

*М. А. Воробьев<sup>1\*</sup>, С. В. Двойнишиников<sup>1</sup>, В. Г. Меледин<sup>1</sup>, В. В. Рахманов<sup>1</sup>*

## **Тестирование быстрого алгоритма для BOS метода с различными фоновыми паттернами**

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

**Аннотация.** Синтетический шлирен-метод, также известный как Background Oriented Schlieren (BOS) метод, используется для детального анализа структуры конвективных воздушных потоков. Точность метода позволяет разглядеть эффекты при перепадах температуры порядка одного градуса. Обычно, для анализа изображений используются кросс-корреляционные алгоритмы. Но такой способ расчета весьма ресурсозатратен. Для обработки данных в реальном времени был разработан альтернативный, более простой алгоритм. Работа алгоритма протестирована на различных фоновых паттернах.

**Ключевые слова:** синтетический шлирен метод, свободная конвекция, фоновые паттерны

*М. А. Vorobyev<sup>1\*</sup>, S. V. Dvoynishnikov<sup>1</sup>, V. G. Meledin<sup>1</sup>, V. V. Rakhmanov<sup>1</sup>*

## **Testing a fast algorithm for the BOS method with various background patterns**

<sup>1</sup> Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

**Abstract.** The synthetic schlieren method, also known as the Background Oriented Schlieren (BOS) method, is used for detailed analysis of the structure of convective air flows. The accuracy of the method allows one to discern effects with temperature changes of the order of one degree. Typically, cross-correlation algorithms are used for image analysis. But this method of calculation is very resource-intensive. To process data in real time, an alternative, simpler processing algorithm has been developed. The operation of the algorithm has been tested on various background patterns.

**Keywords:** background oriented schlieren technique, natural convection, background patterns

### ***Введение***

Синтетический шлирен-метод, также известный как Background Oriented Schlieren (BOS) метод, применяется для визуализации неоднородностей коэффициента преломления в исследуемом объеме сплошной среды. Подобные неоднородности локального коэффициента преломления возникают при изменении плотности среды, например, в результате движения звуковых или ударных волн [1], в случае температурных градиентов [2,3] или градиентов концентрации [4] в жидкости или газе, при механических напряжениях в твердых телах [5]. Также данный метод адаптирован для измерения деформаций толщин тонких пленок жидкости [6,7].

Принцип работы метода состоит в следующем – камера фокусируется на экране с некоторым рисунком. Экран освещается ярким источником света. Между камерой и экраном расположен исследуемый объект, например, нагретое тело, возбуждающее конвективные воздушные потоки. Плотность газа  $\rho$  связана линейно с показателем преломления  $n$  через уравнение Гладстона – Дейла:  $n - 1 = k\rho$ , где  $k \approx 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$  – коэффициент Гладстона – Дейла [3]. Таким образом, градиенты плотности вызывают градиенты показателя преломления. Световые лучи, проходящие через тестовую область, отклоняются в той же степени, что позволяет плотностный градиент. Считается, что углы отклонения лучей света достаточно малы, чтобы можно было считать тангенс угла отклонения луча равным самому углу отклонения. Таким образом, изображения фона, снятые камерой, при наличии возмущения на оптическом пути будут отличаться от опорных изображений фонового рисунка, полученных при однородном оптическом пути. Исходя из сравнения текущего и опорного изображения могут быть рассчитаны величины виртуального смещения пикселей фонового изображения  $\Delta y$ . Согласно работе [3] связь между  $\Delta y$  и локальным коэффициентом преломления  $n$  в исследуемой зоне можно оценить как:

$$\Delta y = 2Z_D \frac{fZ_B}{Z_{B-f}} \left( \frac{n}{n_0} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние объектива камеры,  $n_0$  – коэффициент преломления невозмущенной среды,  $Z_B$  – расстояние между камерой и экраном,  $Z_D$  – расстояние между экраном и исследуемым объектом.

