

# Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки

И.А. Знаменская<sup>1</sup>, Е.Ю. Коротеева<sup>2</sup>, Ф.Н. Глазырин<sup>3</sup>

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Российская Федерация

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6362-9496, [znamen@phys.msu.ru](mailto:znamen@phys.msu.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1705-5142

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0003-0208-0414

## Аннотация

Рассмотрены примеры применения кросс-корреляционных алгоритмов для анализа изображений высокоскоростных газоплазменных и жидких потоков. Исследовались поля плотности прозрачных сред (теневой фоновый метод) и поля **скоростей** газоплазменных и жидких потоков, полученные с использованием как засеваемого, так и беззасеваемого трассирования. Показано, что, несмотря на различие физических принципов регистрации, могут быть использованы аналогичные методы обработки. Рассмотрены проблемы, связанные с регистрацией параметров в области ударных и взрывных волн.

**Ключевые слова:** кросс-корреляционный алгоритм, теневой фоновый метод, цифровая трассерная анемометрия, тепловые точки, беззасеваемое трассирование.

## 1. Введение

Развитие цифровых методов хранения и обработки данных и, позднее, цифровой фото-видео регистрации за последние десятилетия существенно расширило возможности оптических методов визуализации потоков, сделало их более удобными для экспериментального использования и сравнения с результатами численного моделирования. Применение автоматизированной цифровой обработки к результатам экспериментов в настоящее время позволяет существенно увеличить и качество, и количество получаемых данных об изучаемых физических явлениях. Методы визуализации течений газа, жидкости, плазмы, а также многофазных сред описывались в большом количестве монографий, обзоров и статей. Издан ряд альбомов и монографий по визуализации течений, включающих в том числе изображения, полученные на основе методов трассирования и зондирования

потоков [1-3]. Физические основы методов мало меняются; в них используются преимущественно свойства света - рефракция, рассеяние, поглощение - и такие явления, как интерференция, дифракция, флюоресценция. Однако методы научной визуализации за последнее десятилетие получили мощнейший толчок в связи с цифровой революцией, которая привела к многократному увеличению количества исследований и объема собранных данных в области динамики течений.

В ряде случаев традиционные качественные методы визуализации приобрели количественное измерение. Методы, использующие цифровую обработку больших массивов данных визуализации потоков, могут кардинально отличаться от исходных, даже будучи основанными на хорошо известных физических принципах. В случае с теневым фоновым методом (ТФМ) и цифровой трассерной анемометрией (ЦТА-PIV) исходными можно назвать шпирен-

метод Тёплера и классическую трассерную визуализацию соответственно. Эти методы объединяет сходный алгоритм цифровой обработки полученных экспериментальных изображений потоков – кросс-корреляционный анализ.

## **2. Области применения кросс-корреляционной обработки в эксперименте.**

В физике и механике жидкости, газа и плазмы цифровые технологии дали возможность получения количественной информации о параметрах потока через компьютерную обработку цифровых изображений. Один из главных инструментов цифровой обработки изображений сегодня – кросс-корреляционный алгоритм. На начальном этапе он использовался преимущественно для анализа полей скоростей в методе трассирования с засевом частиц (цифровая трассерная анемометрия, *particle image velocimetry* или просто PIV). Сегодня можно назвать ряд панорамных методов исследования потоков, где кросс-корреляционный алгоритм обработки является основным: теневой фоновый метод (ТФМ), беззасевные теневые методы [4], термографическое PIV [5], измерение приповерхностного поля скорости в вязких покрытиях, микро, стерео, томографические модификации PIV [6], анемометрия по шпирен-изображениям [7] и др. В работе [8] предложено использование фонового изображения из цветных точек, с последующим разложением его на цветовые каналы и отдельной кросс-корреляционной обработкой. Таким образом, достигается увеличение плотности данных ТФМ при неизменной геометрии схемы, повышение точности результирующих усреднённых данных и снижение шума.

Первоначально для определения смещений частиц в засеянном потоке жидкости или газа широко использовался базовый кросс-корреляционный алгоритм, который в дальнейшем был

назван стандартным. Стандартный алгоритм состоит из следующих основных операций:

а) разбиение пары изображений на элементарные расчетные области равного размера;

б) расчет кросс-корреляционной функции;

в) нахождение максимума на корреляционной функции;

г) подпиксельная интерполяция максимума корреляционной функции (используется преимущественно при исследованиях несжимаемой жидкости).

