

УДК 533.17, 535.8

Ф.Н. Глазырин, И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротева, И.В. Мурсенкова

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2,  
E-mail: glazyrin@phys.msu.ru*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И ЧИСЛЕННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ИЗ КАНАЛА ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена детальному исследованию динамики сверхзвукового течения, возникающего за ударной волной после ее выхода из канала ударной трубы. В экспериментах изначально плоские ударные волны с числами Маха 1.3-1.9 распространялись по камере низкого давления с поперечным сечением 24x48 мм<sup>2</sup> и затем дифрагировали на ее открытом конце. Для экспериментальной визуализации возникающего течения и обработки изображений были использованы методы PIV и ТФМ (теневого фонового метода). Реализованная оптическая схема позволила зарегистрировать основные структурные элементы течения, включающие: дифрагированную ударную волну, контактную поверхность, вихревую конфигурацию и струйное течение. Также проводилось численное CFD моделирование задачи в рамках системы нестационарных уравнений Навье-Стокса. Было получено хорошее согласие результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

**МЕТОД PIV, ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
СВЕРХЗВУКОВОЙ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЙ ПРОЦЕСС.**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Исследование импульсного истечения ударной волны из канала тесно связано с решением фундаментальной задачи о нестационарной дифракции ударных волн. Интерес к данному явлению, возникший еще в середине прошлого века [1], поддерживается большой ролью сверхзвуковых импульсных течений в авиационной, ракетной и космической технике.

Выход ударной волны из открытого канала в атмосферу порождает широкий спектр сложных газодинамических явлений: сверхзвуковое струйное течение, образование и взаимодействие пространственных вихрей, развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и т.д. Возникающее в результате осесимметричное либо трехмерное нестационарное течение изучалось с помощью различных оптических методов: теневого и шпирен-метода [2], интерферометрии [3], интерферометрической томографии [4], цветного шпирен-метода [5], а также теневого фонового метода [6].

За последнее десятилетие появился ряд работ, в которых исследование истечения ударных волн из каналов различного (в основном, осесимметричного) сечения проводилось с использованием сравнительно нового метода диагностики потоков – метода PIV (теневого трассерной визуализации). В большинстве таких работ основное внимание уделено

изучению формирования и эволюции крупномасштабных вихревых структур, возникающих в истекающем газе [7; 8]. Приводятся данные по скорости распространения и расширения вихревых колец, а также возникновению вторичных вихрей и внутренних скачков уплотнения [9; 10].

В данной работе рассматривалась дифракция плоской ударной волны из канала с прямоугольным поперечным сечением. Основной целью было изучение особенностей и предела применимости современных оптических методов — PIV и ТФМ - для регистрации возникающего существенно трехмерного течения. Особое внимание было уделено возможности измерения толщины и скорости фронта дифрагированной ударной волны. Изучалась также скорость потока сразу за ударным фронтом. Проводилось сравнение полученных данных по оптической визуализации с результатами численного CFD-моделирования.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на однодиафрагменной ударной трубе. Секция низкого давления, открытая в атмосферу, представляла собой канал прямоугольного сечения размером  $24 \times 48 \text{ мм}^2$  и длиной 200 мм. В качестве толкающего газа использовался гелий. В канале трубы были расположены два пьезоэлектрических датчика давления РСВ Piezoelectronics, сигналы с которых использовались для синхронизации оптических схем и отслеживания ударной волны.

