

УДК 535.317.2

Д.А. Пояцыка, О.А. Евтихиева

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

## **ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ТОЧНОСТЬ МЕТОДА АНЕМОМЕТРИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ**

### **АННОТАЦИЯ**

В данной работе рассмотрены различные случаи прохождения лазерной плоскости через полый стеклянный цилиндр. С помощью компьютерного моделирования получены картины, характеризующие профиль лазерной плоскости в приближении геометрической оптики. Был проведён анализ смещения лучей на экране после прохождения лазерной плоскости через цилиндр. Проведен эксперимент, соответствующий теоретическому расчету.

**АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, ЛАЗЕРНАЯ ПЛОСКОСТЬ,  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

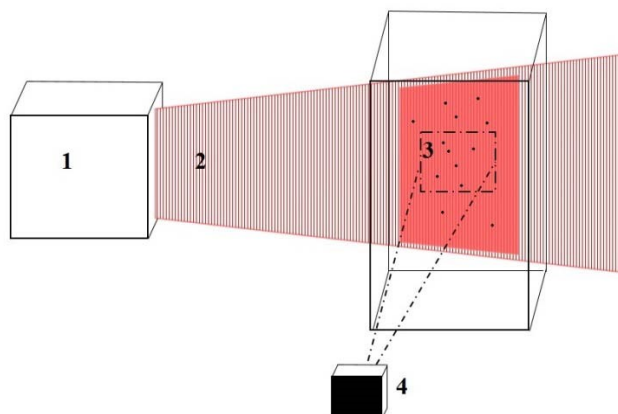
В настоящее время существуют различные методы исследования потоков жидкости, основанные на измерении температуры, давления, скорости и других различных параметров движущихся сред, но применение большей части из этих методов сопровождается внесением искажений в поток. Оптические методы не вносят механических возмущений в исследуемую среду. Особое место здесь занимают методы, позволяющие получать информацию об исследуемом объекте в некоторой области пространства в заданный момент времени. Наиболее известными и изучаемыми являются теневой фоновый метод (ТФМ) и анемометрия по изображениям частиц (АИЧ). Для регистрации и обработки экспериментальных данных применяются современные компьютерные технологии, позволяющие обрабатывать большой объем информации. ТФМ и АИЧ получили распространение в области исследования различных потоков благодаря широким возможностям для визуализации и получения количественных характеристик.

### **Анемометрия по изображениям частиц**

Метод анемометрии по изображениям частиц (АИЧ) или PIV (Particle Image Velocimetry) – современный бесконтактный метод измерения полей скоростей потоков, основанный на цифровых методах обработки изображений [1].

Измерения в методе АИЧ осуществляются в некоторой исследуемой области течения, освещенной лазерной плоскостью. В зависимости от ориентации лазерной плоскости АИЧ позволяет исследовать различные сечения потока. Поле мгновенного распределения скоростей рассчитывается с помощью найденных смещений частиц на изображениях, выполненных в различные моменты времени. Для определения величин и направлений

перемещения частиц к зарегистрированным изображениям применяют статистические методы, основанные на корреляционных алгоритмах обработки данных. Вид принципиальной схемы АИЧ-метода представлен на рисунке 1.



1 – лазер; 2 – лазерная плоскость; 3 – исследуемая область потока; 4 – фотоприемник;  
Рисунок 1 – Принципиальная схема АИЧ-метода

Видеокамера служит для регистрации движения частиц в потоке в течение времени наблюдения. Полученные видеокамерой изображения обрабатываются посредством кросскорреляционной функции (в случае регистрации на двух последовательных кадрах, в противном случае используется автокорреляционная функция). Алгоритмы обработки основаны на статистических методах. Современные компьютерные программы имеют большие возможности обработки подобных изображений, например, в них реализована возможность подбора таких параметров, как размеры, форма и процент перекрытия окон опроса, адаптивные методы подбора расчетных областей, различные методы для повышения точности поиска максимума корреляционной функции, а также методы фильтрации и пакетная обработка изображений.

