

## Цифровые технологии в анализе теневого изображения газоплазменных потоков

Знаменская Ирина<sup>1</sup>, Наумов Дмитрий<sup>1</sup>, Дорошенко Игорь<sup>1</sup>, Кузнецов Александр<sup>1</sup>, Луцкий Александр<sup>2</sup>  
 znamen@phys.msu.ru|n\_ds\_n@inbox.ru|doroshchenko93@gmail.com|sasha15555@mail.ru|allutsky@yandex.ru

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

<sup>2</sup>ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

*Проанализированы принципиально новые возможности, обеспечиваемые современной цифровой высокоскоростной регистрацией течений с разрывами, в частности, при прямом сравнении расчетной и экспериментальной визуализации течений. Рассмотрены примеры высокоскоростной теневой съемки и анализа газоплазменных высокоскоростных течений с разрывами при различных параметрах регистрации. Анализируются новые проблемы, сопровождающие переход на цифровые технологии и связанные с большими объемами получаемых экспериментальных данных в виде цифровых видеофильмов.*

**Ключевые слова:** теневые методы, цифровая регистрация, фильтрация шума, быстропотекающие процессы, разрывы, сравнение с численным моделированием.

### 1. Введение

Развитие панорамных методов регистрации обработки, количественного анализа изображений применительно к задачам динамика разрывов и газоплазменных образований находится в прямой зависимости от прогресса в области создания цифровой регистрирующей аппаратуры. Развитие методов и приборов для регистрации быстропотекающих процессов в 50-е годы 20 века было связано с прикладными задачами в области атомной физики и ракетно – космической отрасли. Наиболее быстрыми регистрируемыми процессами были - динамика ионизирующих ударных и взрывных волн, детонация. Революционный переход от пленочных технологий к цифровой высокоскоростной регистрации быстропотекающих процессов в газах, плазме, жидкости привел, однако, к удорожанию эксперимента, и в России зачастую – практически к недоступности съемки процессов микросекундного диапазона.

Барабанные пленочные камеры: СФР, ЖЛВ, ВСК позволяли получить до 48 кадров за 1 эксперимент при хорошем пространственном разрешении при съемке до 1 миллиона кадров в секунду либо развертки процесса. Цифровые современные приборы на такой же скорости могут снимать фильмы объемом до 10 Гб и длительностью несколько секунд. Это позволяет регистрировать не отдельные фрагменты процессов миллисекундной длительности – а весь процесс от начала до конца - например, течение в ударной трубе; течение при запуске газодинамического сопла и др. Другим преимуществом цифровой съемки является возможность сравнения любой стадии процесса с анимацией, полученной при визуализации результатов численного моделирования процесса. В последнее десятилетие стало возможным регистрировать соответствующей аппаратурой и субмикросекундные процессы – микровзрывы, эволюцию импульсных плазменных образований различного происхождения.

При этом возникает проблема сохранения, обработки, анализа больших объемов данных – как эксперимента, так и численных данных и осмысление, интерпретация физического процесса на основе их сравнения.

Данная работа рассматривает возможности исследования формирующихся при инициировании сильноточных локализованных в сверхзвуковом потоке разрядов и динамики возникающих при этом разрывов. Использовались различные модификации теневых методов. Для регистрации использовалась цифровая съемка камерой

Photron FastCam SA5. Для визуализации свечения при регистрации плазодинамических процессов субмикросекундного диапазона также использовались высокоскоростные камеры Nanogate и KOIR 010 KOIR 008. Синхронизация, регистрация и анализ сигналов - осциллограмм тока, данных с пьезодатчиков – осуществлялась на базе цифровых комплексов.

### 2. Описание эксперимента и аппаратуры.

Традиционные оптические методы визуализации течений, основанные на рефракции, развивались и совершенствовались в течении 19 и 20 столетий. Теневой фоновый метод визуализации ТФМ стал возможным только в последние 2 десятилетия с производством цифровых камер высокого разрешения, разработкой программ цифровой обработки изображений, доступностью компьютеров с большим объемом памяти для обработки и хранения изображений и фильмов [4]. Суть теневого фонового метода заключается в сравнении двух изображений одного и того же фона, снятых при отсутствии и при наличии между фотоаппаратом и фоном исследуемого прозрачного объекта с неоднородностями [3]. Изменение показателя преломления вдоль линии наблюдения в случае съемки фона через течение приводит к несовпадению исходного (реперного) и «рабочего» изображений. Проанализировав смещение характерных элементов фона на снимках, можно получить количественную информацию об интегральных показателях преломления исследуемой среды вдоль оптического луча.

