

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 533.9, 533.5, 535.015

И.А. Знаменская, И.А. Дорощенко, Д.С. Наумов, Т.Д. Наумова, Т.А. Кули-заде

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Физический факультет,  
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: znamen@phys.msu.ru.*

**ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН ОТ ИМПУЛЬСНОГО  
РАЗРЯДА В ПОТОКЕ**

**АННОТАЦИЯ**

Проведено экспериментальное исследование локализованного свечения импульсного объемного разряда с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов, получены теневые и PIV изображения сверхзвукового потока с ударными волнами, создаваемого разрядом. Объемный разряд в контрагированной форме представлял собой вертикальный пробой цилиндрической формы высотой 24 мм. Длительность пробоя не превышала 300 нс, что приводило к повышению внутренней энергии газа в зоне пробоя и образованию потока с цилиндрическими ударными волнами. Поток фиксировался с помощью высокоскоростной теневой съемки (скорость съемки до 525 000 кадров/с). На полученных кадрах были визуализированы ударно-волновые конфигурации, измерены их положения и скорости. Также был визуализирован разогретый канал, образовавшийся на месте пробоя. Спутные потоки за образовавшимися после пробоя ударными волнами также были визуализированы посредством цифровой трассерной анимометрии (PIV). В случае инициирования разряда в потоке за клином пробой происходит в области пониженной плотности в зоне вихревого течения в донной части клина. Было показано, что время свечения разряда в обоих режимах локализации значительно превосходит время свечения в объемном режиме. Длительность послесвечения составляла до 12,5 мкс.

**ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ТЕНЕВАЯ СЪЕМКА, ЦТА, КОМБИНИРОВАННЫЙ НАНОСЕКУНДНЫЙ РАЗРЯД, ТРАССЕРНАЯ АНЕМОМЕТРИЯ.**

**ВВЕДЕНИЕ**

Газовый разряд – один из наиболее простых и эффективных способов создания низкотемпературной плазмы. Изучение влияния газовых разрядов на потоки газа представляет большой интерес в связи с возможностью управления потоками газа [1]. Электрический разряд оказывает воздействие на газ посредством нагрева, ионного ветра, создания ударно-волновых течений и других, более сложных механизмов. Данные свойства газовых разрядов и особенности их влияния на потоки могут применяться управления потоками [2-3]. Значительная часть электрической энергии разряда может конвертироваться во внутреннюю энергию газа за времена протекания тока разряда через газ [4-5]. Важнейшим параметром является доля электрической энергии, мгновенно переходящая во внутреннюю энергию газа. Данный параметр может быть определен посредством решения обратной

задачи: экспериментальные теневые изображения ударных волн должны быть сопоставлены с результатами численного моделирования для условий эксперимента [6-7].

В данной работе представлено исследование потоков с ударными волнами, созданными локализованным разрядом, проведенное посредством различных техник визуализации потоков (теневая съемка, PIV). Также было исследовано свечение разряда в различных режимах локализации.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Основной частью установки является разрядная камера размером  $24 \times 48 \text{ мм}^2$ , встроенная в канал ударной трубы (в камеру низкого давления). Напряжение поджига разряда составляло 25 кВ. Амплитуда тока составляла  $\sim 1 \text{ кА}$ , а продолжительность  $\sim 200 \text{ нс}$ . Длина разрядной области составляет 10 см. Верхняя и нижняя поверхности разрядной камеры сделаны из диэлектрических пластин со встроенными электродами. При включении разряда на пластинах создаются поверхностные разряды (плазменные листы), осуществляющие предыонизацию объема и способствующие зажиганию объемного разряда между ними [6]. Объемный стадия горения комбинированного разряда наступает спустя  $\sim 30 \text{ нс}$  после зажигания поверхностных разрядов. Ток комбинированного разряда течет 150 – 200 нс. Свечение объемного разряда при давлении 75 Торр представлено на рис. 2. Видно, что свечение плазмы однородно по всему объему пробы.