Говоря об АИЧ-методе, не стоит забывать о его погрешности, которая может быть определена особенностями процесса и характеристиками измерительной системы. На величину погрешности влияют различные факторы. Минимизация погрешности рассматриваемого метода в значительной степени зависит от подбора оптимальных параметров визуализирующих частиц, выбора толщины и расположения лазерного ножа в сечении потока, а также от выбора алгоритмов обработки экспериментальных изображений. Для определения величины погрешности АИЧ-измерений можно применять такие методы как проведение экспериментов с реальными физическими объектами, обладающими известным распределением скоростей, проведение виртуальных экспериментов с искусственными изображениями, сгенерированными по заданным параметрам, вклад которых в погрешность метода необходимо оценить. [2 – 4]

Необходимо так же учитывать, что для исследования потоков, например, жидкости или газа, измерения удобно проводить в трубопроводе. Следовательно, необходимо учитывать погрешность, вносимую в распространение лазерной плоскости через цилиндрический сосуд. Принято, что лазерная плоскость пересекает исследуемую область без искажений своей формы, и в процессе обработки получаемых изображений, считается, что лазерная плоскость выделила плоское сечение исследуемой области. В действительности, если лазерная плоскость будет проходить через сосуд цилиндрической формы, то из-за рефракции на стенках цилиндра будут внесены искажения в ее форму, что может существенно повлиять на результаты измерений.

Таким образом, анемометрия по изображениям частиц является методом, в котором оптимально сочетаются простота реализации, применение современных компьютерных технологий для регистрации и анализа экспериментальных данных, а также широкие

возможности для визуализации и получения количественных характеристик исследуемого объекта.

## РАСЧЁТ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ ЛАЗЕРНОЙ ПЛОСКОСТИ

### Теоритический расчёт влияния полого стеклянного цилиндра на искажение формы лазерной плоскости

Для расчёта влияния стенок полого стеклянного цилиндра на искажение формы лазерной плоскости была выбрана система, изображенная на рисунке 1. Система состоит из блока формирования лазерной плоскости (1), стеклянного цилиндра (2) и экрана (3), на котором наблюдается смещение лучей лазерной плоскости.

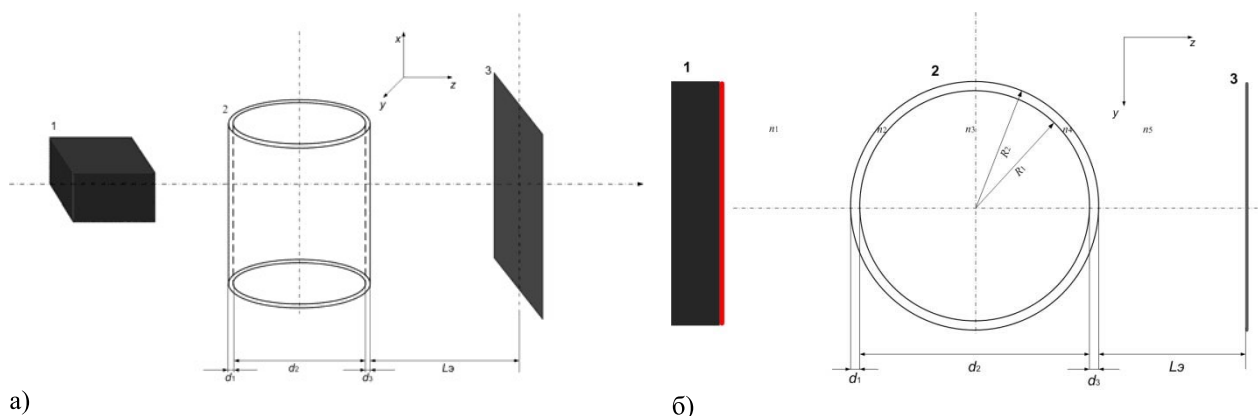


Рисунок 1 – а) система для расчёта, б) вид сверху на систему для расчёта; 1 – блок формирования лазерной плоскости, 2 – полый цилиндр, 3 – экран для наблюдения лазерной плоскости.