Рассмотрим свойства течений, формирующихся в плоском канале при взаимодействии плоской ударной волны с областью вложения энергии конечных размеров. Схема экспериментальной реализации импульсного вложения энергии в сверхзвуковой поток представлена на рис. 1.

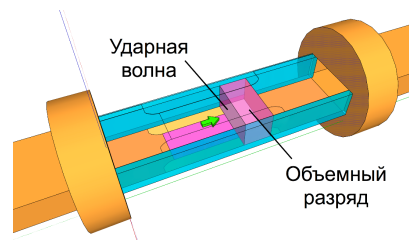


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

В работе [7] на основе систематического сравнения результатов численной и теневой визуализации проведено исследование квазидвумерного нестационарного разрывного газодинамического течения, возникающего при взаимодействии плоской ударной волны с импульсным комбинированным разрядом.

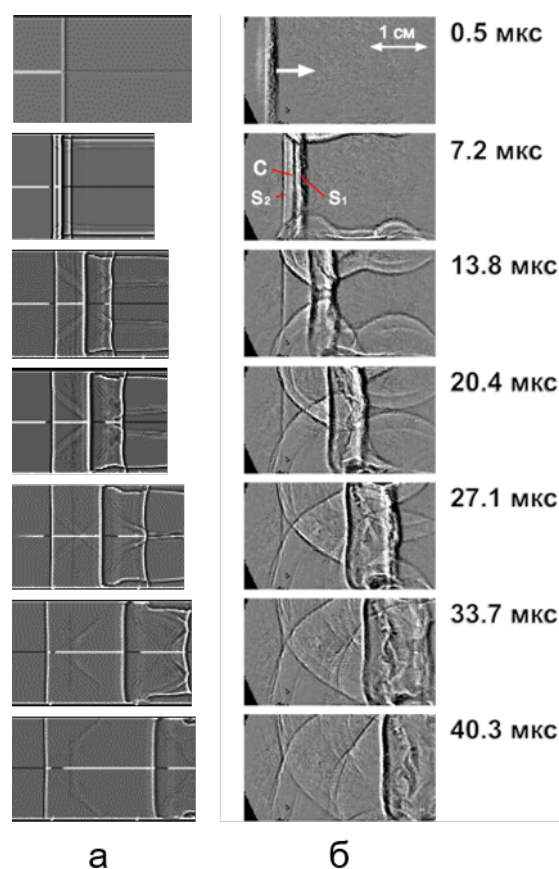
Рассмотрены конфигурации и эволюция разрывов. В экспериментах использовалась установка [5-6], основной частью которой являлась ударная труба сечением 48x24мм, состоящая из камеры высокого давления и камеры низкого давления со встроенной разрядной секцией. Рабочий газ - воздух, толкающий газ - гелий. В разрядной камере создается импульсный объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных электродов на участке потока длиной 10 см. Межеlectродное расстояние 24 мм. Разряд запускается в заданный момент движения плоской ударной волны по каналу ударной трубы (разрядной секции) и протекает в два этапа: сначала на верхней и нижней поверхностях камеры горят плазменные листы - сильноточные разряды, скользящие по поверхности диэлектрика (60 - 100 нс). Область плазменного листа является однородной зоной приповерхностного импульсного энерговыделения на противоположных горизонтальных стенках прямоугольного канала. Скользящий разряд создаёт ультрафиолетовое излучение высокой интенсивности и производит ионизацию воздуха в рабочей секции, подготавливая таким образом рабочий объём к созданию однородного импульсного объёмного разряда. Поверхностный разряд создает ударные волны, распространяющиеся в направлении, перпендикулярном направлению потока за падающей ударной волной в канале. На втором этапе происходит замыкание основного разрядного промежутка, возникает объёмный разряд и энергия вкладывается в межэлектродную область (100 - 300 нс). Наличие неоднородностей плотности газа (ударной волны) в газодинамическом потоке приводит к пространственному перераспределению плазмы объёмного разряда. При наличии ударной волны в межэлектродном пространстве в момент инициирования разряда, область свечения и энерговыделения локализуются в зоне низкого давления перед её фронтом. Мгновенное, по сравнению с длительностью характерных процессов в газодинамике, повышение температуры и давления перед фронтом исходной ударной волны при интенсивном импульсном энергоподводе приводит к нарушению условий Ренкина-Гюгонио. Фронт исходной ударной волны в момент времени  $t = 0$  становится плоской границей раздела двух областей газа с различными, не связанными друг с другом, параметрами. Таким образом, возникают условия для распада разрыва. Начальный плоский разрыв распадается (в основном течении) на две ударные волны и контактную поверхность между ними.