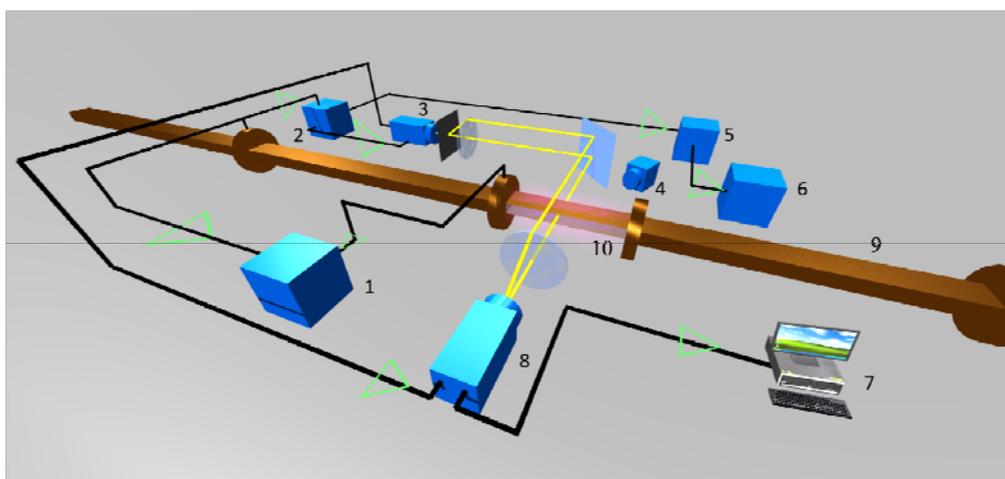


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 – Осциллограф. 2, 5 – генераторы импульсов. 3 – источник света (вспышка или лазер). 4 – цифровая фотокамера. 6 – устройство запуска разряда. 7 – ПК. 8 – высокоскоростная камера. 9 – ударная труба. 10 – разрядная камера.

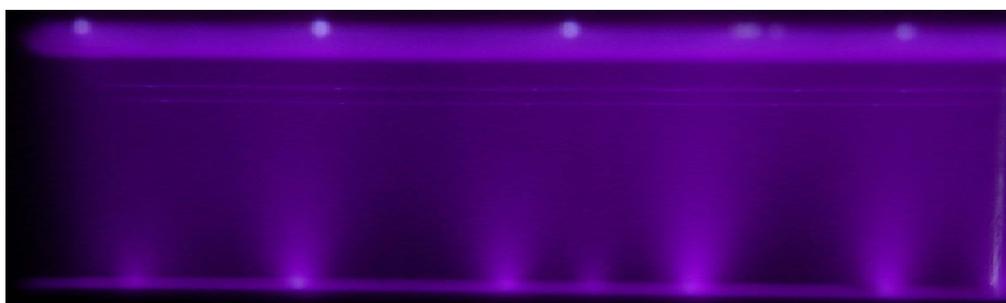


Рис. 2. Свечение комбинированного (объемного) разряда при давлении 75 Торр.

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА

Конфигурация комбинированного разряда, его локализация в неподвижном воздухе зависят от давления в разрядной камере. При давлениях, превышающих 100 Торр, объемный разряд локализуется (контрагирует) в вертикальную цилиндрическую структуру (рис. 3).

Помимо разряда на рис. 3 схематически изображена ударная волна цилиндрической формы, распространяющаяся из зоны пробоя, вызванная быстрым энерговыделением в область пробоя.