Было принято, что показатель преломления воздуха  $n_1 = n_3 = n_5 = 1$ , стекла  $n_2 = n_4 = 1,5$ . Параметры цилиндра:  $R_1 = 50$  мм,  $R_2 = 54$  мм,  $x = 100$  мм.

Для расчёта прохождения лазерной плоскости через цилиндр использовались формулы для действительных лучей, проходящих через систему линз (1.1 - 1.5). В данных формулах учитываются правила знаков, принятые в геометрической оптике.

$$\varepsilon_k = \arcsin\left(\frac{r_k - S_k}{r_k} \cdot \sin(\sigma_{k-1})\right), \quad (1)$$

$$\varepsilon'_k = \arcsin\left(\frac{n_k \cdot \sin(\varepsilon_k)}{n_{k+1}}\right), \quad (2)$$

$$\sigma'_k = \sigma'_{k-1} - \varepsilon_k + \varepsilon'_k, \quad (3)$$

$$S'_k = r_k \cdot \left(1 - \frac{\sin(\varepsilon'_k)}{\sin(\sigma'_k)}\right), \quad (4)$$

$$S_{k+1} = S'_k - d_k. \quad (5)$$

Рассматриваемый цилиндр содержит четыре преломляющих поверхности, в котором радиусы кривизны первых двух поверхностей соответственно равны радиусам кривизны вторых двух по модулю.

Задачей является определить смещение лучей лазерной плоскости, наблюдаемое на экране. По формулам 1 - 5 рассчитывается прохождение одного луча через систему. Однако так как расчёт необходимо провести для лазерной плоскости, то нужно рассчитать ход семейства лучей, идущих параллельно друг другу через малые расстояния, чтобы создать модель лазерной плоскости.

Формулы 1 – 5 применяются последовательно для каждой преломляющей поверхности. Соответственно, если экран находится на расстоянии  $L_3$  от последней преломляющей поверхности, то функция зависимости смещения на экране от начальной высоты примет вид:

$$h_{\text{смещ}}(h) = -[(L_3 - S_4(h)) \cdot \text{tg}(\sigma_4(h))]. \quad (6)$$

Для модели лазерной плоскости лучи можно пустить с промежутком в 1 мм по всей ширине лазерной плоскости и по формуле 6 построить зависимости смещения лучей на экране от начальной высоты  $h$ .

Можно изобразить картину, наблюдаемую на экране. В отсутствие цилиндра лазерная плоскость прошла бы без изменений, и моделируемая картина на экране приняла вид, изображенный на рисунке 2а. На рисунке 2б показан вид лучей лазерной плоскости после прохождения преломляющих поверхностей цилиндра. Красными точками на рисунках обозначены лучи, взятые с шагом 1 мм вдоль ширины лазерной плоскости.

