

УДК 533.6.011.72

Н.А. Винниченко, И.А. Знаменская, И.В. Мурсенкова, Ц. Цзинь

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
Россия,

119991 Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2; E-mail: murs_i@physics.msu.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕНЕВЫМ И ТЕНЕВЫМ ФОНОВЫМ МЕТОДОМ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ТЕЧЕНИЯ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ

Представлены результаты экспериментального исследования теневым и теневым фоновым методом (ТФМ) области потока в канале ударной трубы после инициирования скользящего поверхностного разряда (плазменного листа) и объемного разряда наносекундной длительности в разрядной камере. Одновременная регистрация поля течения двумя методами дает возможность полного качественного и количественного описания ударно-волновых процессов, являющихся результатом взаимодействия импульсного разряда с высокоскоростным течением. Векторное поле смещений ТФМ определялось кросскорреляционным методом. Поле плотности получалось из решения уравнения Пуассона со специальными граничными условиями. Показано, что ТФМ дает хорошее качественное отображение структуры течения, соответствующее классическому теневому методу, и обеспечивает достоверные количественные результаты для ударных волн, распространяющихся в области инициирования разрядов.

ТЕНЕВОЙ МЕТОД, ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД, УДАРНАЯ ТРУБА, ИМПУЛЬСНЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ СКОЛЬЗЯЩИЙ РАЗРЯД, ИМПУЛЬСНЫЙ ОБЪЕМНЫЙ РАЗРЯД, УДАРНО-ВОЛНОВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач аэродинамики является исследование возможностей управления высокоскоростными газодинамическими потоками на основе плазменных технологий [1, 2]. При взаимодействии ударных волн и высокоскоростных потоков с плазмой электрических разрядов малой длительности происходит преимущественно ударно-волновое воздействие разряда на поток. Импульсный разряд длительностью менее 1 мкс приводит к образованию ударных волн, распространяющихся от области разряда, вследствие распада разрыва на границе газ-плазма [3, 4]. Целью данной работы было исследование структуры течения в канале ударной трубы после инициирования импульсных разрядов наносекундной длительности – поверхностного распределенного скользящего разряда (плазменного листа) и объемного разряда, и процесса взаимодействия плоской ударной волны с разрядной областью.

При исследовании быстропротекающих процессов в потоках газа и плазмы предпочтительны бесконтактные оптические методы, такие как классический теневой метод и сравнительно новый теневой фоновый метод (ТФМ) [5, 6]. ТФМ нашел применение при изучении процессов теплообмена в оптически прозрачных средах, при исследовании турбулентных течений, конвективных потоков [5 – 7], распространении звуковых и ударных волн [8]. Он дает возможность получения не только качественной картины течения, но и количественного определения поля плотности при достаточной простоте оптической схемы, оптимизированных условиях эксперимента и использовании соответствующей

математической обработки полученных изображений. В данной работе поле течения одновременно регистрировалось теневым и теневым фоновым методом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования взаимодействия импульсных разрядов субнаносекундной длительности и сверхзвуковых потоков с плоскими ударными волнами проводилось на ударной трубе с разрядной камерой, внутреннее сечение которой совпадало с сечением камеры низкого давления $24 \times 48 \text{ мм}^2$ [3]. Двумя противоположными стенками разрядной камеры длиной 17 см служили плоскопараллельные кварцевые стёкла. В разрядной секции инициировались скользящие разряды размером $30 \times 100 \text{ мм}^2$ [3, 8] или объемный разряд в области $30 \times 100 \times 24 \text{ мм}^3$ [4]. Рабочим газом служил воздух при давлениях 3 – 250 Торр.

На электроды разрядов подавалось импульсное напряжение 24 – 30 кВ. Ток разрядов, регистрируемый шунтом специальной конструкции, достигал 1 – 2 кА за 30 нс. Длительность свечения и послесвечения разряда, определяемая при помощи стробируемой электронно-оптической цифровой камеры, не превышала 4 мкс. С точки зрения характерных газодинамических времен развитие разрядов и энерговыделение в газ происходит мгновенно.