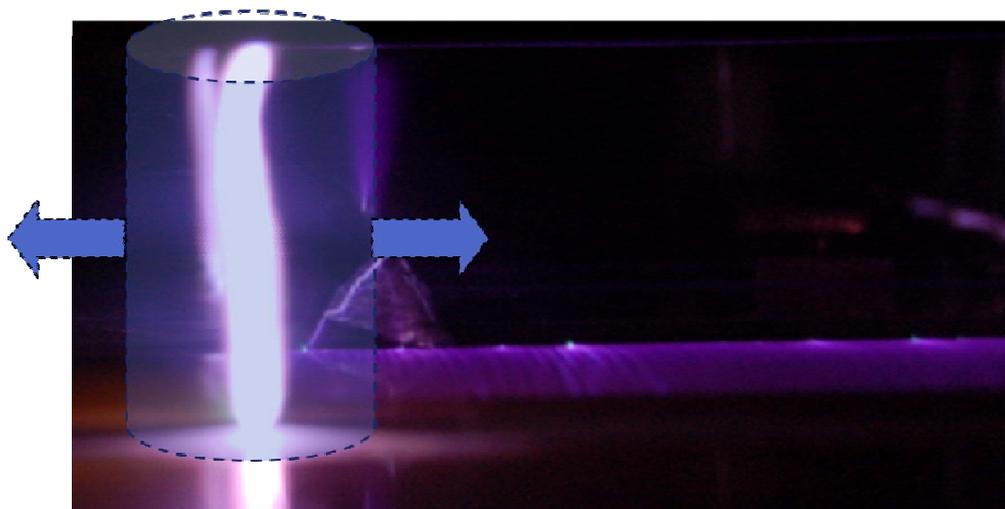


Рис. 3. Комбинированный разряд в контрагированной форме и схема созданных им ударных волн

Был проведен анализ пространственно-временной структуры контрагированного разряда в диапазоне давлений от 90 до 160 Торр. Диаметр канала увеличивается в диапазоне давлений от 100 до 135 Торр, затем незначительно уменьшается в связи с перераспределением энергии комбинированного разряда.

В потоке за клином после дифракции ударной волны пробой происходит в область пониженной плотности газа (область вихревого течения), в которой приведенное электрическое поле  $E/N$  больше, чем в других участках потока [8]. Два интегральных кадра процесса представлены на рис. 4.

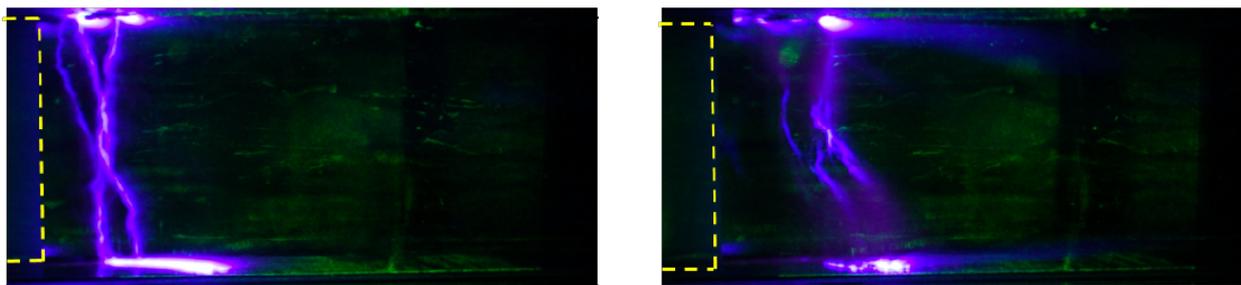


Рис. 4. Интегральные кадры свечения разряда в области вихревого течения в донной части клина. Желтым пунктиром обозначены границы донной части клина.

## ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ТЕНЕВАЯ СЪЕМКА И ЦТА (PIV)

С целью исследования течения с разрывами, была собрана оптическая схема для теневой регистрации быстропротекающих процессов, с различными источниками света. Основным элементом (регистратором) являлась высокоскоростная камера Photron Fastcam SA5. Камера регистрирует электронные изображения в видимом диапазоне спектра. Обеспечивает максимальную скорость съемки 775 000 кадров/с, при разрешении  $128 \times 24$  пикселей. Экспозиция до 1 мкс. Были применены два источника подсветки. Первым источником подсветки был стационарный лазер с длиной волны излучения 533 нм. Луч лазера системой линз преобразовывался в расходящийся пучок, далее, формировался

квазиплоскопараллельный пучок света, который, попадая на призму, направлялся перпендикулярно плоскости кварцевых стекол (рис. 5), проходил через объект исследования и сводится объективом камеры Photron на ее матрицу. Вторым была газоразрядная лампа ИСШ 15 (фирма БИФО). Она создавала естественно поляризованный источник света, далее диафрагма формировала из него точечный источник света, затем свет проходил через коллиматор, сводился в квазиплоскопараллельный пучок света, который, попадая на призму, направлялся перпендикулярно плоскости кварцевых стекол, проходил через объект исследования и сводится объективом на матрицу камеры Photron.