Для обработки изображений, как правило, используется кросс-корреляционный метод, аналогичный методу, применяемому в PIV (particle image velocimetry) [8,9]. В случае использования периодических фоновых паттернов возможно появление неоднозначности при обработке изображений кросс-корреляционными методами, если на изображении наблюдаются смещения относительно опорного, превышающие половину периода шаблона. Обработка изображений высокого разрешения кросс-корреляционным алгоритмом представляется ресурсоемкой задачей, что затрудняет применение этого метода для анализа данных в реальном времени. В настоящей работе предлагается алгоритм анализа BOS изображений, позволяющий существенно сократить время обработки. Цель работы – определить геометрические параметры (величины  $Z_B$  и  $Z_D$ ) эксперимента и характеристики фонового изображения, максимизирующие чувствительность алгоритма обработки.

### ***Методы и материалы***

Схема эксперимента представлена на рис. 1. В эксперименте использовалась камера DMK 33GX264 33G Series с максимумом спектральной чувствительности, соответствующим красному свету. Фокусное расстояние объектива 50 мм. Фон освещался красными светодиодными матрицами. Пространство между ка-

мерой и фоном было закрыто черной полиэтиленовой пленкой, предотвращающей проникновение в чувствительную область паразитных конвективных потоков, а также засветку фонового экрана внешними источниками света.

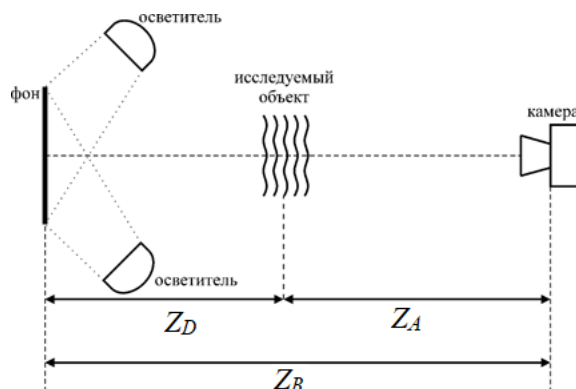


Рис. 1. Схема эксперимента

В качестве фоновых паттернов использовались изображения, представленные на рис. 2 – квадратная сетка (шаг 1 и 2 мм), черные и белые квадраты (размером 1 и 2 мм), расположенные в шахматном порядке, черные и белые квадраты в случайном порядке (0,2, 0,5, 1 мм). В качестве исследуемого объекта использовался патронный ТЭН внутренним сопротивлением 150 Ом, температура которого поддерживалась равной 40°C, температура окружающего воздуха была равна 23,1°C.

Полученные изображения обрабатывались при помощи алгоритма, написанного в среде MatLab. На опорном и текущем изображениях в соответствующих положениях выделяется квадратная область (окно опроса) заданного размера ( $N \times N$ ). Значения в окнах запроса опорного и текущего изображений приводились к разнице значений яркости самого светлого и самого темного пикселей этих окон. Далее формируется матрица такого же размера  $Diff$ , содержащая в каждой ячейке разность полученных ранее матриц. Итоговое изображение (разрешением в  $N$  раз меньше исходного) в соответствующей точке формируется, как разность значений яркости самого светлого и самого темного пикселей матрицы  $Diff$ .