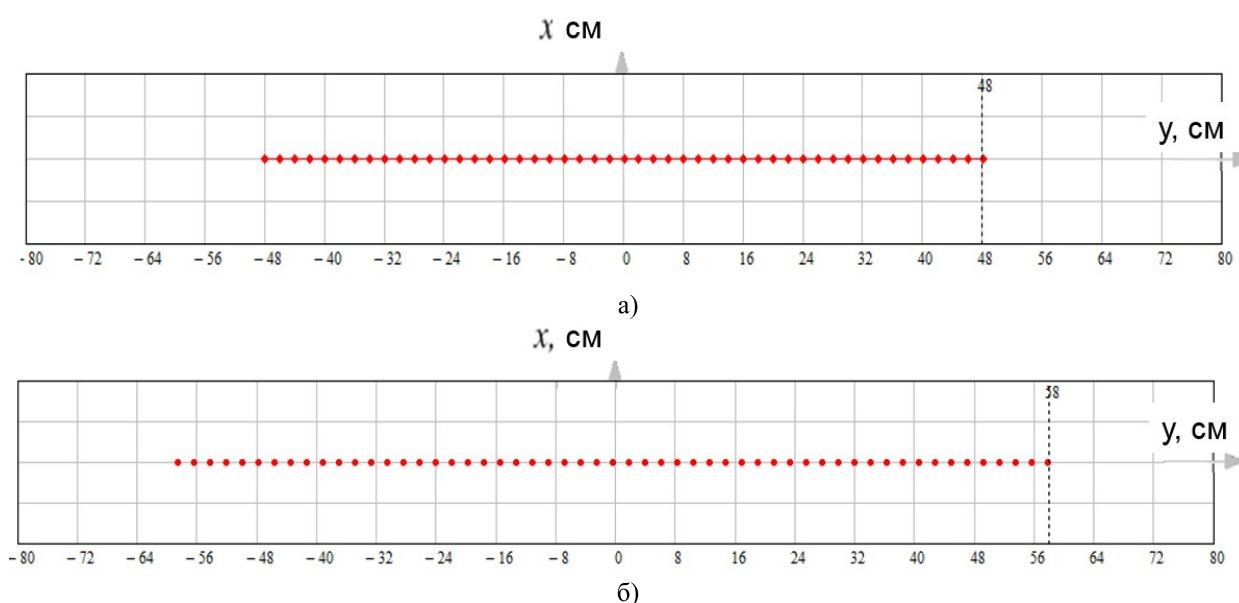


Рисунок 2 – Вид лазерной плоскости на экране

Пусть лазерная плоскость идёт под углом  $\alpha = 45^\circ$  в системе при отсутствии цилиндра. Как и в предыдущих случаях, лазерная плоскость заменена моделью лучей, идущих параллельно друг другу через промежуток в 1 мм. Используя формулы 1 – 5 и зависимость от угла наклона идущих лучей, можно просчитать ход каждого луча наклонной лазерной плоскости.

После прохождения системы с цилиндром, на экране будет наблюдаться картина, изображенная на рисунке 3. Как было рассчитано в предыдущих пунктах - лазерная

плоскость расширяется по мере удаления от оптической оси. Чем дальше от центра координат, тем больше смещение точек на лазерной плоскости.

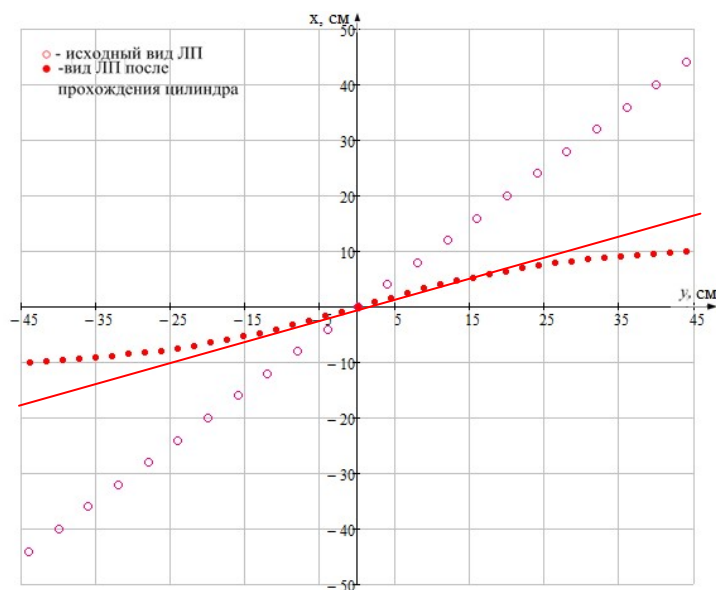


Рисунок 3 - Вид лазерной плоскости после прохождения цилиндра

При пересечении лазерным пучком исследуемой области предполагается, что лазерная плоскость создает плоскую область с попавшими в нее частицами. Но, при повороте исследуемой среды (например, трубопровода с жидкостью), либо самой лазерной плоскости, что иногда бывает целесообразно для различных типов экспериментальных исследований, оказывается, что лазерная плоскость изменяет свою форму и получается не плоское пространство, а изогнутая область. Такие искажения необходимо учитывать при дальнейшей обработке изображений, получаемых для исследуемой области.