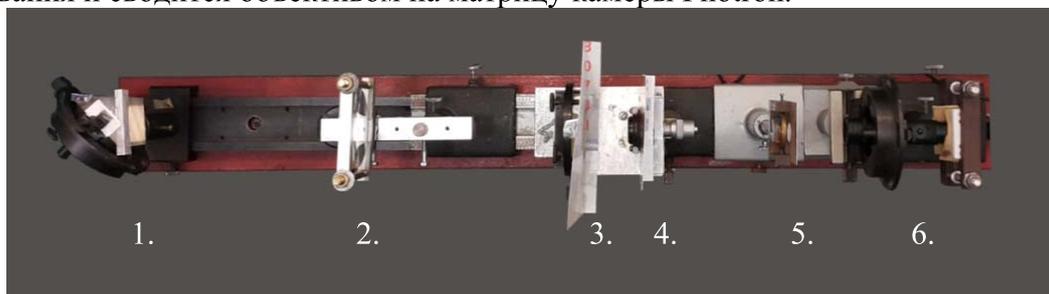


Рис. 5. Изображение оптической установки, для создания квазиплоскопараллельного пучка света диаметром  $\sim 4$  см. 1. – поворотная призма; 2. – собирающая линза; 3,4,5. – рассеивающие линзы, 6. – стационарный лазер.

Длительность импульса вспышки равнялась 3 мс, осуществлялась синхронизация вспышки и высокоскоростной камеры Photron с процессами, происходящими внутри ударно-волновой установки. Падающая ударная волна, проходя пьезоэлектрический датчик давления, запускала эксперимент. Далее, ряд усилителей и генераторов, формировал сигнал на запуск высокоскоростной камеры Photron и вспышки.

Высокоскоростная съемка проводилась при двух скоростях: 124 000 кадров/с и 525 000 кадров/с. Регистрировалось движение потока в течение 4-5 мс после пробоя. Характерные кадры процесса приведены на рис. 6 (скорость съемки 124 000 кадров/с). Верхний ряд изображений улучшен с помощью вычитания фона. Нижний ряд дополнительно обработан рельефным фильтром. На кадрах визуализированы ударные волны от контрагированного объемного разряда цилиндрической формы, от плазменных листов, а также контактные поверхности. Поток является трехмерным в связи с присутствием ударных волн от плазменных листов, которые затухают после нескольких переотражений от стенок разрядной камеры и ударной трубы в течение 40-50 мкс. Также был визуализирован разогретый канал, образовавшийся на месте пробоя через  $\sim 150$  мкс после пробоя. Данная структура распадается спустя  $\sim 1$  мс после начала съемки (пробоя).