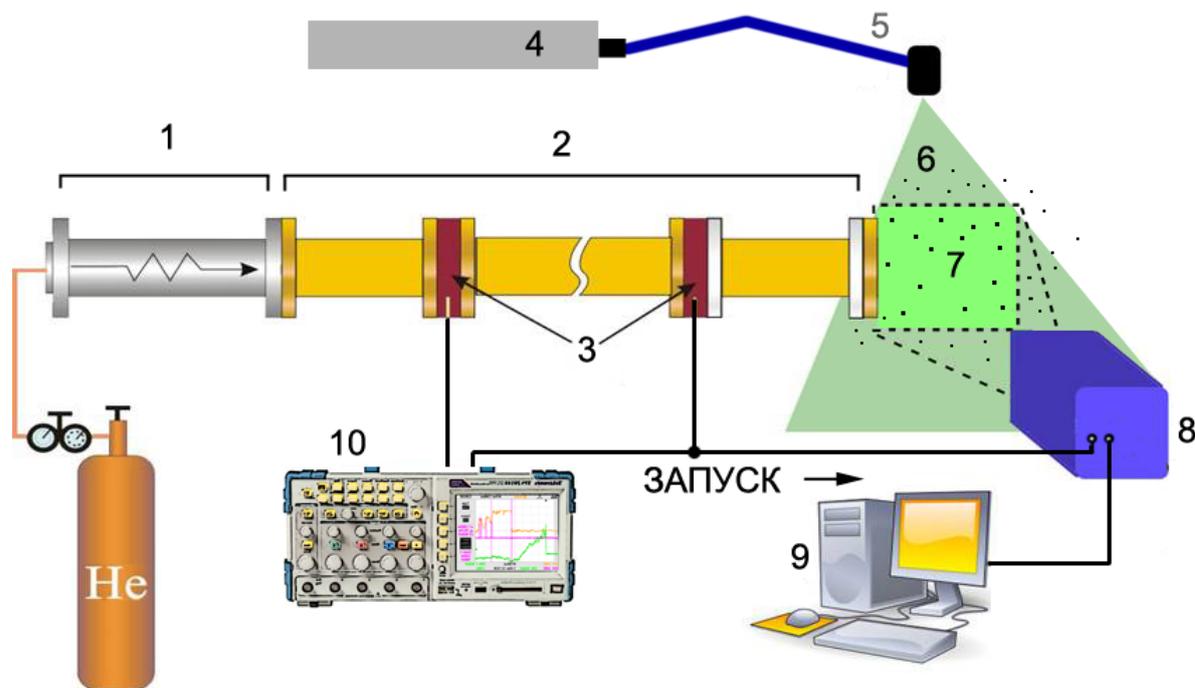


Рис. 1. Оптическая схема PIV-метода: 1 – камера высокого давления, 2 – канал ударной трубы, 3 – датчики давления в канале, 4 – лазер, 5 – подводящая рука, 6 – лазерный нож, 7 – кадр камеры, 8 – камера, 9 – управляющий компьютер, 10 - осциллограф

Для исследования описанного течения использовались два метода визуализации потоков: метод PIV (particle image velocimetry) и теневой фоновый метод (ТФМ) [11]. Оптические схемы установки для обоих методов представлены на Рис. 1-2.

PIV-визуализация обеспечивалась системой FlowMaster от LaVision. Входящая в её состав камера ImagePro 2M позволяет вести съёмку в режиме двойного кадра с задержкой между PIV-снимками в парах до 1 мкс, с частотой до 40 двойных кадров в секунду. Максимальное разрешение кадра составляет  $1600 \times 1200$  пикселей. Сдвоенный лазер Litron Nano-T PIV 180-15 обеспечивает подсветку трассирующих частиц в режиме двойного импульса с практически произвольной задержкой между импульсами в паре и частотой до 15

двойных импульсов в секунду при мощности 180 мДж в импульсе и длительности 9 нс. Лазерный нож был расположен параллельно продольной оси ударной трубы, под углом  $\approx 20^\circ$  к вертикали.

Для ТФМ-визуализации использовался цифровой фотоаппарат Canon 550D с объективом EF-S 18-55 mm. Фотоаппарат работал в режиме длинной выдержки в затемнённом помещении. Фоновое изображение было чёрно-белым, состояло из хаотически расположенных точек. Масштаб изображения был подобран так, чтобы размер одной точки составлял примерно 4-5 пк. Используемая для обработки область фона составляла  $1500 \times 1800$  пк (полный кадр  $5184 \times 3156$  пк). Фон освещался вспышкой на базе импульсной лампы ИСП-15. Длина светового импульса составляла  $\approx 2$  мкс.

