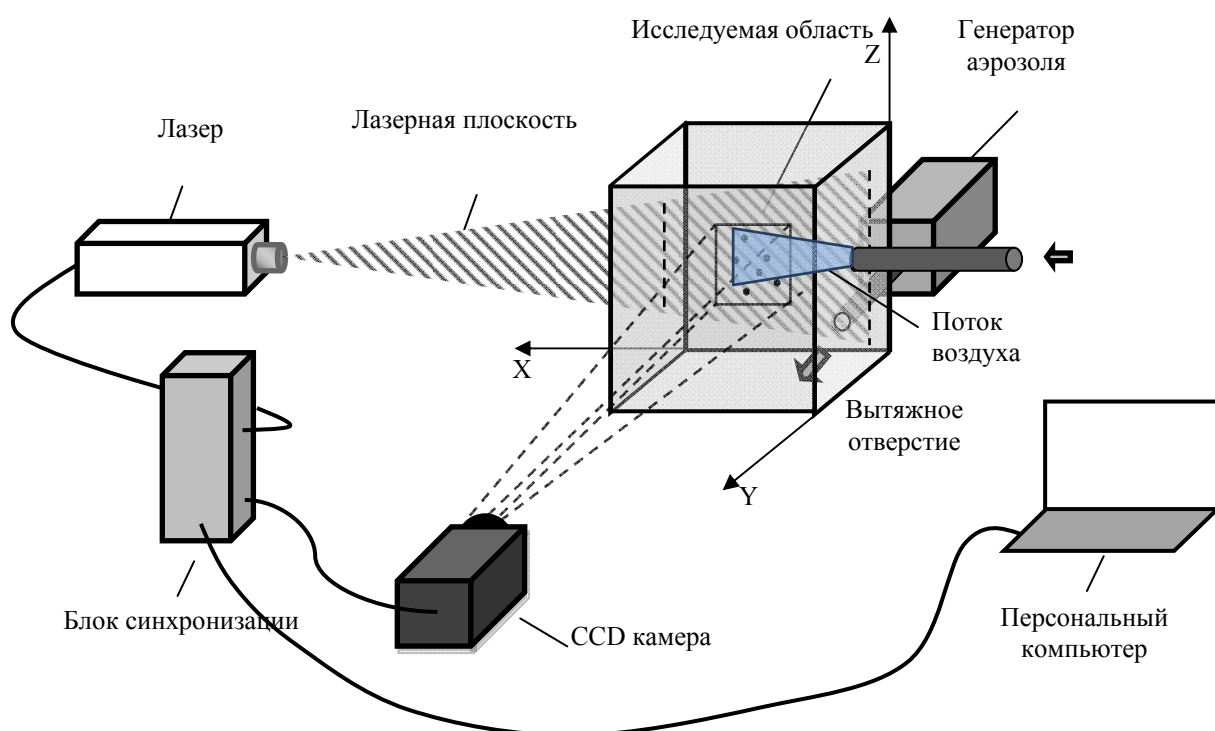


Рис.1. Схема установки для исследования распространения воздуха в аэрозоле по объему аквариума

Полученные изображения подвергались кросскорреляционной обработке, заключающейся в нахождении корреляционных максимумов [6]. Основными параметрами обработки, от которых зависит результат визуализации, являются размер и форма окна опроса, а также процент перекрытия опрашиваемых областей. В итоге были получены векторные поля скоростей частиц наблюдаемого потока, а также рассчитаны профили средней скорости в выбранной плоскости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Картины визуализации, полученные с ПЗС камеры, на компьютере подвергались кросскорреляционной обработке. Расчет скорости проводился по области осреднения 32×32 пикс. и 24×24 пикс. без перекрытий окон опроса. В результате были получены двумерные картины полей скорости, по которым можно сделать выводы о распространении потока по объему исследуемой установки.

Изображение потока воздуха в аэрозоле для длин волн 532 нм и 1064 нм (а) и б) соответственно) для режима работы пылесоса на скорости №1 представлены на рис. 2. Для ускорения расчетов обрабатывалось только основная часть вихря (без засветок и затемненных областей). При сравнении данных кадров направление смещения частиц заметно без обработки, что является важным условием для качественной кросскорреляционной обработки. Анализ данной пары кадров говорит о том, что с расстоянием ток воздуха значительно ослабевает и струя «схлопывается». В дальнейшем будут приводиться только результаты обработки для различных скоростей работы бытового пылесоса.