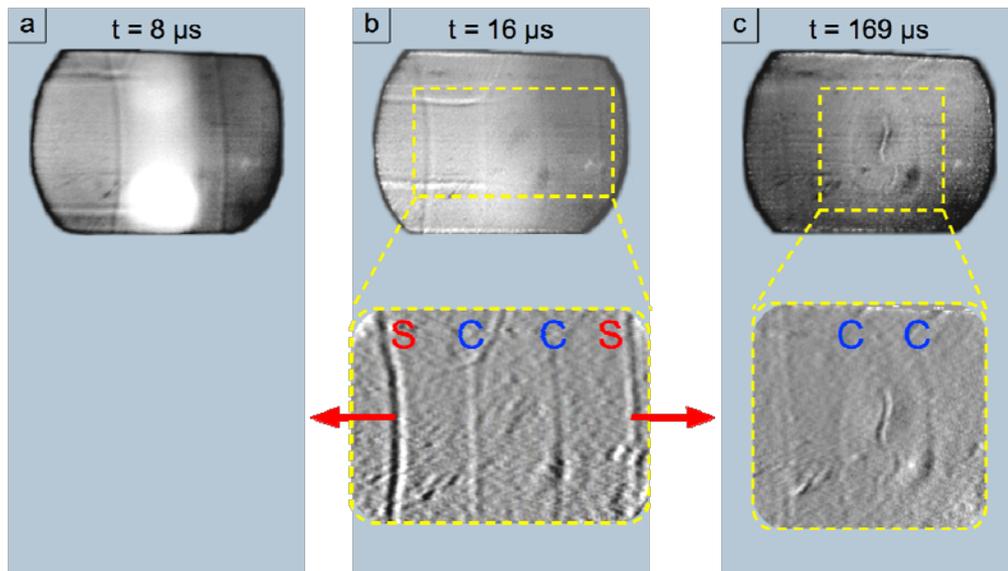


Рис. 6. Набор кадров теневой съемки с течением, созданным контрагированным разрядом в неподвижном воздухе. S – ударная волна. C – контактная поверхность.

На рис. 7 представлены последовательные теневые кадры с ударной волной, распространяющейся из зоны пробоя (скорость съемки 525 000 кадров/с). Съемка проводилась в центральной части разрядной камеры, высота кадра составляла 5 мм. Таким образом, за рассматриваемое время возмущения от плазменных листов не успевали дойти до видимой камерой области и повлиять на поток. В связи с этим течение можно считать одномерным. Промежуток времени между кадрами составлял 1,9 мкс. По полученным кадрам исследовалась динамика ударных волн, распространяющихся от канала пробоя. Были построены X-T диаграммы движения ударных волн при различных давлениях в диапазоне от 100 до 160 Торр.

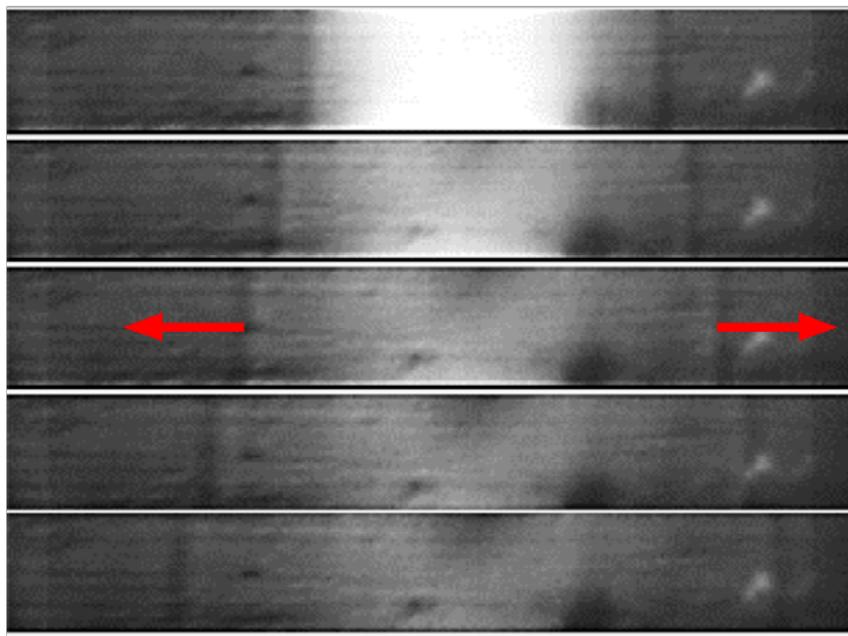


Рис. 7. последовательные кадры с ударной волной, скорость съемки 525 000 кадров/с, горизонтальный размер области съемки – 3 см.