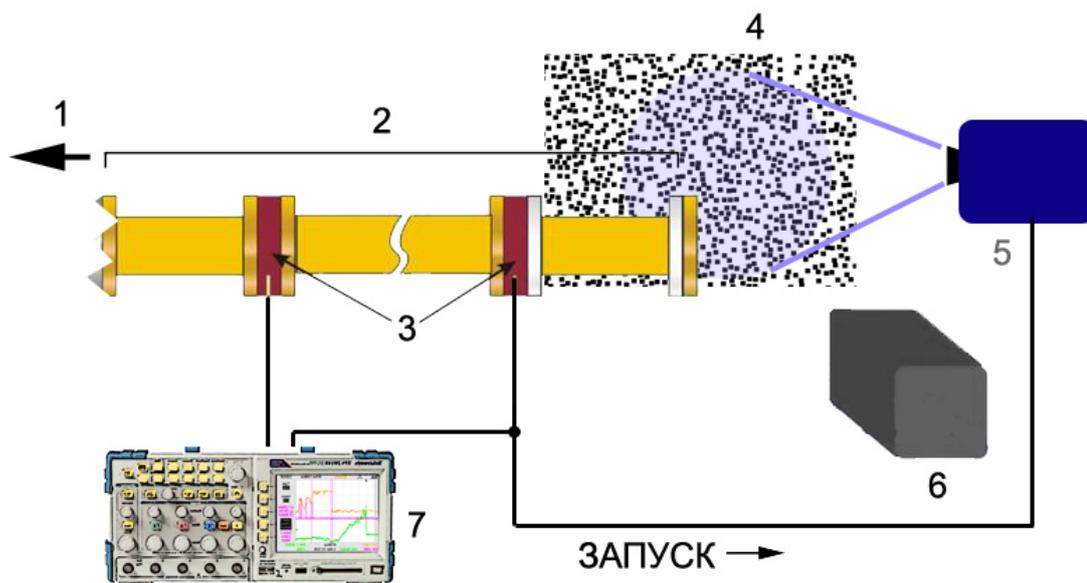


Рис. 2. Оптическая схема ТФМ: 1 – камера высокого давления, 2 – канал ударной трубы, 3 – датчики давления в канале, 4 – фоновый экран, 5 – импульсная лампа-вспышка, 6 – фотоаппарат, 7 – осциллограф

В обоих случаях запуск оптических схем осуществлялся от датчика давления, расположенного в канале ударной трубы. Обработка полученных экспериментальных изображений как для PIV, так и для ТФМ, производилась алгоритмом в составе пакета DaVis 8.1 фирмы LaVision. Алгоритм использовал многопроходный вариант кросс-корреляционного метода, область опроса уменьшалась до 12 пк на последнем шаге. На всех шагах, кроме последнего, применялась квадратная область опроса без перекрытия. Последняя итерация метода проводилась на эллиптической области опроса с адаптивной формой и 50% перекрытием.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 3 приведены PIV- и ТФМ-изображения течения на разных стадиях его развития, от 40 до 1000 мкс. Результаты PIV-измерений представлены в виде распределения модуля скорости потока. ТФМ-изображения демонстрируют поле относительного смещения элементов фона.