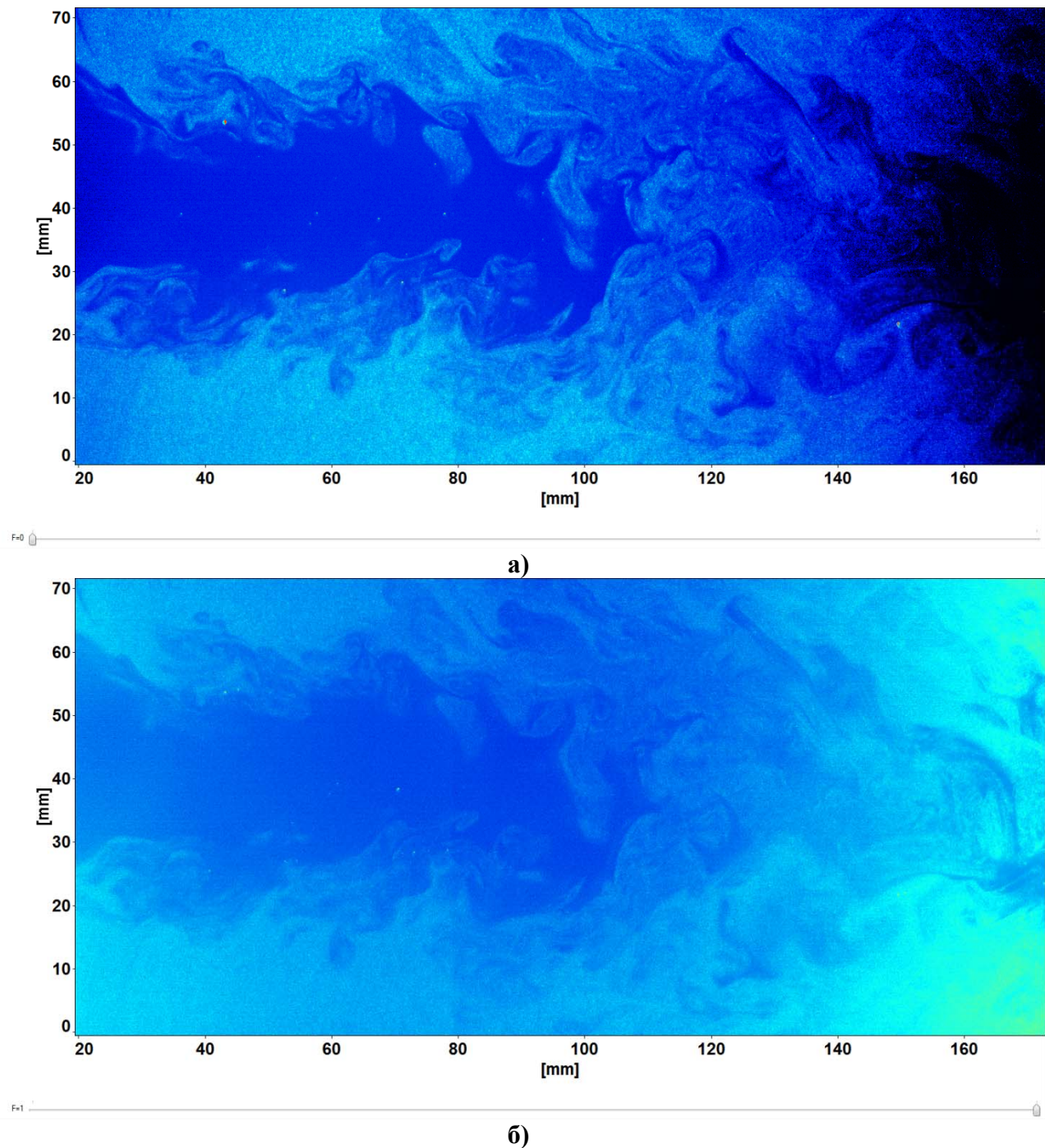