Сегодня разработано множество коммерческих и специальных алгоритмов, универсальных или адаптированных к конкретным течениям. В настоящей работе обсуждается применение кросс-корреляционных алгоритмов для анализа высокоскоростных газоплазменных и жидких потоков на основе трех физических методов визуализации полей физических параметров.

Исследовались:

1) поля плотности в жидких и газоплазменных потоках (теневой фоновый метод, ТФМ)

2) векторные поля скорости в газоплазменных потоках (цифровое трассирование, PIV).

3) векторные поля скорости пограничного слоя жидкости (беззасевная термография).

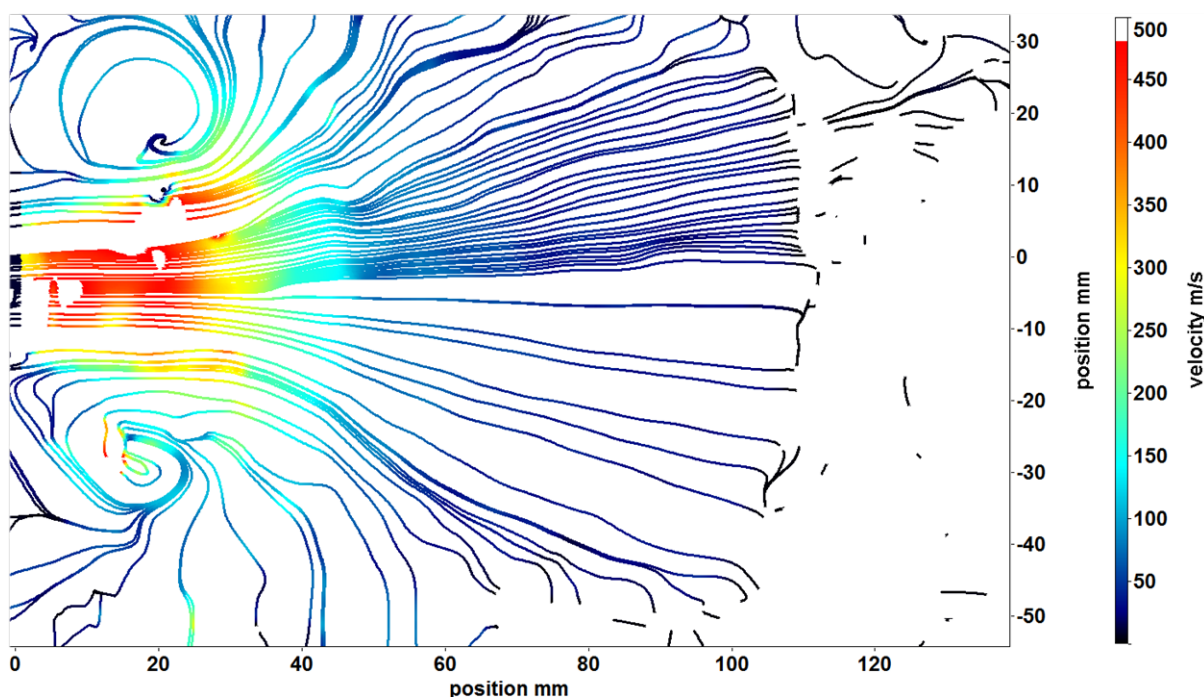
Во всех случаях использован метод кросс-корреляции, базово реализованный в программном обеспечении DaVis фирмы LaVision. При схожем алгоритме обработки – определение смещения характерных элементов на изображении – физические принципы регистрации физических полей различны.

В первом случае – при визуализации полей показателя преломления прозрачной неоднородной среды – определяются смещения разделенных в пространстве изображений точек фона, помещенного за исследуемым объектом. Смещение точек на изображении фона происходит за счет отклонения света при прохождении через неоднородности плотности среды. В основе визуализации оптической неоднородности ле-

жит физическое явление рефракции света.