### Экспериментальный расчёт и обработка

Для экспериментального подтверждения теоретического расчета, было проведено исследование искажения лазерной плоскости после прохождения системы с цилиндром. Схема эксперимента приведена на рисунке 4.

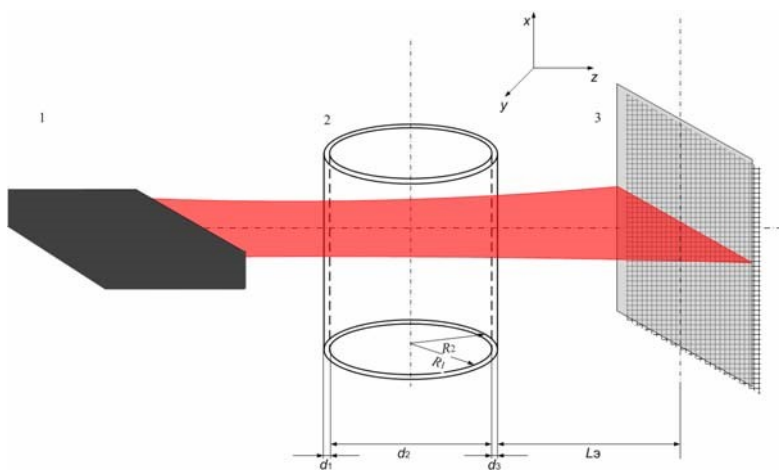


Рисунок 4 – Схема эксперимента

В опыте использовались лазерный модуль S-12, 10 мВт,  $\lambda=532$  нм, цилиндр с параметрами, соответствующими теоретическому расчету.

В качестве элемента, формирующего лазерную плоскость, была выбрана цилиндрическая линза. Были получены изображения лазерной плоскости на экране, расположенном на расстоянии  $L = 1100$  см от источника излучения и изображения лазерной плоскости после прохождения системы с цилиндром для различной ориентации лазерной плоскости в пространстве, относительно цилиндра.

Для системы, в которой отсутствовал цилиндр, и лазерная плоскость была направлена горизонтально, получилось изображение лазерной плоскости, представленное на рисунке 5.

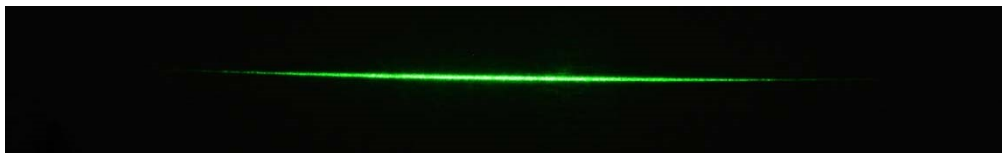


Рисунок 5 – Изображение лазерной плоскости при отсутствии цилиндра

Изображение лазерной плоскости после прохождения системы с цилиндром:



Рисунок 6 - Изображение лазерной плоскости в системе с цилиндром

Как можно заметить, цилиндр вносит искажения в итоговый вид лазерной плоскости. Лазерная плоскость после прохождения системы с цилиндром расширяется, а в местах, где находятся стенки цилиндра, наблюдаются существенные искажения от прямолинейного хода лучей.

Полученные изображения обрабатывались в среде MathCAD. Для обработки изображения в данной схеме эксперимента на экран была нанесена нормировочная линейка, а далее, в среде MathCAD значение в сантиметрах было сопоставлено количеству пикселей, чтобы проводить измерения в реальных величинах.

Строка для обработки изображения выбиралась по центру полученного распределения интенсивности на плоскости. Полученный массив сглаживался гауссовой функцией, наиболее подходящей к экспериментальному распределению.