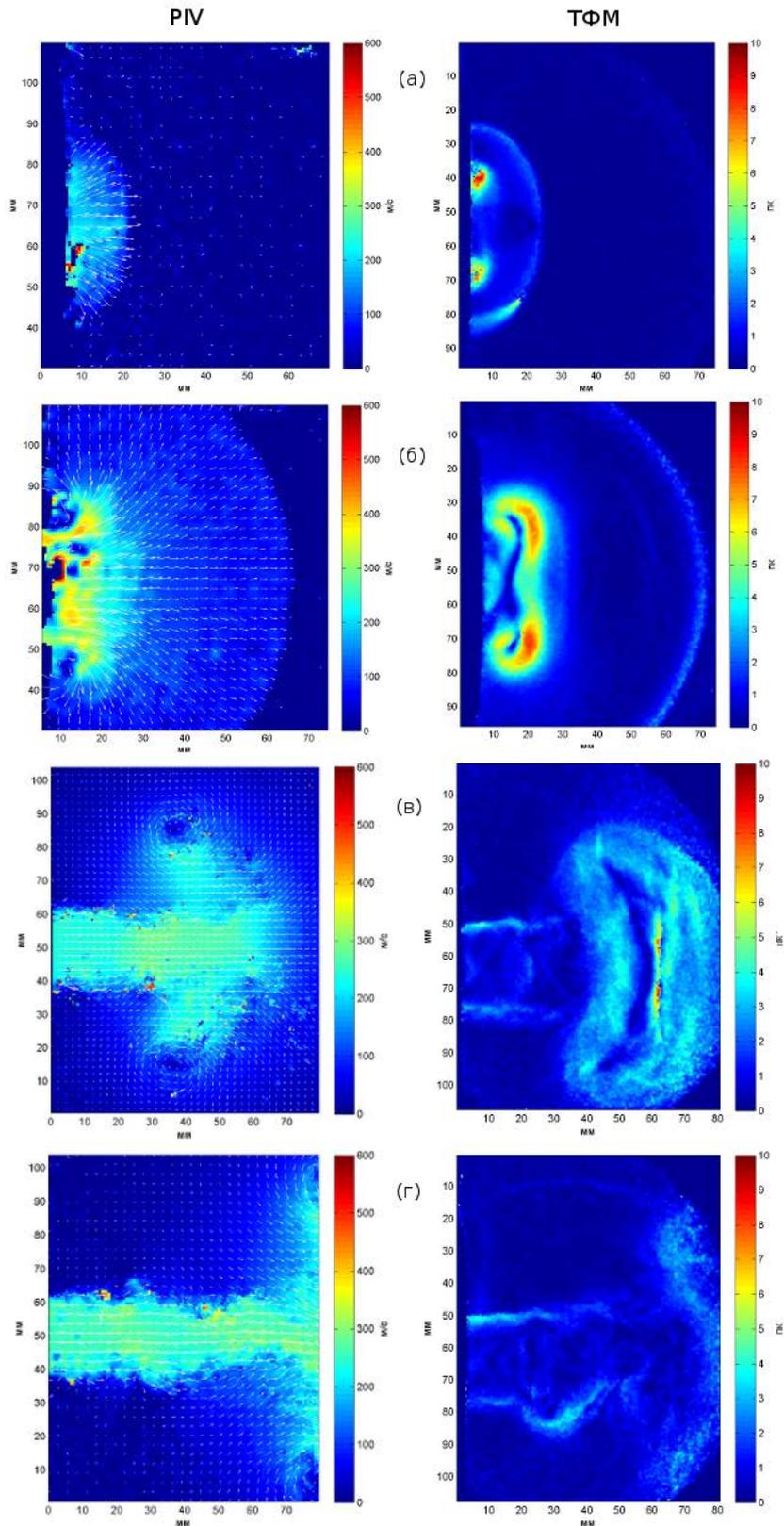


Рис. 3. Картины течения после выхода ударной волны из канала, полученные методом PIV (слева) и TFM (справа): (а) 40-80 мкс; (б) 120-250 мкс; (в) 600-800 мкс; (г) 800-1000 мкс.