Во втором случае – при измерении мгновенных полей скорости среды в сечении потока (например, лазерным листом) - регистрируются разделенные во времени изображения трассеров, зафиксированные с малой экспозицией (равной, как правило, времени подсветки лазерным листом). Регистрируя с интервалом  $\delta t$  движение трассирующих частиц в потоке, можно получить изображения отрезков пути  $\delta s$ , пройденные частицами за  $\delta t$ . Величина  $v = \delta s / \delta t$  представляет собой среднюю скорость частицы на этом отрезке. Визуализация трассеров в классическом методе PIV происходит за счет рассеяния лазерного излучения на трассере.

При интегральной регистрации следа частицы в газе программа обработки данных метода цифрового трассирования позволяет визуализировать и наблюдать траектории частиц, поля завихренности, поля скоростей в векторном и скалярном представлении. На рис. 1 представлено изображение линий тока частиц, совмещенное с полем мгновенных скоростей, обозначенных цветом; приведена соответствующая шкала. Визуализирована область нестационарного течения на выходе из прямоугольного канала ударной трубы. Правая граница линий траекторий частиц соответствует положения фронта ударной волны, скорость потока за ним порядка 50 м/с. На сверхзвуковом участке струи скорость газа достигает 400-450 м/с.



**Рис. 1.** Скалярное представление результатов цифрового трассирования.

В третьем случае - при визуализации полей скоростей пограничного слоя жидкости - определяются смещения температурных неоднородностей на тепловизионном изображении течения воды.

### 3. Коррекция результатов

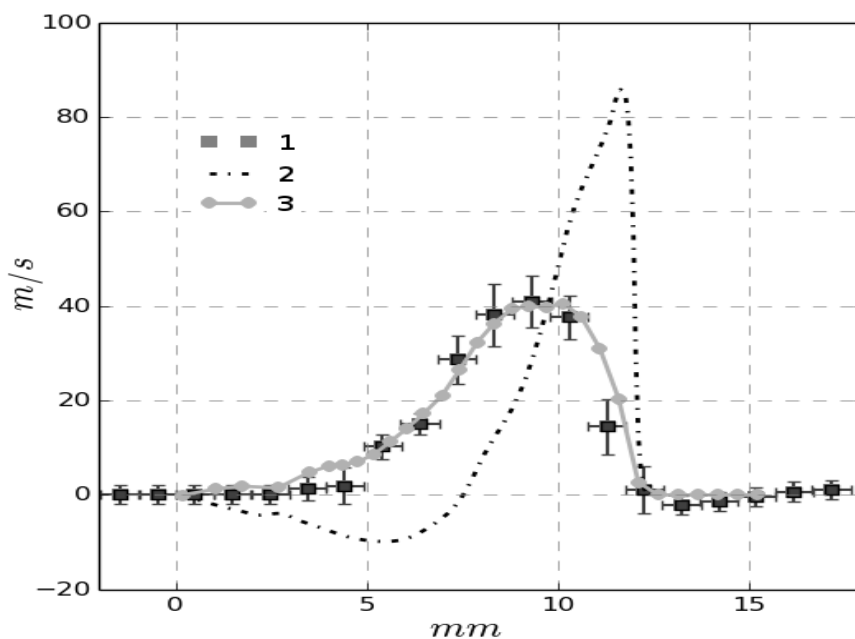
Особую сложность представляет использование кросс-корреляционного алгоритма анализа данных в высокоскоростных газоплазменных течениях с ударными волнами - вследствие скачкообразного изменения параметров

(плотности и скорости) на фронте разрыва. Так, обнаружены значительные погрешности при использовании классической схемы ТФМ для количественного определения скачка плотности на фронте ударной волны [9]. Это обусловлено выходом детектируемой величины рефракции за рамки чувствительности метода — из-за сильного преломления света на фронте ударной волны отклоненный луч может выйти за пределы оптической схемы и не быть зарегистрированным [10].

Несмотря на то, что в последние годы метод PIV все более активно применяется для визуализации транс- и даже сверхзвуковых течений [11], наблюдение нестационарных потоков с сильными разрывами этим методом по-прежнему затруднено. Необходимо, чтобы трассирующие частицы следовали движению частиц газа, являясь элементом сплошной среды. Из-за запаздывания частиц, немгновенного характера измерений в методе PIV, влияния алгоритмов цифровой обработки и т.д., данные PIV в таких течениях могут существенно отличаться от истинных. Основной причиной расхождения результатов PIV и реальной скорости потоков является

инерционное запаздывание трассирующих частиц. Трассирующие частицы, жидкие или твердые, никогда не следуют потоку абсолютно точно. Сила вязкого трения, действующая на частицы со стороны газа, стремится уравнять их скорость со скоростью потока, ускоряя или замедляя их в зависимости от их относительной скорости. В результате количественное значение скачка скорости оказывается заниженным, а сам фронт существенно «размывается» [12].