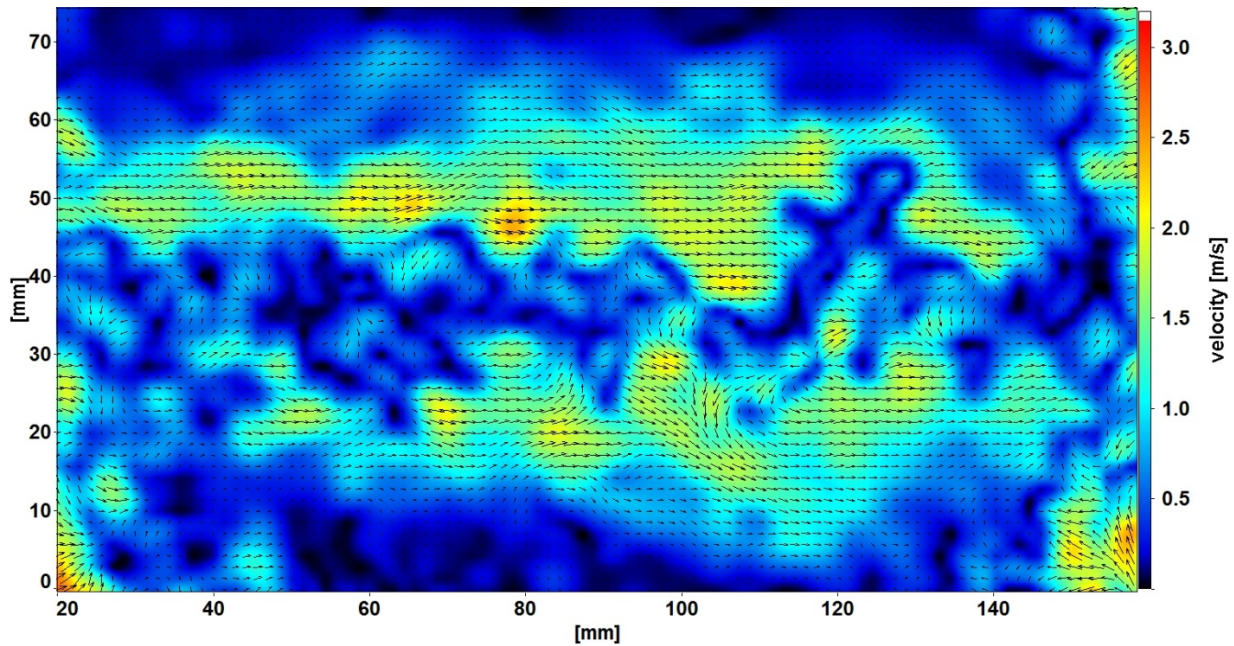