Посредством анализа динамики двумерных ударно-волновых течений восстановлено пространственное распределение энергии разряда. В каждом эксперименте получали 1 изображение на цифровом фотоаппарате при подсветке лазерным излучением. Длительность экспозиции определялась длительностью лазерного импульса и составляла 6 нс. Для анализа эволюции течения необходима хорошая повторяемость экспериментов и малый разброс параметров. Разброс задержки в системе синхронизации оборудования приводил к тому, что не в каждом эксперименте была получена информация, представляющая научный интерес.

Проведено численное 2D моделирование задачи (рис. 2,а). Целью численного моделирования было уточнение распределения энергии разряда в момент  $t = 0$  на основе сравнения экспериментальных и расчетных

изображений течения в различные моменты времени. Численное моделирование проводилось в рамках математической модели нестационарных 2D уравнений Эйлера. Область между электродами:  $0 \leq x \leq 10$  см. В начальный момент времени плоская ударная волна с числом Маха  $M = 2.3$  для первого варианта задачи расположена в сечении  $x_0 = 6$  см, для второй -  $x_0 = 3$  см. В эксперименте в объемную часть разряда  $x_0 < x < 10$  см,  $|y| < 1.1$  см вкладывалось 0.4 Дж, в плазменные листы около стенок  $1.1 < |y| < 1.2$  см - по 0.1 Дж. На основании ранее проведенных исследований полагалось, что в поступательные степени свободы мгновенно переходит 50% вложенной энергии.

Наличие цифровой высокоскоростной съемки позволило получать в 1 эксперименте ряд изображений последовательных стадий процесса, включая динамику исходной ударной волны (это дало возможность уточнить скорость падающей волны). На рис. 2.б представлены соответствующие теневые изображения, полученные в одном эксперименте на частоте съемки 300000 кадров в секунду для числа Маха падающей ударной волны  $M=2$ .

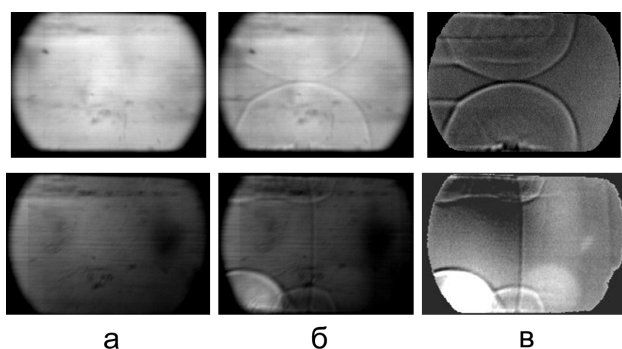


**Рис. 2.** Численное 2D моделирование (а) и кадры высокоскоростной теневой съемки (б) ударно-волнового течения, возникающего при распаде разрыва на фронте плоской ударной волны.  $S_1, S_2$  - ударные волны,  $C$  - контактная поверхность.

Результаты экспериментальной анимации сравниваются напрямую с соответствующими кадрами численной визуализации (Рис. 2.а). Результаты двумерного моделирования представлены в виде синтетических теневых изображений - визуализирована вторая производная плотности газа. [2, 4] Такое представление результатов за последнее десятилетие укоренилось в мировом научном сообществе [3].