В то же время оказывается возможным восстановить исходное течение с помощью численного моделирования на основе уравнений газодинамики. В этом случае моделируется динамика трассирующих частиц в рассчитанном поле течения [13]. Если предположить, что численное моделирование на основе уравнений газодинамики (CFD) точно предсказывает фактическую скорость потока, мы можем количественно оценить ошибку данных PIV. На рис. 2 приведено сравнение экспериментального профиля скорости на фронте взрывной волны от импульсного цилиндрического разряда с расчетом на основе численного моделирования.



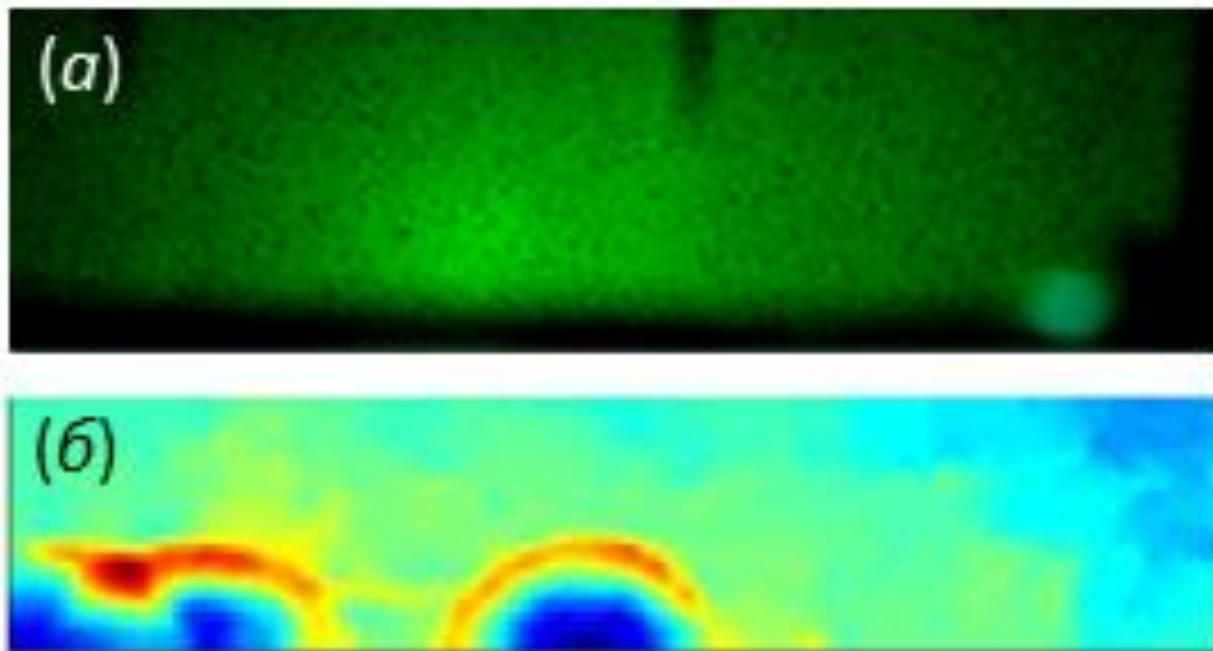
**Рис. 2.** Учет погрешности экспериментальных данных на основе численного моделирования: 1 – экспериментальный профиль (PIV); 2 – результат CFD моделирования; 3 – профиль «виртуальных» трассирующих частиц в рассчитанном поле течения.

#### 4. Кросс-корреляционный анализ газоплазменного течения с разрывами

Применение PIV к газоплазменным течениям связано дополнительными сложностями – взаимодействием вещества трассеров с плазмой, влиянием свечения разряда на экспериментальные изображения. Однако при этом наиболее распространённые типы разрядов (диэлектрический барьерный, коронный, тлеющий и др.) создают сравнительно малоэнергетические течения газа, скорости которых не превышают нескольких десятков м/с. В работе [14] с помощью цифровой трассерной анемометрии получены данные об усреднённых полях скоростей собственного течения, создаваемого высокочастотным диэлектрическим барьерным разрядом, функционирующим в контрагированной (шнуровой) форме. Течения, создаваемые сильноточными разрядами (ис-

кровой, дуговой, оптический), осложнены дополнительно большими величинами скоростей газа и присутствием ударных волн [15].