Рис.2. Визуализация эксперимента с аквариумом: а) – изображение потока аэрозоля; б) – соответствующее поле скоростей

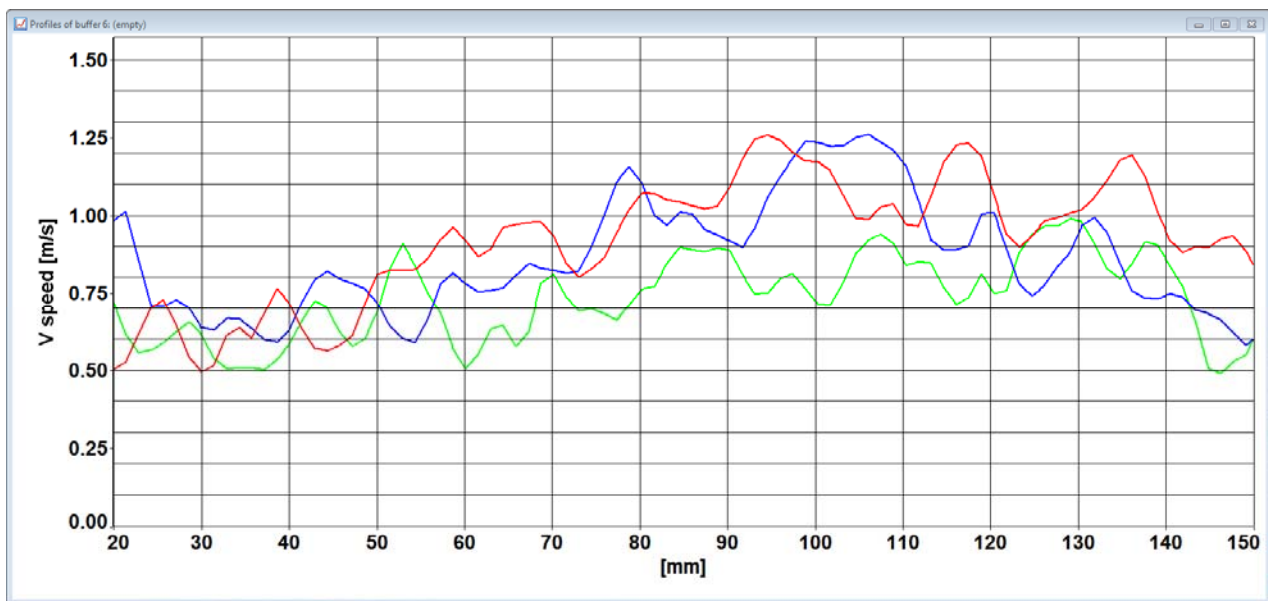
На рис. 3, а представлено поле скоростей для скорости №1. Цвет и размер фоновой области зависит от скоростей исследуемых частиц. Направления корреляционных векторов совпадают с направлениями движения трассеров, что следует из сравнения изображений потока на смежных кадрах от двух лазеров. Скорость различных участков струи достигает 2,3 м/с. Поток в обрабатываемой области имеет практически прямоугольную форму, верхний и нижний край струи движутся со схожими скоростями. По центральной оси частиц аэрозоля практически нет, поэтому здесь наблюдаются темные области.