PIV метод визуализирует срез течения в плоскости лазерного листа, тогда как на TFM-изображения влияют эффекты усреднения параметров среды вдоль оптической оси. Видно, что на PIV-изображениях более чётко разрешён фронт ударной волны. Ранее количественные измерения плотности на фронте ударных волн проводились в канале ударной трубы для квазидвумерных течений [12]. Было показано, что погрешности в определении скачка

плотности на фронте ударной волны связаны с принципиальными ограничениями метода. В свою очередь, ТФМ достаточно хорошо показывает внутреннюю структуру течения, включая маленькие градиенты плотности. Так, границы вихревого кольца лучше видны на ТФМ-снимках. Комплексное использование двух цифровых методов – на основе явления рефракции и на основе трассирования позволяет восстановить пространственную структуру трехмерного импульсного процесса и получить количественные данные о полях скорости и ее производных.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Было проведено численное моделирование задачи выхода ударной волны из канала прямоугольного сечения на основе решения нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа в декартовых координатах. Использовалась модель совершенного газа (воздух) с показателем адиабаты 1.4 и числом Прандтля 0.72. Зависимость вязкости от температуры описывалась формулой Сазерленда.

Численная конечно-объемная схема представляла собой вариант метода Годунова повышенного порядка точности. Конвективные потоки на гранях контрольных объемов рассчитывались с помощью приближенного решения задачи Римана (HLLC). Для повышения пространственного порядка схемы использовалась двумерная процедура восстановления параметров на гранях и ограничитель *minmod* для сохранения монотонности схемы. Интегрирование по времени проводилось с помощью метода Рунге-Кутты второго порядка.

Расчетная область представлена на Рис. 4. В расчетах использовалась симметрия течения относительно центральной оси ударной трубы. Начальные параметры газа перед ударной волной соответствовали воздуху при н.у. Параметры за фронтом ударной волны задавались с помощью соотношения Ренкина-Гюгоню.

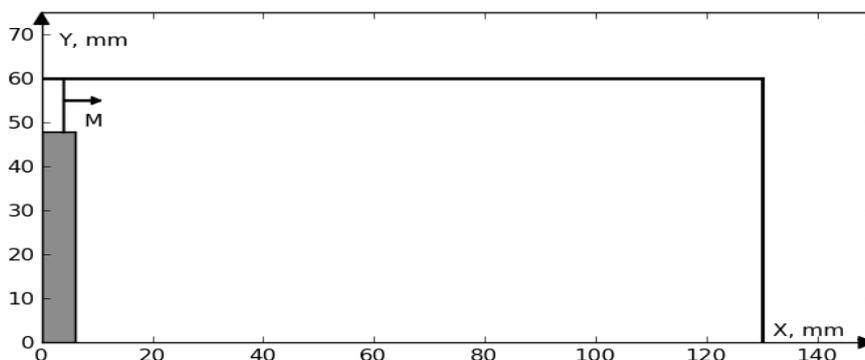


Рис. 4. Расчетная область

Несмотря на то, что течение при выходе плоской ударной волны из канала с прямоугольным сечением является существенно трехмерным, результаты экспериментальной визуализации показали хорошее качественное и количественное совпадение с двумерным расчетом. На Рис. 5 представлены картины течения через 250 мкс после выхода плоской ударной волны с  $M=1.4$  из канала ударной трубы, полученные в расчете и методом PIV. Видно, что численные и экспериментальные результаты хорошо согласуются как по структуре течения, так и по положениям фронта дифрагированной ударной волны и двух противоположно вращающихся вихрей. Кроме того, получены близкие значения модуля скорости и его распределения в потоке за ударной волной.