Вследствие быстрого энерговыделения в ограниченную область скачок давления инициирует распространение ударных волн [3]. Интенсивность и динамика этих волн определяется величиной и распределением удельного энерговыделения в пространстве. С помощью теневого метода и ТФМ исследовались: 1) динамика возмущений от плазменных листов, образованных скользящими по поверхности разрядами; 2) процесс взаимодействия плоской ударной волны с областью релаксирующей плазмы объемного разряда; 3) динамика возмущений, распространяющихся в канале ударной трубы при распаде разрыва на границе «фронт плоской ударной волны – газоразрядная плазма».

Была собрана оптическая схема, позволявшая в одном опыте получать теневое изображение и ТФМ-изображение одной и той же стадии быстропротекающего процесса практически с одной точки обзора. Для исследования газодинамических разрывов и анализа их движения были получены теневые и ТФМ-изображения течения в различные моменты времени после инициирования разрядов. Оптическая схема ТФМ и теневого метода для анализа разрядной области показана на рис. 1.

В качестве диагностирующего излучения использовался лазер ULTRA CFR Nd:YAG с длительностью импульса 6 нс, длиной волны 532 нм. Регистрировалось изображение центральной части разрядной области протяженностью $\sim 80 \text{ мм}$. Схема синхронизации позволяла зондировать разрядный объем в интервале задержки $0 \div 300 \text{ мкс}$ относительно импульса тока разряда. При небольшом угле между лучами теневой схемы и схемы ТФМ ($\sim 15^\circ$) оба метода визуализации давали практически одинаковое поле зрения в области зондирования. Для ТФМ использовались различные фоны.

Фотосъемка велась цифровой зеркальной фотокамерой с телеобъективом с фокусным расстоянием 200 мм. Расстояние от фона до задней стенки ударной трубы варьировалось от 15 до 25 см, расстояние от объектива фотокамеры до передней стенки ударной трубы было 30 – 35 см. Фотокамера фокусировалась на фон, для поддержания максимальной глубины резко изображаемого пространства выставлялась максимально закрытая диафрагма, позволявшая получить нормально экспонированный кадр при импульсе лазера. Чтобы при съемке плоской ударной волны избежать ее попадания в промежуток между регулярно расположенными точками фона, фон был повернут так, чтобы направление распространения ударной волны не совпадало с направлением линий фона. Регистрировались смещения от 5 до 10 пикс., шум составлял 2 – 3 пикс.

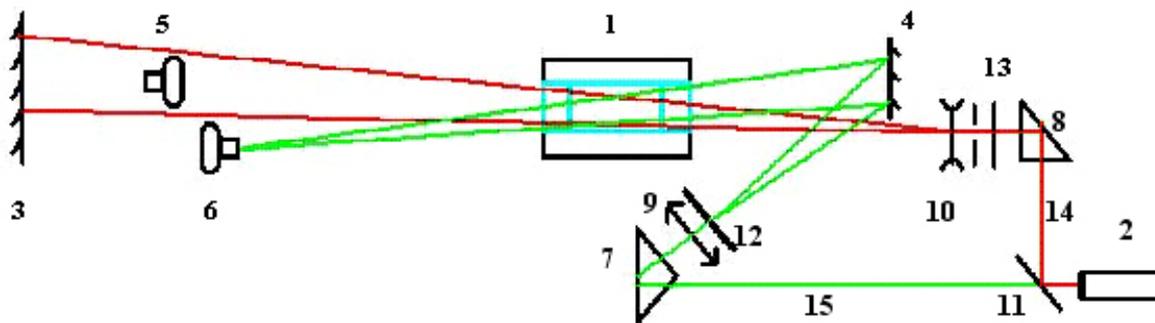


Рис. 1. Схема оптического зондирования разрядного промежутка:
 1 – разрядная камера (поперечное сечение), 2 – лазер, 3 – экран теневой схемы, 4 – экран (фон) ТФМ, 5, 6 – цифровые фотокамеры, 7, 8 – поворотные призмы, 9, 10 – линзы, 11 – делительная пластина, 12 – 13 – фильтры; 14 (красные линии) – ход лучей теневой схемы, 15 (зеленые линии) – ход лучей ТФМ

КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТФМ

Объектом съемки в ТФМ является плоский фон, которым может являться произвольное достаточно контрастное изображение. Большинство результатов, представленных в данной работе, были получены с фонами, состоящими из квадратных черных пятен, регулярно расположенных на белом фоне. Отклонение лучей на фотографии, снятой сквозь течение с градиентом показателя преломления (рабочем снимке), определяется посредством компьютерной обработки. Далее по полученному полю смещений восстанавливается поле плотности в исследуемом течении. Программа компьютерной обработки требует тщательного анализа физической задачи.