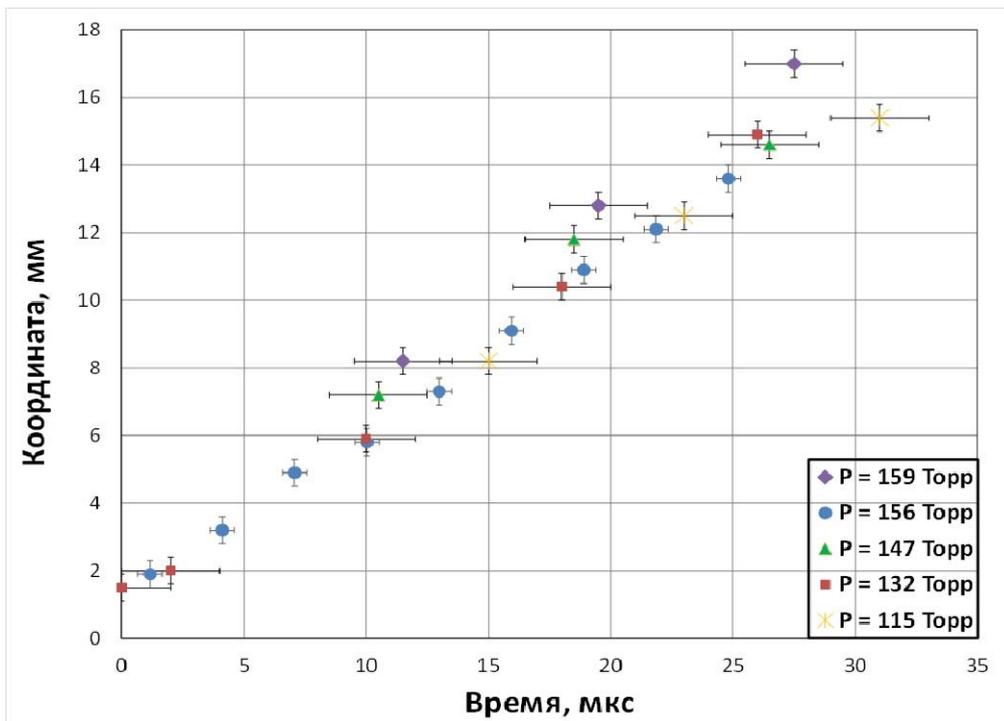


Рис.8. x(t) диаграмма движения цилиндрической ударной волны при различных давлениях

Проанализировав X-T диаграмму на рис. 8 можно сделать вывод, что скорость ударной волны на начальных этапах (до 35 мкс) слабо зависит от давления в рассматриваемом диапазоне давлений. Средняя скорость ударных волн на рассматриваемом интервале времен составляет 540 – 560 м/с ( $M \sim 1,6$ ).

Аналогичные измерения проводились с помощью системы анемометрии по изображениям частиц (PIV). Схема эксперимента и один из обработанных кадров представлены на рис. 9 и рис. 10 соответственно. Количественные результаты, полученные с помощью PIV, с достаточно хорошей степенью точности совпали с результатами теневой съемки.

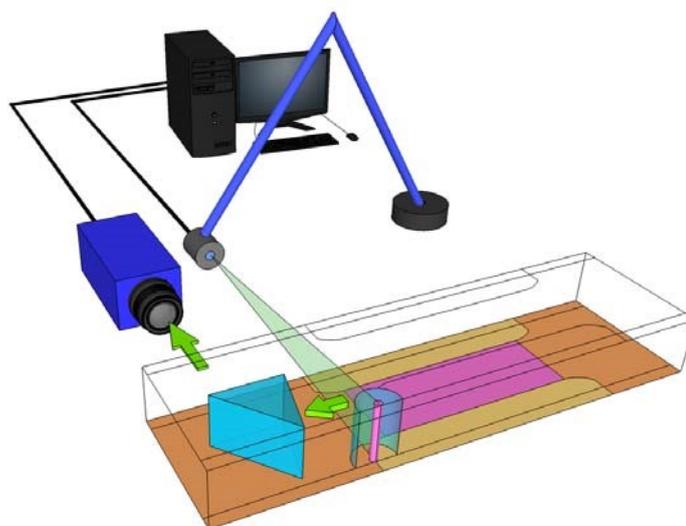


Рис. 9. Схема разрядной секции и системы ЦТА(PIV)