Профиль средней скорости изображен на рис. 3, б. Распределения строилось путем выделения верхней части потока и расчета среднего значения вдоль оси X. На графике

приведены результаты для трех последовательных обработанных пар кадров. Для сравнения с показаниями крыльчатого анемометра используются значения по оси $X = 50$ мм. Значение средней скорости, полученные методом АИЧ – 0,73 м/с, измеренное анемометром – 0,81 м/с. Из результатов следует, что скорости различаются на 10%, что объяснимо поскольку мы имеем дело с разными алгоритмами усреднения.



а)

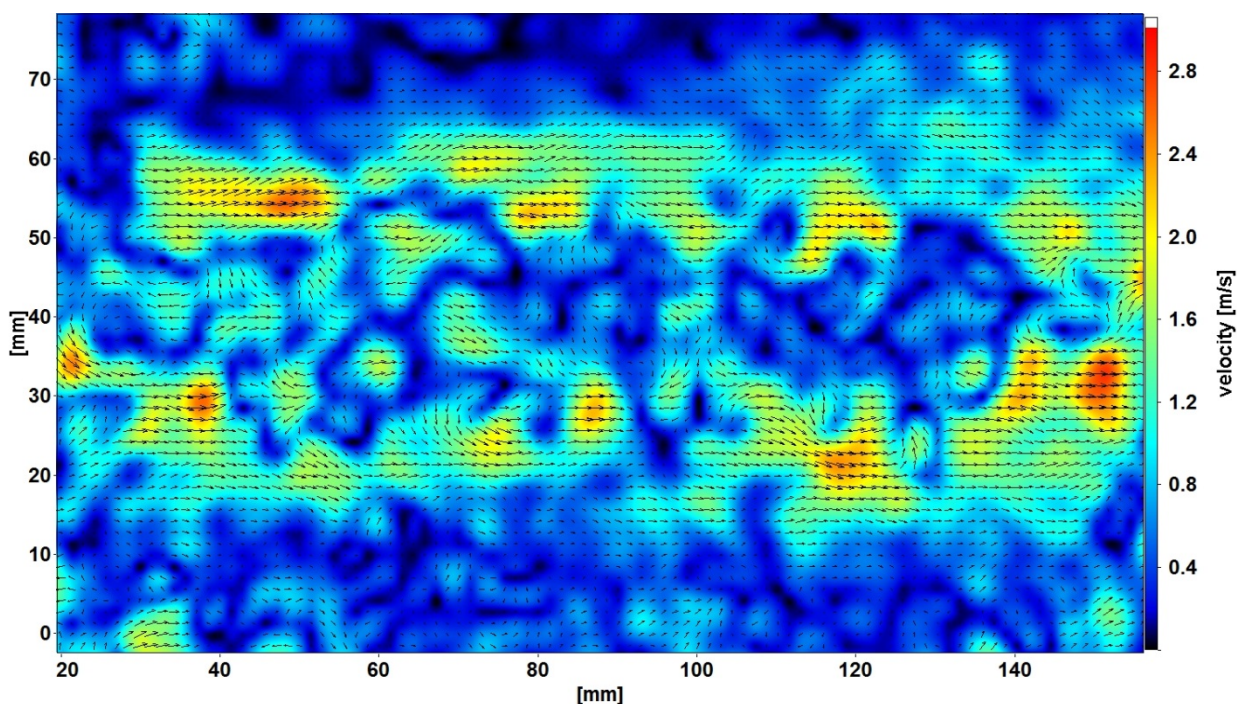


б)

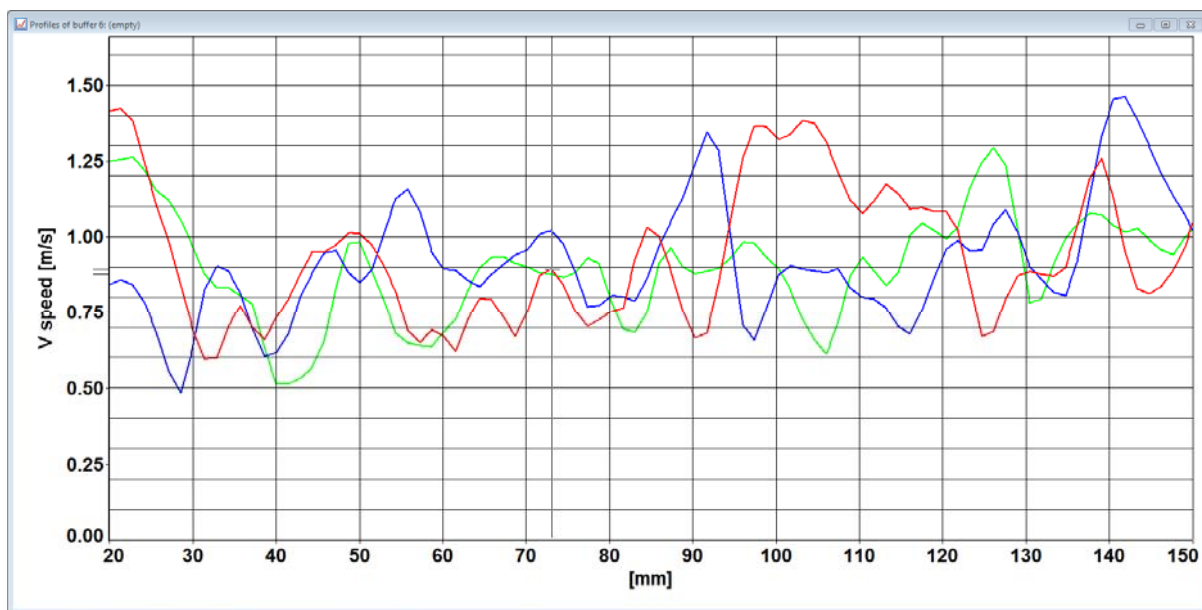
Рис.3. Обработка эксперимента в режиме скорости №1 для пары кадров а) – поле скоростей; б) – профиль средней скорости.

Результаты измерения для режима работы пылесоса на скорости №2 отображены на рис. 4, а и 4, б. По сравнению с предыдущим режимом максимальные скорости здесь возросли и достигают величины 2,7 м/с, форма потока также стремится к прямоугольной. Значение средней скорости, полученные методом АИЧ – 0,95 м/с, измеренное анемометром –

1,08 м/с. Разница в показаниях не превышает 15%, что свидетельствует о схожих результатах двух способов измерений.