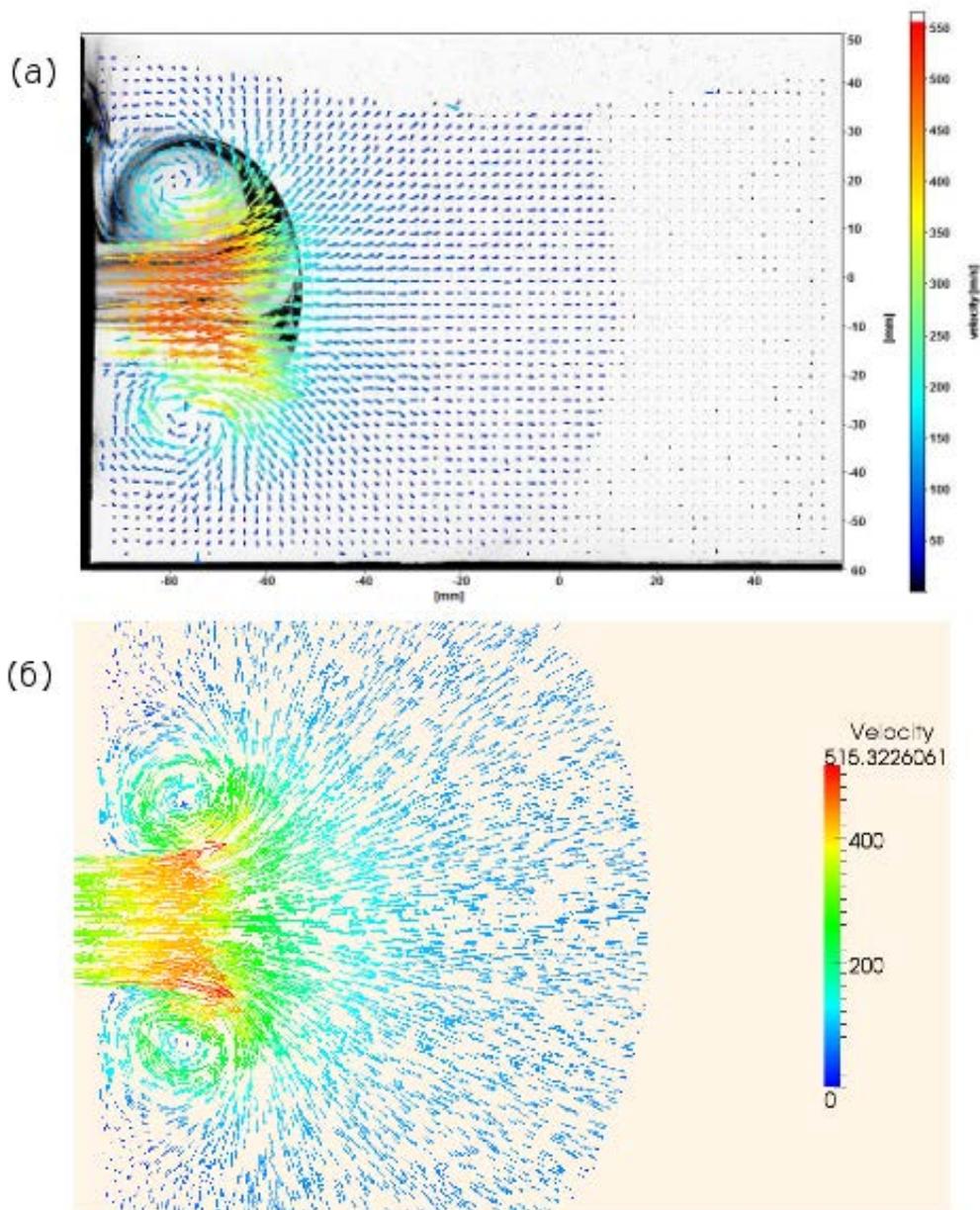


Рис. 5. Сравнение экспериментальной и численной визуализации течения через 250 мкс после выхода ударной волны с  $M=1.4$  из канала: (а) исходный PIV-снимок с наложенным на него векторным полем скорости; (б) визуализация вектора скорости потока (моделирование).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была проведена комплексная визуализация импульсного сверхзвукового течения, возникающего при выходе плоской ударной волны из канала. Были получены и сравнены изображения течения, полученные методами PIV и ТФМ, а также результаты численного моделирования.