Сравнение опорного и рабочего снимков производилось при помощи кросскорреляционного метода, который используется в большинстве программ РИВ-обработки [9]. Оба снимка делились на прямоугольные области опроса (без наложения), затем осуществлялись пробные смещения границ каждой области опроса на рабочем снимке относительно опорного снимка. Смещение, соответствующее максимальному коэффициенту корреляции между областью опроса на опорном снимке и смещенным вариантом на рабочем, принималось как оценка вектора смещения в данной области снимка при заданном размере области опроса. Так как этот алгоритм не позволяет достоверно (например, для регулярного фона) определить смещения, превышающие половину ширины области опроса, а использование больших областей опроса приводит к потере пространственного разрешения, был реализован кросскорреляционный метод с постепенным уменьшением размера области опроса. Изначально задавался сравнительно большой размер области опроса, например 20×20 пикс. Полученное в результате поле смещения приписывалось малым областям опроса, полученным делением исходных на 4 части. Затем выполнялось определение поправок к уже найденному полю смещений с использованием малых областей опроса (рис. 2). В большинстве случаев выполнялось три таких прохода, т.е. размер области опроса менялся с 20×20 пикс. до 5×5 пикс.

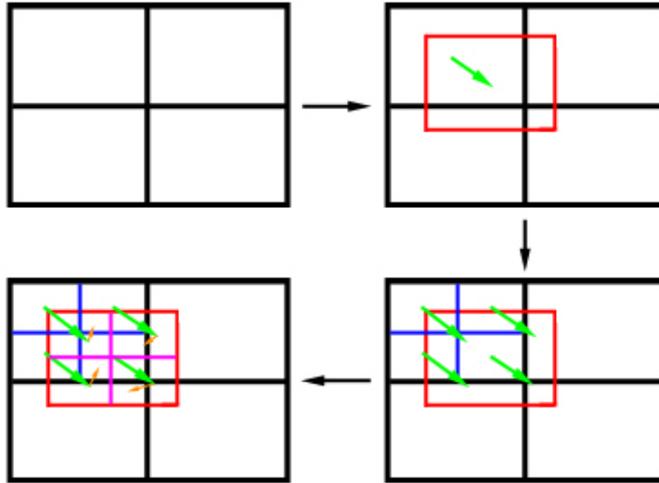


Рис. 2. Схема определения поля смещений при совершении двух проходов

После каждого прохода производилась отбраковка ошибочных значений по методу нормированной медианы: значение одной из компонент смещения ξ в области опроса (i, j) считалось ошибочным, если

$$\frac{|\xi_{ij} - \xi_{med}|}{r_{med} + \varepsilon_0} \geq \varepsilon_{crit}, \quad (1)$$

где ξ_{med} – медианное значение этой компоненты смещения, полученное по области (i, j) и восьми ее ближайшим соседям, r_{med} – медианное значение величин $r_{ij} = |\xi_{ij} - \xi_{med}|$, ε_0 и ε_{crit} – параметры фильтра, которые принимались равными 0,2 пикс. и 0,5 соответственно. Если смещение признавалось ошибочным, оно заменялось на медианное значение. Такой подход, в отличие от простого медианного фильтра, позволяет избежать лишней фильтрации вблизи фронтов ударных волн, где резкие изменения смещения происходят из-за скачка показателя преломления, а не вследствие ошибки алгоритма. Значения смещений, полученные в результате последнего прохода, уточнялись с использованием субпиксельной точности: форма пика коэффициента корреляции приближалась функцией Гаусса, рассчитывались дробные координаты максимума. Смещения, найденные в недо- или переэкспонированных областях исходных снимков, соответствующих электродам, загораживающим фон, и каналам разряда с повышенной яркостью, полагались равными нулю.