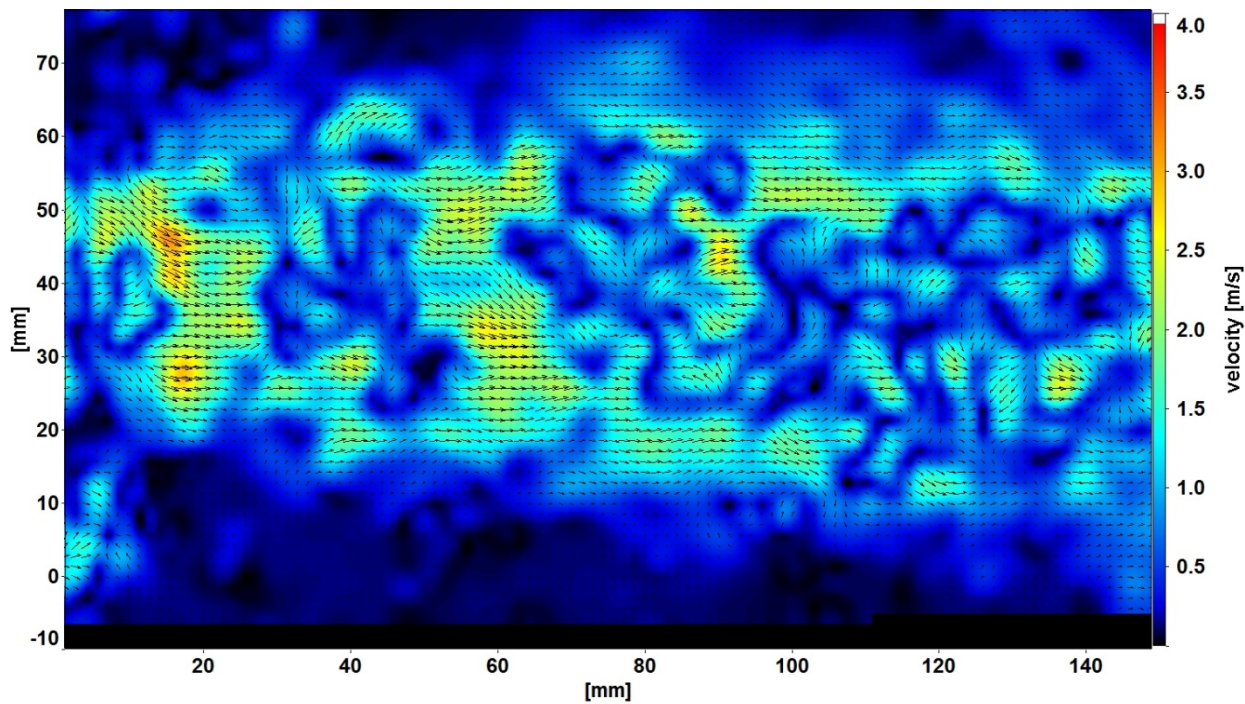
а)



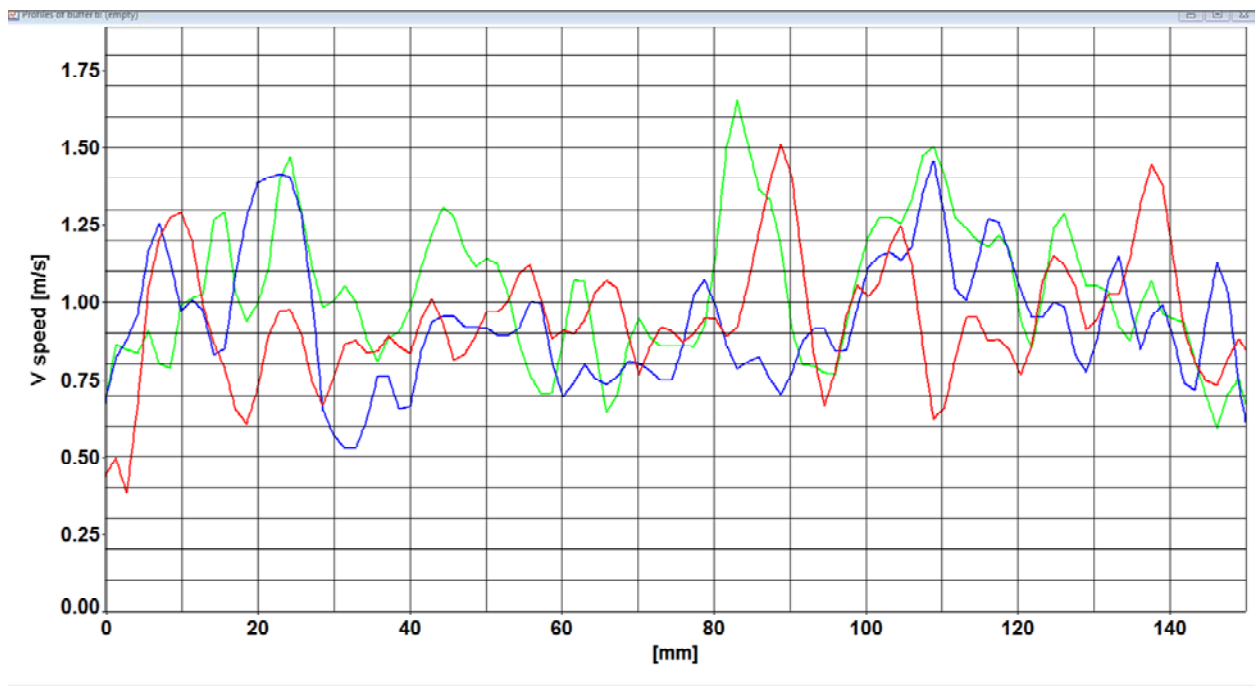
б)