Для данного эксперимента получены результаты, приведенные на рисунках 7 и 8 соответственно. Красной линией обозначены экспериментальные значения, синей – функция, наиболее соответствующая данному распределению. Размерности приведены в относительных единицах.

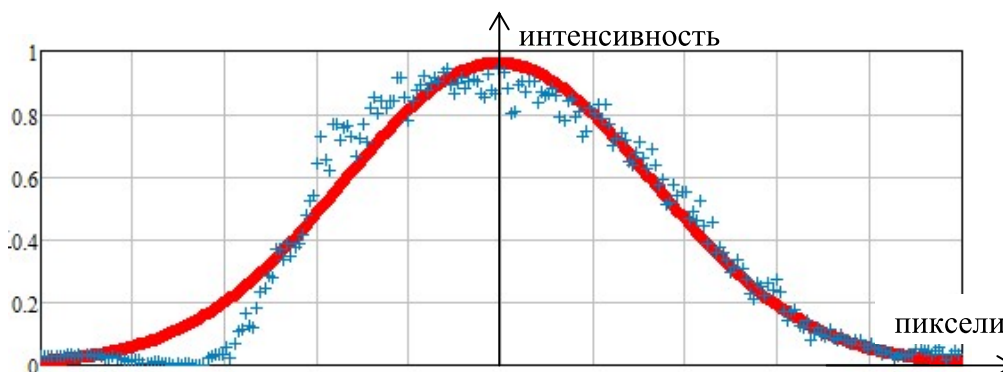


Рисунок 7 – Нормированное распределение интенсивности в системе при отсутствии цилиндра.



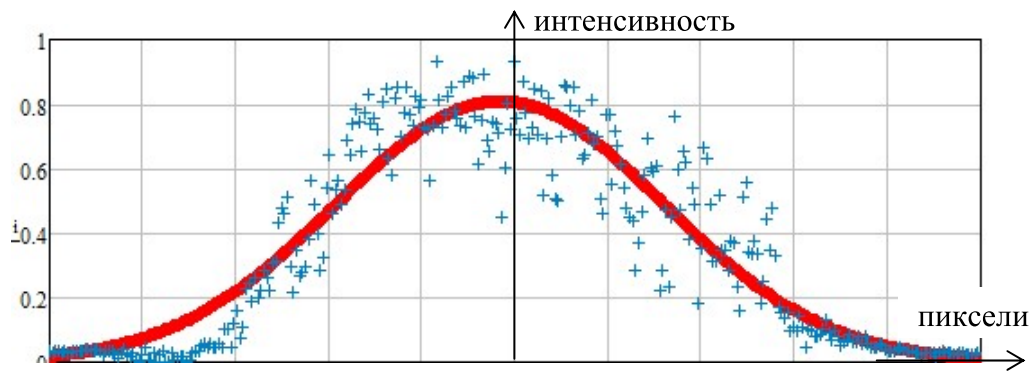


Рисунок 8 – Нормированное распределение интенсивности в системе с цилиндром.

Приведя в соответствие количество пикселей на 1 см, была найдена ширина плоскости по уровню  $1/e$ . Для исходной лазерной плоскости без искажений ширина по уровню  $1/e = 43,7$  см. Для плоскости после прохождения цилиндра ширина лазерной плоскости по уровню  $1/e = 52,9$  см.

Так же, необходимо было оценить искажение лазерной плоскости, в случае, когда она направлена под углом к горизонтали. Был проведен эксперимент с лазерной плоскостью, направленной под углом  $\alpha = 45^\circ$ . Для наглядности, результат искажения лазерной плоскости и исходный ход лучей приведены на одном изображении. Результат эксперимента приведен на рисунке 9.