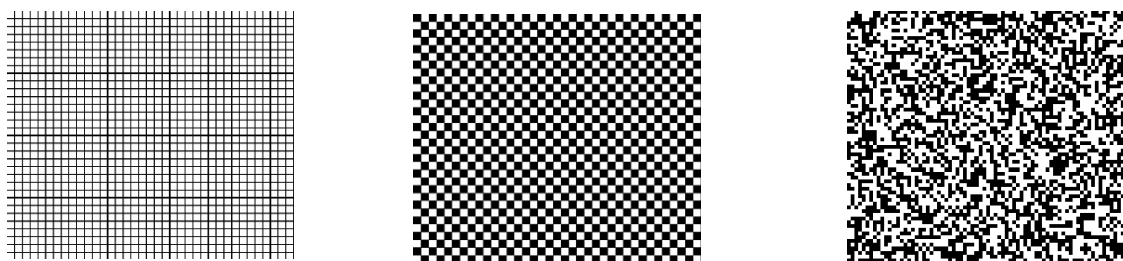


Рис. 2. Варианты фоновых изображений

## Результаты

Согласно работе [3], для повышения чувствительности измерительной системы необходимо минимизировать расстояние между камерой и исследуемым объектом. Но, так как камера сфокусирована на экране, исследуемый объект будет расфокусирован. Для получения четкого изображения диафрагма должна быть максимально закрыта – для увеличения глубины фокуса. Увеличение  $Z_B$ , с одной стороны, приводит к росту смещения пикселей фонового изображения  $\Delta u$ , что повышает чувствительность, а с другой уменьшает телесный угол, под которым виден фон, и, соответственно, уменьшает разрешение итогового изображения. В данной работе расстояние между камерой и экраном  $Z_B$  варьировалось в диапазоне от 2,4 до 3,5 м, а  $Z_D$  от 1,2 до 1,8 м. На рис. 3 представлены изображения, полученные для некоторых режимов. Наилучшие результаты наблюдались при  $Z_B = 2,9$  м,  $Z_D = 1,5$  м (рис. 3 б).

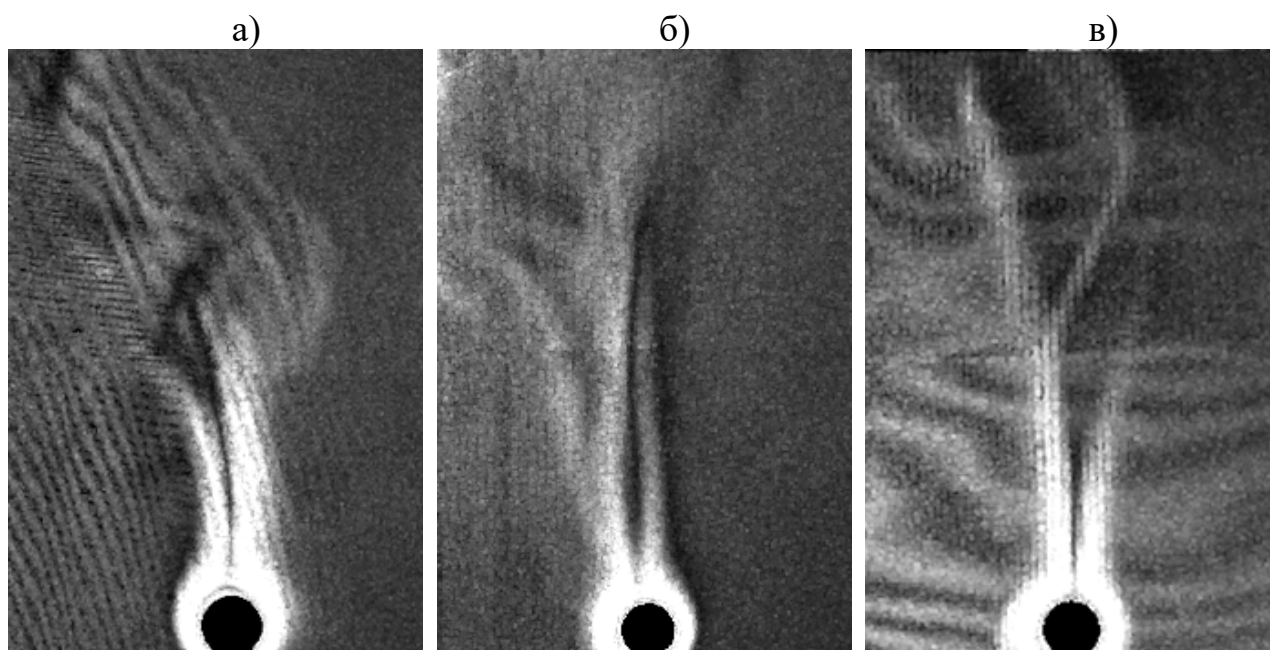


Рис. 3. Обработанные шпирен фотографии: а)  $Z_B = 2,4$  м,  $Z_D = 1,2$  м; б)  $Z_B = 2,9$  м,  $Z_D = 1,5$  м; в)  $Z_B = 3,5$  м,  $Z_D = 1,8$  м