После определения векторного поля смещений по нему рассчитывалось поле плотности. Оно связано с полем смещения уравнением Пуассона [8]

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} = -\frac{2\alpha}{h(h+2L)G\alpha_1} \left(\frac{\partial \xi_x}{\partial a} + \frac{\partial \xi_y}{\partial b} \right). \quad (2)$$

Здесь ρ – плотность, h – толщина шлирен-объекта, L – расстояние от фона до шлирен-объекта, G – постоянная Гладстона-Дейла, α и α_1 – размеры одного пикселя в плоскости фона и в плоскости объекта, a и b – координаты области опроса на снимке, выраженные в пикселях. На границе снимка, лежащей в области невозмущенного газа, ставилось граничное условие Дирихле $\rho = \rho_0$, на остальных границах – однородные или неоднородные условия Неймана: $\partial \rho / \partial n = 0$ или $\partial \rho / \partial n = -2\alpha \xi_n / (h(h+2L)G)$. Последний вариант предпочтителен

для тонких нагретых слоев вблизи стен ударной трубы при использовании поверхностного разряда, т.к. однородные граничные условия Неймана скрывают часть области градиента плотности вблизи границы. Однако использование неоднородных условий может приводить к нефизическим значениям плотности из-за погрешности определения нормальной компоненты смещения на границе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ результатов визуализации фронтов ударных волн от плазменных листов теневым фоновым методом показал хорошее совпадение их положения (области максимального смещения точек фона и области максимального градиента поля плотности) с положением разрывов, определяемым теневым методом (рис. 3). На всех рисунках значения плотности нормированы на плотность невозмущенной среды, значения смещения указаны в пикселах. Перепад плотности на фронте ударной волны, рассчитанный по ТФМ-изображениям, оказался ниже теоретического значения, соответствующего числу Маха ударной волны 1,3 – 1,4 в воздухе [3] на 10 – 20%.

Плоская ударная волна с числом Маха 2 – 3, распространяющаяся по каналу ударной трубы, также хорошо визуализируется ТФМ при оптимальных условиях эксперимента [8]. Эксперименты показали, что в случае взаимодействия плоского фронта ударной волны с областью релаксирующей плазмы объемного разряда происходит изменение формы фронта в средней части и в пристеночных областях (областях релаксирующей плазмы поверхностных разрядов) (рис. 4). В этой серии экспериментов оптическое зондирование проводилось через 80 – 350 мкс после разряда, когда ударные волны от плазменных листов уже затухали. Теневой фоновый метод показывает плавно изменяющуюся структуру поля плотности в отличие от резкого градиента плотности на фронте ударной волны в отсутствие разряда [8].