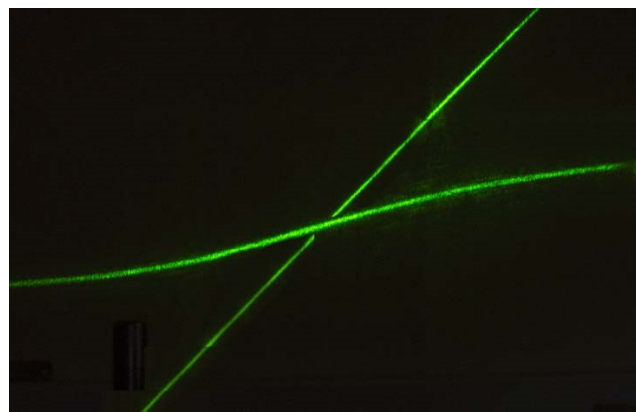


Рисунок 9 - Экспериментальная кривая для  $\alpha = 45^\circ$

На рисунке 9 видна разница между лазерной плоскостью, идущей под  $\alpha = 45^\circ$  в отсутствие цилиндра в системе и при прохождении через цилиндр. Ход лазерной плоскости после прохождения системы с цилиндром отклоняется от прямолинейного. Следовательно, вносимые искажения в ходе лазерной диагностики потоков в цилиндре необходимо учитывать.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было исследовано влияние полого стеклянного цилиндра на лазерную плоскость для различных случаев её распространения в пространстве.

По результатам расчёта и построению траекторий лучей лазерной плоскости можно сказать, что рассматриваемый стеклянный цилиндр при заданных параметрах является рассеивающей линзой. Лазерная плоскость, наблюдаемая на экране, расширилась после прохождения цилиндра.

Проведен эксперимент, численно подтверждающий теоретический расчет. Эксперимент проводился для лазерной плоскости, идущей горизонтально и под углом к

горизонтали. Результаты эксперимента были обработаны в среде MathCAD и сравнены с теоретическим расчетом.

По результатам расчёта и экспериментальному исследованию можно сказать, что ширина лазерной плоскости после прохождения системы увеличивается, а форма отличается от прямолинейной, следовательно, необходимо учитывать вносимые искажения в результаты измерений методом лазерной анемометрии. С помощью данного метода можно исследовать потоки жидкости и газа, распространяющиеся в трубах и при выполнении исследований учитывать влияние искажений цилиндром лазерной плоскости на результаты метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Markus Raffel, Christian E. Willert, Steve T. Wereley, Jürgen Kompenhans.** Particle Image Velocimetry, Springer, 2007
2. **Rye M. Waldman, Kenneth S. Breuer.** Accurate measurement of streamwise vortices using dual-plane PIV // Experiments in Fluids, 2012. Volume 53, Issue 5, pp 1487-1500.
3. **Sina Ghaemi, Daniele Ragni, Fulvio Scarano.** PIV-based pressure fluctuations in the turbulent boundary layer // Experiments in Fluids, 2012. Volume 53, Issue 5, pp 1487-1500.
4. **М.В. Алексеенко, А.В. Бильский, В.М. Дулин, Л.А. Козинкин, Д.М. Маркович, М.П. Токарев.** Диагностика струйных течений томографическим методом измерения скорости в объеме потока // Оптические методы исследования потоков: XII Межд. науч-технич. конференция [Электронный ресурс]: труды конференции. – Электрон. дан. – М.: МЭИ (ТУ), 2013. – 1 электрон. опт. Диск (CD-ROM). – Доклад №2\_3, 10 с.

D.A. Poyatsyka, O.A. Yevtikhieva

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

## INFLUENCE OF THE DISTORTION OF THE LASER PLANE ON THE PRECISION OF THE ANEMOMETRY ON PARTICLE IMAGES

In this work various cases of laser plane`s passing through the cylinder were described. Pictures revealing profile of the laser plane in approximation of geometrical optics due to computer modeling. The work provides offset ray analysis on screen during the laser plane`s passing in the cylinder. The experiment corresponding to theoretical calculation is made.

ANEMOMETRY ON PARTICLE IMAGES, LASER PLANE, COMPUTER SIMULATION