Рис.4. Обработка эксперимента в режиме скорости №2 для пары кадров а) – поле скоростей; б) – профиль средней скорости

На рис. 5, а и 5, б показаны результаты обработки для режима работы пылесоса на скорости №3. Верхний и нижний край потоковой области более размыты, чем в предыдущих случаях, что объясняется более сильными возмущениями со стороны воздуха на аэрозоль. Здесь наблюдается самое высокое значение максимальной скорости – 3,2 м/с, в прямоугольном течении. Значение средней скорости, полученные методом АИЧ – 1,05 м/с, измеренное анемометром – 1,19 м/с. Разница в показаниях лежит в пределах 15%, что является хорошим показателем для метода АИЧ.



a)



б)

Рис.5. Обработка эксперимента в режиме скорости №3 для пары кадров а) – поле скоростей; б) – профиль средней скорости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе реализован метод АИЧ для измерения полей скоростей в выбранном сечении потока и построены профили средней скорости вдоль оси X для трех последовательных пар кадров. Также были измерены скорости с использованием крыльчатого анемометра. Сравнение результатов показало, что благодаря АИЧ диагностике

можно получить достоверные сведения о распределении скоростей частиц и их направлении в потоке. Проведенные исследования показали возможность применения методики анемометрии по изображениям частиц для анализа ламинарного потока воздуха в аэрозоли в объеме аквариума, вариация которого может выступать в роли модели топочной камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скорнякова Н.М., Ринкевичюс Б.С. Оптические методы диагностики микропотоков.// Оптические методы исследования потоков 2009. Сборник трудов МНТК. М.: Изд. дом МЭИ. 2009.
2. Адриан Р.Дж. Двадцать лет оптическому методу измерения полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока // Experiments in Fluids (2005) 39: 159–169.
3. Баун М. Р., Макиннес Дж. М. и Аллен Р. В. К. Моделирование и измерение скорости потока в микроканалах сложной конфигурации с помощью метода микро-PIV // Meas. Sci. Technol. 16 (2005) 619–626.
4. Сергеев Д.А. Использование современных методов анемометрии по изображениям частиц (piv-методов) при лабораторном моделировании геофизических течений// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (2), с. 522–524
5. Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н. Применение прямых оптических методов для исследования характеристик двухфазного потока// Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 76
6. Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J. Particle image velocimetry: a practical guide/ 2nd ed. 2007, XX, P. 79-95.

S.Y. Kolesnikov, S.V. Bayun, N.M. Skornyakova, N.L. Ryazanova

National research university «MPEI», Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: KolesnikovSY@mpei.ru

RESEARCH OF THE LAMINAR STREAM OF AIR IN THE FINE AEROSOL BY PIV METHOD

Work is devoted to research of process of the movement of an air stream in the transparent cubic camera filled with an aerosol. The entrance opening for air supply is located on the center on one of side sides of a cube. For carrying out experiment was used the contactless optical method – particle image velocimetry (PIV). Fields of instantaneous velocities are presented, schedules of distribution of average speed in various operating modes of the generator of an air stream are constructed.

For an assessment of compliance of the results received by the PIV method to real values determination of speed of particles was carried out by means of the vane anemometer. Possibility of research of laminar air streams in an aerosol is shown by the PIV method.

PIV, PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, FIELD OF SPEEDS, AEROSOL