Изображения конвективных потоков, полученные с использованием различных фонов, представлены на рис. 4. Использование сетки или «шахматного» фона, как видно на рис. 4 а, б, в приводит к появлению периодических полос на итоговых изображениях. Интересно, что при измерениях на случайном паттерне использование изображений с размером «пикселя» 1 и 0,2 мм (рис. 4 г, д), так же приводит к появлению артефактов характерных для периодических фонов. Наиболее чистое изображение получено при использовании случайного паттерна с размером «пикселя» 0,5 мм (рис. 4 е).

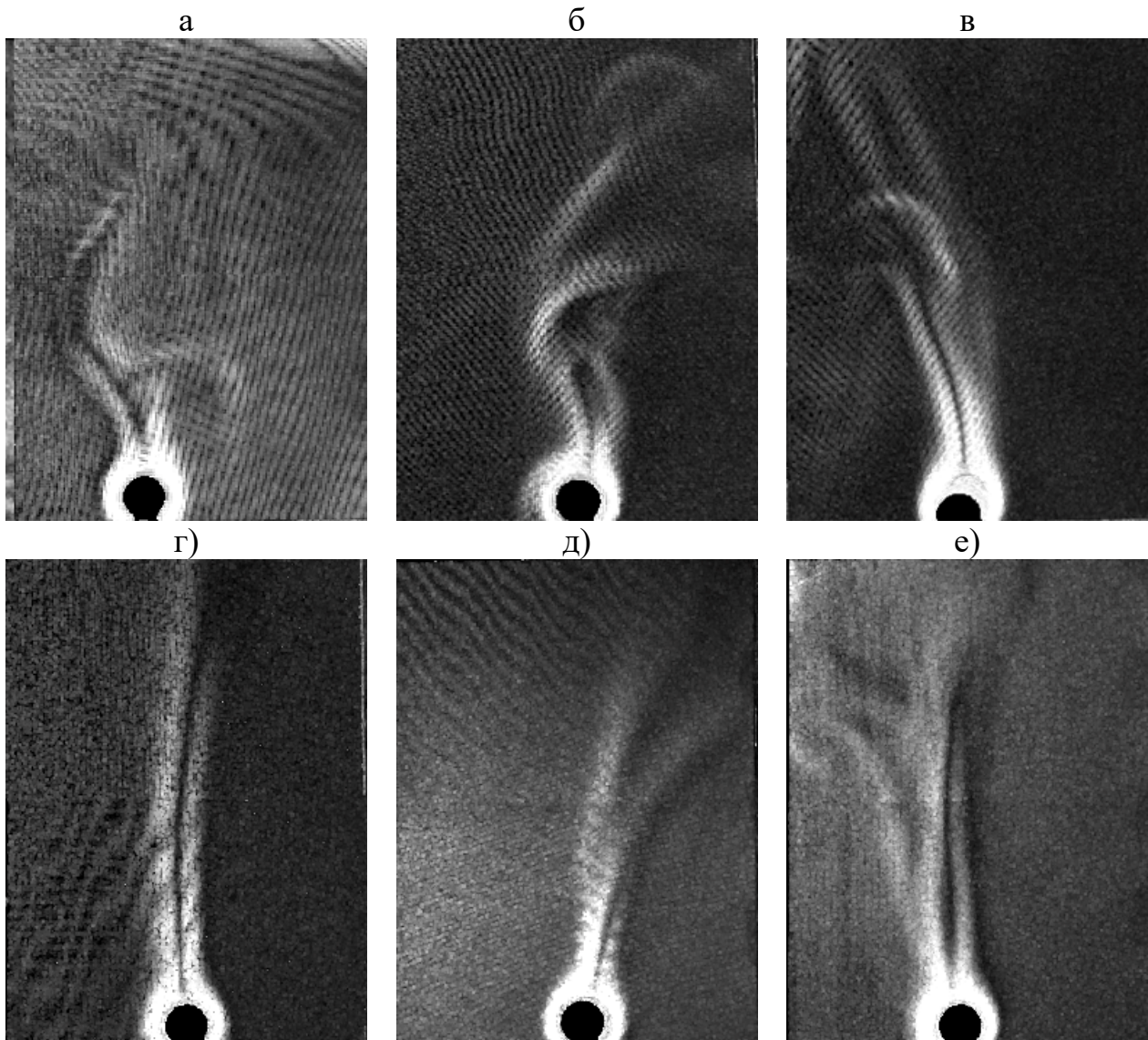


Рис. 4. Шлирен фотографии, полученные при использовании различных фонов:  
 а) сетка шагом 2 мм; б) шахматы шагом 2 мм; в) шахматы шагом 1 мм;  
 г) случайный паттерн 1 мм; д) случайный паттерн 0,2 мм; е) случайный  
 паттерн 0,5 мм

### *Заключение*

Преимущество синтетического шлирен-метода заключается в возможности бесконтактного измерения градиентов плотности. Этот метод дает качественные результаты только в виде двумерной проекции за счет интегрирования по лучу зрения. Простота установки, практически неограниченный размер поля измерения и относительная простота измерений являются существенными преимуществами метода. В этой статье представлена установка BOS и алгоритм обработки изображений, позволяющие визуализировать небольшие градиенты температуры, возникающие в результате естественной конвекции воздуха над нагретым телом. Эти градиенты плотности в прозрачных средах можно визуализировать с помощью лишь небольшого количества инструментов.

## *Благодарности*

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания для Института теплофизики им. Кутателадзе Сибирского отделения РАН.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Glazyrin F.N., Znamenskaya I.A., Mursenkova I. V., Sysoev N.N., Jin J. Study of shock-wave flows in the channel by schlieren and background oriented schlieren methods // *Optoelectron. Instrum. Data Process.* – 2012. – Vol.48. – P. 303–310.