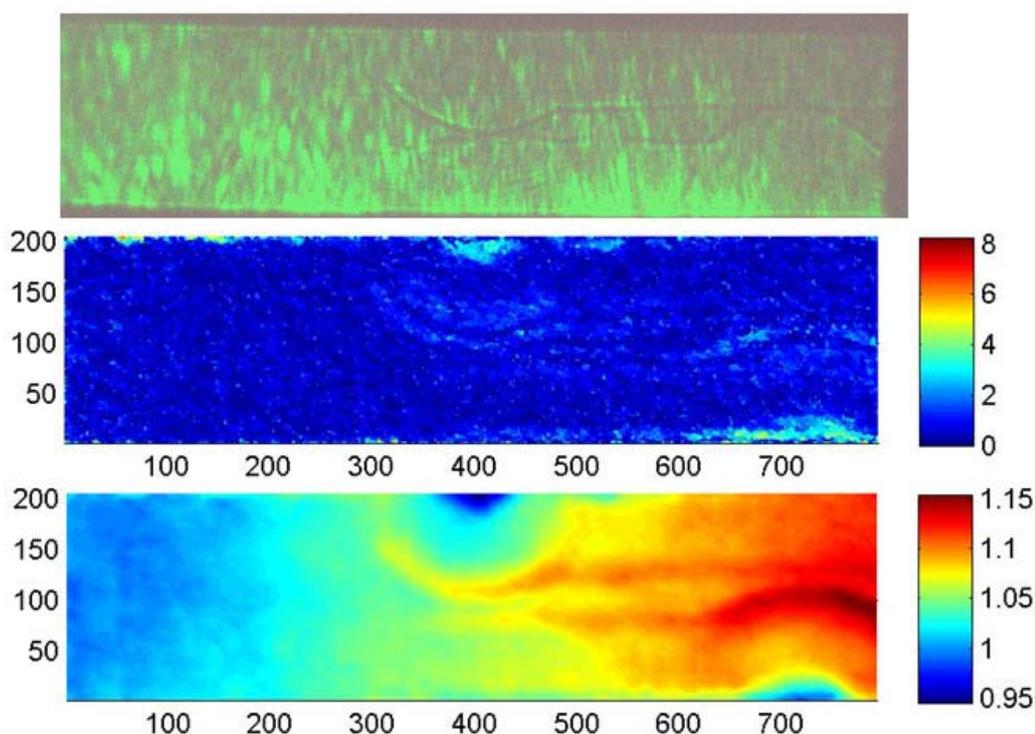


Рис. 3. Теневое изображение, поле абсолютных смещений ТФМ и рассчитанное поле плотности для ударных волн, движущихся навстречу друг другу от двух плазменных листов (давление 75 Торр, время после инициирования разряда 20 мкс)

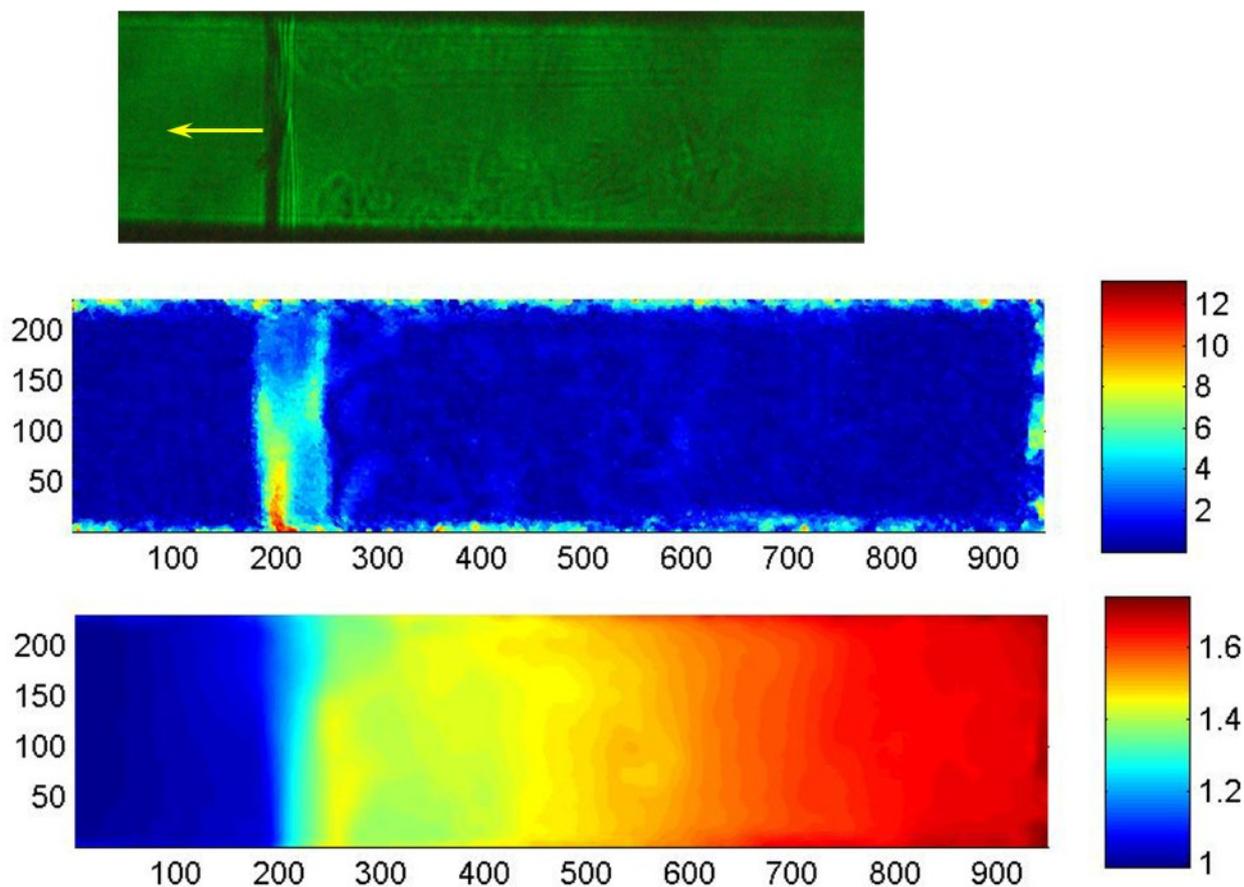


Рис. 4. Теневое изображение, поле абсолютных смещений ТФМ и рассчитанное поле плотности для ударной волны, двигающейся через область релаксирующей плазмы объемного разряда (давление перед УВ 75 Торр, время после инициирования разряда 160 мкс, время движения УВ по области разряда 60 мкс).
Стрелка показывает направление движения ударной волны