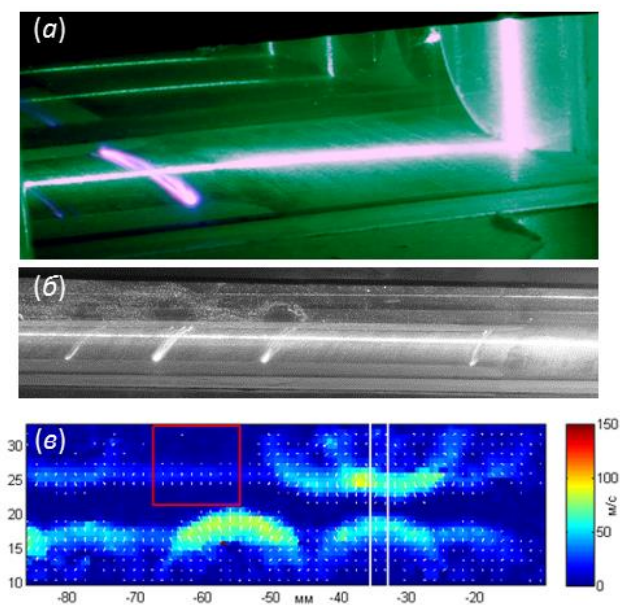
На рис. 3 и 4 приведены результаты экспериментов по исследованиям полей плотности и скорости в нестационарном разрывном газоплазменном течении, возникающем при инициировании наносекундного поверхностного скользящего разряда (плазменного листа) в канале ударной трубы. Разряды площадью  $100 \times 30$  мм<sup>2</sup> поджигались одновременно на верхней и нижней стенках канала. На рис. 3 представлены результаты, полученные на основе теневого фонового метода. На рис. 3(а) – исходный снимок разрядной области с фоном, репером и свечением яркого канала разряда. На рис. 3(б) – результат кросс-корреляционной обработки – поле плотности. Наличие разрывов приводит к большой погрешности измерений [9]. Структура течения отражена достаточно правильно.



**Рис. 3.** Теневого фонового метод. Исходный снимок (а) и результат обработки (б) поля течения, индуцированного импульсными поверхностными разрядами.



На рис. 4 приведено поле того же течения, но полученное на основе метода цифрового трассирования (PIV). На рис. 4(а) – исходное изображение без засева, демонстрирующее область пересечения области поверхностного разряда с лазерным листом. На рис. 4(б) – мгновенное изображение поля течения после разряда с засевом. Видно сгущение трассеров за фронтом взрывной волны и их практическое отсутствие в области разрежения. На рис. 4(в) – результат кросс-корреляционной обработки пары изображений потока - поле скоростей через 21 мкс после разряда.