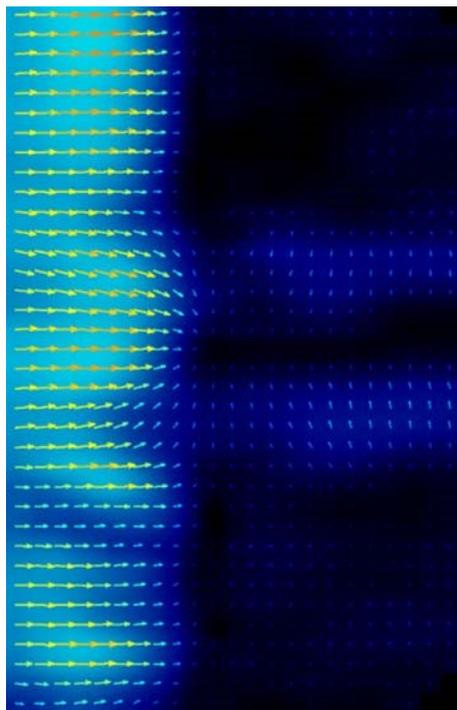


Рис. 10. Полученный с помощью системы PIV и обработанный кадр

Кадры высокоскоростной съемки позволяют также оценить длительность свечения разряда. По набору кадров, полученных с помощью высокоскоростной камеры при скорости съемки 525 000 кадров/с, было произведено измерение длительности свечения для различных давлений. Для обоих режимов локализации разряда была зафиксирована длительная стадия послесвечения, продолжающаяся в отсутствие тока, отсутствующая в объёмном режиме, при котором разряд горит равномерно по всему объему. Длительность фазы послесвечения составила от 2 до 12,5 мкс, тогда как длительность тока и горения разряда в объёмном режиме – до 200 нс.

На рис. 11 представлены последовательные кадры течения, возникшего при импульсном энерговыделении в вихрь в донной части клина после дифракции ударной волны. Регистрировалась часть течения по оси симметрии, позволяющая с большим разрешением по времени определить конфигурацию возникающего ударно-волнового течения от импульсного объёмного разряда, локализованного в зону вихря за клином. На кадре 1 видно вспышку в зоне вихря, которая инициирует ударно-волновое течение, как в области поверхностных разрядов, так и в области вертикального плазменного столба, соответствующего форме клина. В начальный момент времени наблюдается вспышка от свечения, которая имеет некоторую длительность послесвечения в области поверхностного разряда, а также распространяющиеся в противоположных направлениях ударные волны от импульсного плазменного образования. Существенную роль в течении играют ударные волны от поверхностных разрядов, которые пересекаются на оси симметрии. Интенсивность таких волн сравнима с ударными волнами от вертикального вихревого образования. На основании анализа теневой покадровой съемки установлено, что ударная волна движется в сторону донной части клина, отражается и, проходя через вихревую зону, ослабляется в области низкой плотности и неоднородностей, возникших на месте разряда.