При инициировании объемного разряда в момент нахождения фронта плоской ударной волны в разрядном промежутке объемный разряд инициируется только в области низкого давления перед фронтом [4]. За время протекания тока разряда фронт ударной волны смещается не более чем на 0,2 мм. Практически мгновенное с точки зрения газодинамики изменение условий на фронте ударной волны приводит к распаду образовавшегося разрыва «плазма объемного разряда - ударно нагретый газ за фронтом ударной волны». В результате возникает сложное нестационарное газодинамическое течение с множественными разрывами. Теневым и теневым фоновым методом через 40 – 150 мкс после разряда фиксировалось движение ударно-волновой конфигурации, образовавшейся после распада разрыва (рис. 5). Оба метода визуализируют схожую разрывную конфигурацию.

ТФМ обработка дает возможность определить поле плотности вблизи газодинамических разрывов.

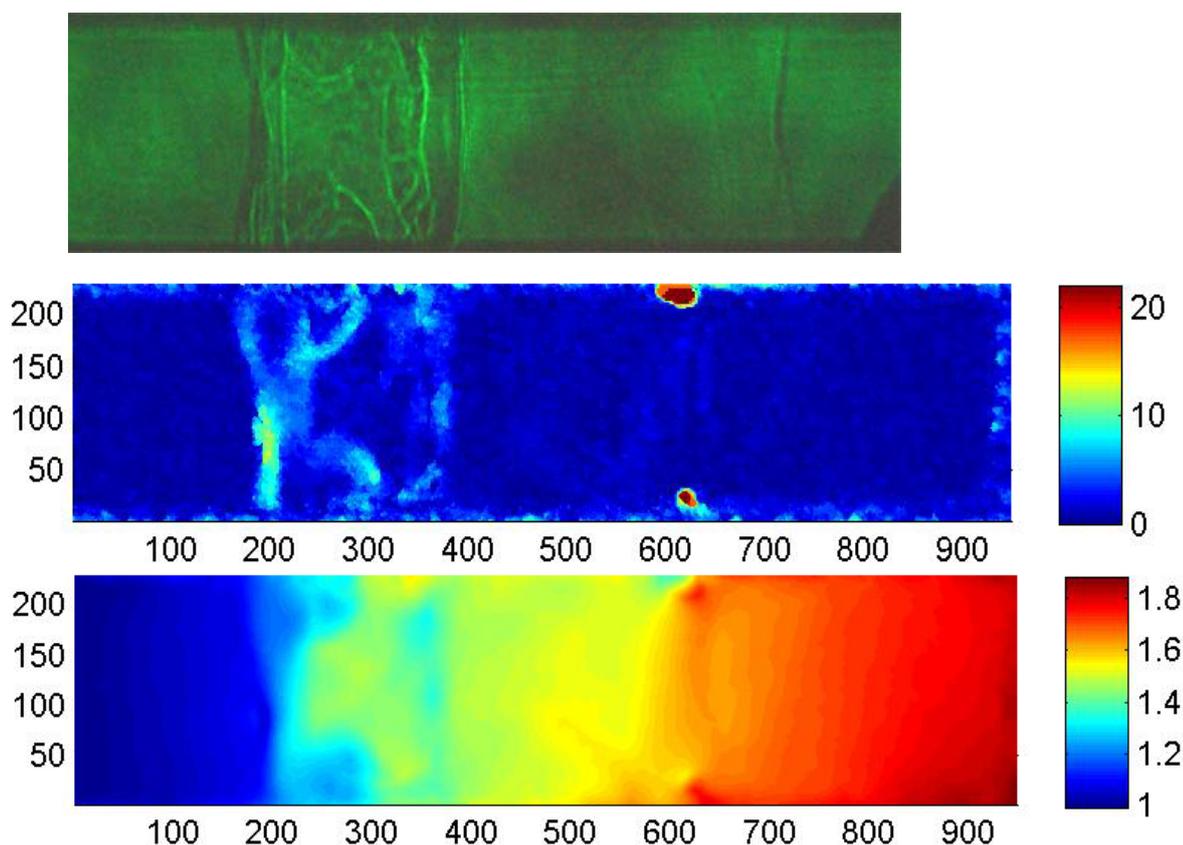


Рис. 5. Теневое изображение, поле абсолютных смещений ТФМ и рассчитанное поле плотности для ударно-волновой конфигурации, образовавшейся после распада разрыва (давление перед УВ 75 Торр, время после инициирования разряда 56 мкс). УВ движется справа налево