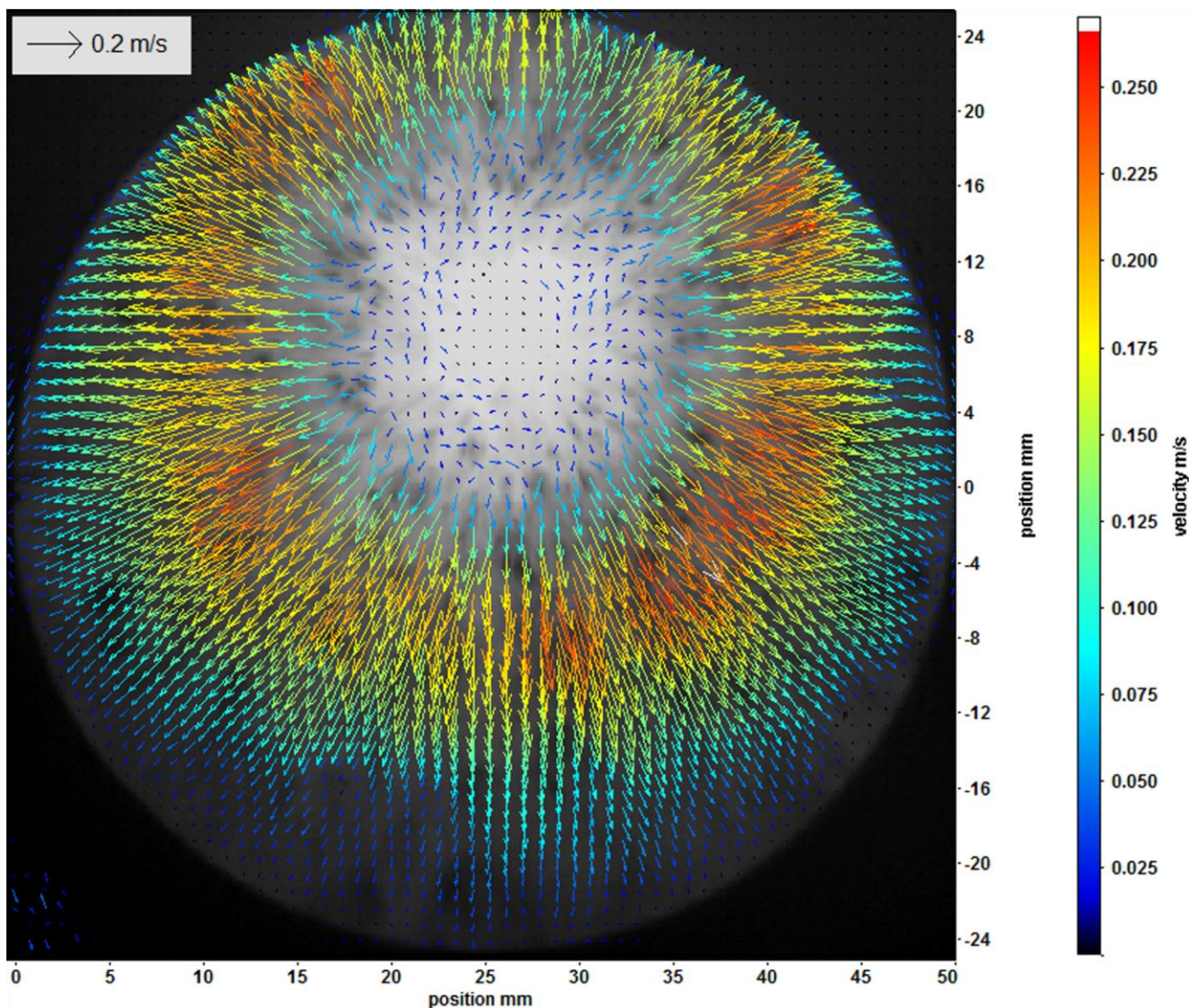
**Рис. 4.** Метод цифрового трассирования. Вид области регистрации (а-б) и результат обработки (в) поля течения через 21 мкс после инициирования импульсных поверхностных разрядов.

Несмотря на сходство алгоритмов обработки, применяемых в ТФМ и PIV, различие физических принципов формирования изображения обуславливают иную, нежели для PIV, зависимость чувствительности, точности и пространственного разрешения метода [16].

## 5. Беззасевные методы трассирования

В последние годы благодаря распространению кросс-корреляционных алгоритмов обработки изображений появилось значительное количество работ по использованию беззасевого трассирования – слежение за неоднородностями, структурными элементами, маркерами, присутствующими в самом потоке.

Одним из таких методов является предложенный авторами метод трассирования тепловыми точками (ТТТ), основанный на термографической визуализации пограничного слоя жидкости. Программой кросс-корреляции измеряется смещение точек равной температуры (в градациях серого) на двух соседних термограммах. На рис. 5 приведено усредненное по 100 кадрам поле скоростей потока в пограничном слое воды на основе нового метода ТТТ [17]. Использовалась высокоскоростная съемка тепловизором импактной затопленной неизотермической струи через окно, прозрачное для инфракрасного излучения.