Одна из целей сравнения - нахождение энергии локализованного энерговклада путем сравнения численных и экспериментальных изображений с известными контролируемыми параметрами. При экспериментальной цифровой многокадровой видеорегистрации получена возможность проводить расчет и сравнение экспериментальных видеофильмов для каждого эксперимента. При скорости съемки 150000 кадров в секунду сравнение с двумерным численным моделированием возможно для 9-10 последовательных изображений потока, развивающегося после инициирования разряда. При скорости 420 000 кадров/с и 525 000 сравнение с одномерным моделированием возможно на 13-15 изображениях. При такой скорости регистрация ведется из приосевой области, и сравнение идет с одномерным расчетом задачи о распаде разрыва на границе газ – плазма [1].

Для каждой из экспериментальных съёмок течения проводится реперная съёмка в отсутствие течения, с идентичными параметрами. Для улучшения качества полученных цифровых теневых изображений применяется их компьютерная постобработка. Поле интенсивности каждого экспериментального кадра подвергается цифровой обработке: из него вычитается поле интенсивности соответствующего кадра реперной съёмки, и результат сохраняется с линейным преобразованием контраста. Такая обработка позволяет существенно снизить влияние неравномерности освещения поля и дефектов оптических поверхностей, улучшить восприятие газодинамических структур, регистрируемых теньевым методом (рис. 3).



**Рис. 3.** Пример постобработки теневых изображений: а – реперный кадр, б – рабочий кадр, в – рабочий кадр после вычитания реперного и линейного изменения контраста. Скорость съемки 124 000 кадра/с, экспозиция кадра 1 мкс, разрешение 256 x 176 пикселей.

### 3. Заключение

Таким образом, современная цифровая высокоскоростная теневая регистрация течений с разрывами существенно повышает возможности эксперимента и точность результатов сравнения расчетной и экспериментальной визуализации течений. При этом возникают новые проблемы, сопровождающие повсеместно переход на цифровые технологии – проблемы, связанные с большими объемами данных: необходимости их систематизации, интерпретации, анализа, построения физической модели. В связи с этим возрастает роль степени подготовленности специалистов – не только в области цифровых технологий, но прежде всего – в области физики, механики, оптики.

### 4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-19-00672.

### 5. Литература

- [1] Igor Doroshchenko, Irina Znamenskaya, Dmitry Koroteev, and Tahir Kuli-zade., When shock is shocked: Riemann problem dynamics at pulse ionization of a shock wave., *Physics of Fluids*, Vol. 29, № 10, 2017.
- [2] A. A. Fursenko, D. M. Sharov, E. V. Timofeev and P. A. Voinovich. Numerical Simulation of Shock Wave Interactions with Channel Bends and Gas Nonuniformities. *Computers Fluids* Vol. 21, No. 3, pp. 377-396, 1992.
- [3] Gary S. Settles, Michael J. Hargather. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 28(4), 2017.
- [4] Y. Tamura and K. Fujii. Visualization for computational fluid dynamics and the comparison with experiments, Paper AIAA-90-3031 (1990).
- [5] Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Lutsky A.E., Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge., *Physics of Fluids*, Vol. 20, № 5, 2008.
- [6] И. Знаменская, А. Луцкий, Я. Ханхасаева, Ц. Цзинь. Взаимодействие численной и экспериментальной визуализации при исследовании свойств разрядов методом анализа ударно-волновых конфигураций., *Научная визуализация*. Т. 5, № 3, С. 40-51, 2013.

### Об авторах

Знаменская Ирина Александровна, д.ф.-м.н., профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Московского государственного университета. Ее e-mail [znamen@phys.msu.ru](mailto:znamen@phys.msu.ru).

Дорощенко Игорь Александрович, аспирант кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Московского государственного университета. Его e-mail [doroshchenko93@gmail.com](mailto:doroshchenko93@gmail.com).

Наумов Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Московского государственного университета. Его e-mail [n\\_ds\\_n@inbox.ru](mailto:n_ds_n@inbox.ru).

Кузнецов Александр Юрьевич, аспирант кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Московского государственного университета. Его e-mail [sasha1555@mail.ru](mailto:sasha1555@mail.ru).

Луцкий Александр Евгеньевич, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, e-mail [lutsky@kiam.ru](mailto:lutsky@kiam.ru)