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования ударно-волнового течения в канале ударной трубы после инициировании поверхностного и объемного разряда наносекундной длительности теньвым и теньвым фоновым методом показали хорошее соответствие результатов двух оптических методов. Количественное описание поля плотности течения на основе обработки ТФМ-изображений дает достоверные количественные результаты в указанном диапазоне экспериментальных условий. Небольшое занижение перепада плотности на фронте ударной волны по сравнению с теоретическим значением можно отнести к 1) недостаточному пространственному разрешению, из-за которого оценка градиента плотности производится не непосредственно на фронте ударной волны, а вблизи него и 2) принципиальным ограничениям рефракционных методов при анализе скачка плотности на ударной волне. Одним из центральных вопросов дальнейших исследований, безусловно, должно стать выяснение характера оптимального фона, позволяющего снизить шумы и повысить пространственное разрешение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-08-00297.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Weakly** ionized plasmas in aerospace applications / Semenov V.E., Bondarenko V.G., Gildenburg V.B. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. № 44. B293.
2. **Development** and Characterization of Plasma Actuators for High Speed Jet Control / Samimy M., Adamovich I., Webb B. et al. // Experiments in Fluids. 2004. Vol. 37. № 4. P.577-588.

3. **Развитие** газодинамических возмущений из зоны распределенного поверхностного скользящего разряда / Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 5. С. 10-18.
4. **Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Lutsky A.E.** Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge // Phys. Fluids. 2008. V. 20. № 5. P. 056101.
5. **Richard H., Raffel M.** Principle and applications of background oriented schlieren (BOS) method // Meas. Sci. Technol. 2001. Vol. 12. P. 1576–1585.
6. **Popova E.M., Kompenhans J., Skornyakova N.M.** Investigation of the Accuracy of the Background Oriented Schlieren Method. // Proceedings of 13th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-13) and 12th French Congress on Visualization in Fluid Mechanics (FLUVISU-12): Nice, France, 2008. CD Rom Proceedings, 263-080422.pdf.
7. **Zeb M.F., Ota M., Maeno K.** Application of color-stripe background oriented schlieren (CSBOS) method to the convection phenomena // Proceedings of 14th International Symposium on Flow Visualization (ISFV-14): Daegu, Korea, 2010. CD Proceedings, 3D1-270.pdf.
8. **Application** of BOS method for analysis of the flow after surface discharge / Jin J., Lutsky A.E., Mursenkova I.V. et al. // Proceedings of the 21st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-2010): Kaohsiung City, Taiwan, 2010. CD Proceedings, IS10-05.pdf.
9. **Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J.** Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer, Berlin.

J. Jin, I.V. Mursenkova, N.A. Vinnichenko and I.A. Znamenskaya

*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia,
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1/2, E-mail: murs_i@physics.msu.ru*

RESEARCHES BY THE SHADOW AND BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN METHOD OF THE FLOW WITH SHOCK WAVES IN THE DISCHARGE CHAMBER

Results of an experimental research by the shadow method and background oriented schlieren (BOS) method of the flow field in shock tube channel after initiation of the sliding surface discharge and the volume discharge of nanosecond duration are presented. Simultaneous registration of the flow field by two methods gives the capability of complete qualitative and quantitative description of the shock-wave processes arising from the interaction between the pulse discharge and a high-speed flow in the channel of the shock tube. Vector field of displacement between two images is evaluated using cross-correlation technique. The density is obtained by solving Poisson equation with special boundary conditions. It is shown that BOS method provides quantitatively reliable data for the structure of flow field corresponding to a classical shadow method. It provides good quantitative results for the shock waves propagating in the area of initiation of discharges.

SHADOW METHOD, BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN METHOD, SHOCK TUBE, SURFACE SLIDING DISCHARGE, PULSE VOLUME DISCHARGE, SHOCK-WAVE CONFIGURATION