**Рис. 5.** Метод беззасевого трассирования тепловыми точками. Поле скоростей в пограничное импактной затопленной струи.

## 6. Заключение

В статье проанализирован опыт применения схожих подходов к анализу изображений высокоскоростных газоплазменных и жидких потоков на основе использования аналогичных кросс-корреляционных алгоритмов. Рассмотрены три метода, основанные на использовании различных физических явлений – рефракции (теневого фоновый), рассеянии света на трассерах (метод PIV) и слежении за тепловыми точками при регистрации теплового излучения неизотермического турбулентного потока (новый метод – трассирование тепловыми точками). Исследовались, соответственно, поля плотности про-

зрачных сред и поля **скоростей** в объеме и в пограничном слое. Показано, что использование кросс-корреляционных алгоритмов при анализе больших объемов экспериментальных данных изображений высокоскоростных потоков дает хорошие результаты, в том числе и в течениях с разрывами. Рассмотрены проблемы, связанные с регистрацией параметров в области ударных и взрывных волн в сверхзвуковых течениях.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № [18-19-00672](#).

## Список литературы

1. Ван-Дайк. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 181 с.
2. Альбом сверхзвуковых течений / сост. и ред. П. И. Ковалев, Н. П. Менде. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 251 с.
3. Merzkirch, W. Flow visualization. New York: Academic Press. 1987. 266 p.
4. Goldhahn E., Alhaj O., Herbst F., Seume J. Quantitative Measurements of Three-Dimensional Density Fields Using the Background Oriented Schlieren Technique. In: Imaging Measurement Methods for Flow Analysis. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol 106. 2009. pp. 135-144.
5. Charogiannis, I. Zadrazil, and C. N. Markides, Thermographic particle velocimetry (TPV) for simultaneous interfacial temperature and velocity measurements. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. Vol. 97. pp. 589-595.
6. R.J. Adrian. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1991. Vol. 23 (1). pp. 261-304.
7. S. Biswas and L. Qiao. A comprehensive statistical investigation of schlieren image velocimetry (SIV) using high-velocity helium jet. *Exp Fluids*. 2017. Vol. 58, no. 3. p. 18.
8. F. Sourgen, F. Leopold, D. Klatt. Reconstruction of the density field using the Colored Background Oriented Schlieren Technique (CBOS). *Opt. Lasers Eng.* 2012. Vol. 50, no. 1, p. 29-38.
9. Ф. Глазырин, И. Знаменская, Е. Коротева, И. Мурсенкова, Н. Сысоев. Использование теневого фонового метода для исследования нестационарного потока с ударной волной. *Научная визуализация*. 2013. Т. 5(3). С. 65-74.
10. Ф.Н. Глазырин и др. Исследования ударно-волнового течения в канале теньевым и теньевым фоновым методами. *Автоматрия*. 2012. Т. 48 (3). С. 101-110.
11. Бойко В.М., Запрягаев В.И., Пивоваров А.А., Поплавский С.В. Коррекция данных PIV для восстановления скорости газа в сверхзвуковой недорасширенной струе. *Физика горения и взрыва*. 2015. Т.51, No.5. с. 87-97.
12. F. N. Glazyrin, I. V. Mursenkova, I. A. Znamenskaya. PIV tracer behavior on propagating shock fronts. *Meas. Sci. Technol.* 2016. V. 27(1). 015302.
13. Koroteeva E., Mursenkova I., Liao Y., and Znamenskaya I. Simulating particle inertia for velocimetry measurements of a flow behind an expanding shock wave. *Physics of Fluids*. 2018. V. 30. 011702.
14. Moralev, S. Boytsov, P. Kazansky, V. Bityurin. Gas-dynamic disturbances created by surface dielectric barrier discharge in the constricted mode. *Exp. Fluids*. 2014. Vol. 55, no 5: 1747.
15. B. DeBlauw, B. Sanders, N. Glumac, C. Dutton, G. Elliott. Correlation Between Emission, Electric, and Flow Properties of Arc-Filament Plasma Actuators. *AIAA J.* 2013. Vol. 51, no. 4. pp. 922-935.
16. Н.М. Скорнякова, Д.Г. Сычев, А.Ю. Вараксин, М.Э. Ромаш. Визуализация вихревых структур методом анемометрии по изображениям частиц. *Научная Визуализация*. 2015. Т. 7, № 3. С. 15-24.
17. E. Koroteeva, I. Znamenskaya, P. Ryzanov, and A. Novinskaya. Velocimetry of water boundary layer flows by thermal imaging. In *Proceedings of 11 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11)*. 2017. ID 087.