2. Cozzi F., Colombo L. P. M., Lucchini A., Coghe A., Muzzio A., Pacini F. Background oriented schlieren characterization of the thermal boundary layer over a vertical heated plate in free convection // XVIII AIVELA Natl. Meet – 2010. – Vol.6.
3. Becher L., Voelker C., Rodehorst V., Kuhne M. Background-oriented schlieren technique for two-dimensional visualization of convective indoor air flows // *Opt. Lasers Eng.* – 2020. – Vol.134. – No. 106282.
4. Kotchourko N., Kuznetsov M., Kotchourko A., Grune J., Lelyakin A., Jordan T. Concentration measurements in a round hydrogen jet using Background Oriented Schlieren (BOS) technique // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2014. – Vol.39. – P. 6201–6209.
5. Toya K., Ohno H., Measurement method for axisymmetric 3D stress-tensor fields using background-oriented schlieren // *Mech. Eng. J.* – 2019. – Vol.6. – P. 19–00393.
6. Kochkin D., Mungalov A., Zaitsev D., Kabov O. Use of the reflective background oriented schlieren technique to measure free surface deformations in a thin liquid layer non-uniformly heated from below // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2022. – Vol.133. – P. 110576.
7. Vinnichenko N.A., Pushtaev A. V., Plaksina Y.Y., Uvarov A. V. Measurements of liquid surface relief with moon-glade background oriented Schlieren technique // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2020. – Vol.114. – P. 110051.
8. Vinnichenko N.A., Pushtaev A. V., Plaksina Y.Y., Uvarov A. V. Performance of Background Oriented Schlieren with different background patterns and image processing techniques // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2023. – Vol.147. – P. 110934.
9. Richard H., Raffel M. Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method // *Meas. Sci. Technol.* – 2001. – Vol.12. – P. 1576–1585.

© М. А. Воробьев, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, В. В. Рахманов, 2024