PIV и ТФМ дают хорошо соответствующие друг другу картины течения. При этом следует отметить, что PIV, за счёт визуализации течения в сечении, даёт более чёткие контуры фронта ударной волны, центральной части вихревого кольца. Сравнение PIV и результатов численного моделирования в соответствующем эксперименте представлении демонстрируют хорошее совпадения численных значений на поле скорости.

ТФМ, в свою очередь, более точно визуализирует малые градиенты плотности, которые в силу нестационарности течения не соответствуют однозначно градиентам, наблюдаемым на поле скорости. К несомненным достоинствам ТФМ также относится его простота и

доступность, что позволяет использовать его как дополнительный источник информации при исследовании разнообразных потоков.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (Грант № 12-08-31293).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lighthill M.J.** The Diffraction of Blast. I // 1949. С. 454–470.
2. **Голуб В.В., Баженова Т.В.** Импульсные сверхзвуковые струйные течения. Москва: Наука, 2008. 279 С.
3. **Abe A., Takayama K.** Numerical simulation and density measurement of a shock wave discharged from the open end of a shock tube // *Jsmc Int. J.* 1990. Т. 33. с. 216–223.
4. **Маено К. и др.** Pseudo-schlieren CT measurement of three-dimensional flow phenomena on shock waves and vortices discharged from open ends // *Shock Waves*. 2005. Т. 14. № 4. С. 239–249.
5. **Yu Q., Grönig H.** Shock waves from an open-ended shock tube with different shapes // *Shock Waves*. 1996. Т. 6. № 5. С. 249–258.
6. **Mizukaki T.** Visualization of compressible vortex rings using the background-oriented schlieren method // 2010. С. 531–537.
7. **Zare-Behtash H., Gongora-Orozco N., Kontis K.** Global visualization and quantification of compressible vortex loops // 2009. С. 233–240.
8. **Mariani R., Kontis K.** Experimental studies on coaxial vortex loops // 2010. С. 126102.
9. **Arakeri J.H. и др.** Vortex ring formation at the open end of a shock tube: A particle image velocimetry study // 2004. С. 1008.
10. **Murugan T. и др.** Numerical simulation and PIV study of compressible vortex ring evolution // *Shock Waves*. 2011. Т. 22. № 1. С. 69–83.
11. **Скорнякова Н.М.** Теневой фоновый метод и его применения. В кн. *Современные оптические методы исследования потоков: Коллективная монография.* Под ред. Б.С. Ринкевичюса. М. Оверлей 2011. С 93-107.
12. **Глазырин Ф.Н., Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н., Цзинь Ц.** Исследования ударно-волнового течения в канале теньевым и теньевым фоновым методами. *Автометрия.* Т. 48, № 3, С. 101-110.

F.N. Glazyrin, I.A. Znamenskaya, E.Yu. Koroteeva, I.V. Mursenkova

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia,  
119991, Moscow, Leninskie gory, 1, E-mail: glazyrin@phys.msu.ru*

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL VISUALIZATION OF A 3D FLOW FOLLOWING THE SHOCK WAVE EXITING FROM A RECTANGULAR CHANNEL

*In this work we present a detailed study of supersonic flow that originates behind the shock wave after its discharge from the shock tube channel. In our experiments initially flat shock waves with Mach numbers 1.3-1.9 propagated through the low-pressure chamber of the shock tube with a rectangular cross-section of  $24 \times 48 \text{ mm}^2$ , and then diffracted on its open end. For experimental visualization of the subsequent flow we employed PIV (particle image velocimetry) and BOS (background oriented schlieren) techniques. This set-up allowed capturing main structural elements of the flow, including the diffracted shock wave, the contact surface, the vortex loop and the jet flow. The flow was also investigated by means of CFD, the code based on solving the non-stationary Navier-Stokes system of equations. The numerical modeling shows good agreement with experimental data.*

PIV, BOS, CFD, SUPERSONIC FLOW