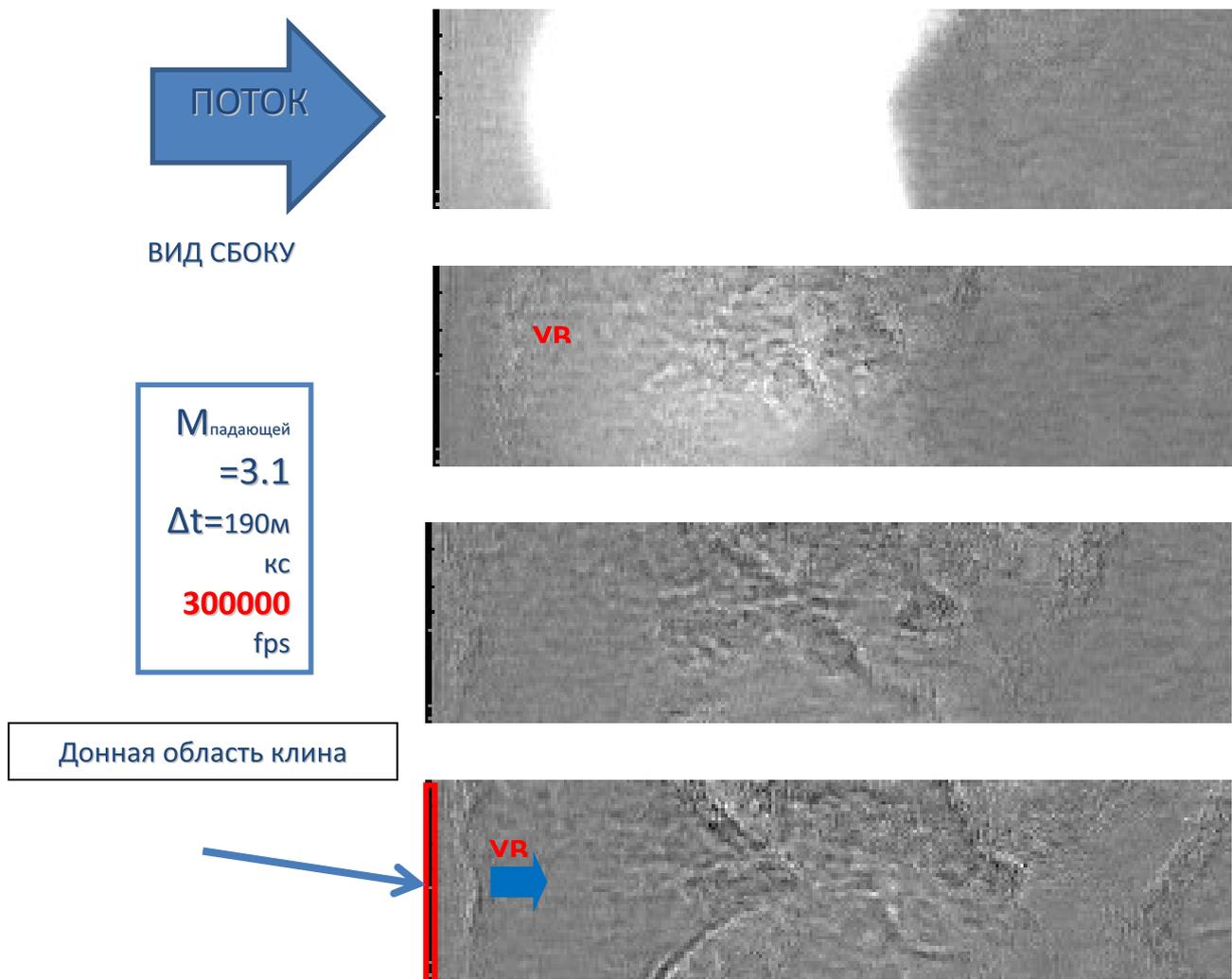


Рис. 11. Последовательные кадры течения, возникшего при импульсном энерговыкладе в вихрь в донной части клина после дифракции ударной волны

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследована локализация импульсного объемного разряда с предыонизацией от плазменных листов в неподвижном воздухе и в потоке за клином.

Исследована зависимость толщины плазменного шнура от давления газа в диапазоне от 100 до 160 Торр. Исследована динамика ударно-волновых конфигураций, созданных объемным разрядом с предыонизацией в режиме контракции в покоящемся воздухе в диапазоне давлений от 100 до 160 Торр методом высокоскоростной теневой съемки (до 525 тыс. кадров/с) и трассерной цифровой анимометрии (PIV).

Показано, что время свечения для обоих режимов локализации существенно превышает время тока (а значит и время энерговыклада). В режимах локализации разряда существует длительная стадия послесвечения, отсутствующая в режиме объемного разряда, длительностью до 12,5 мкс.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-00560.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kevin P. Pfeuffer, Jacob T. Shelley, a Steven J. Ray and Gary M. Hieftje.** Visualization of mass transport and heat transfer in the FAPA ambient ionization source. *J. Anal. At. Spectrom.*, V. 28, 2013, 379-387.
2. **Benmoussa, A., Si-Sabeur, H., Harrache, Z. and Belarsi, A.** Study of gas heating in a xenon glow discharge. *Plasma Devices and Operations* Vol. 15, 2007, No. 4, 299–304.
3. **Benard, N., Zouzou, N., Claverie, A., Sotton J., and Moreau, E.** Optical visualization and electrical characterization of fast-rising pulsed dielectric barrier discharge for airflow control applications. *J. Appl. Phys.*, vol. 111, 2012, pp 033303.
4. **Jones, J.E.** On corona-induced gas motion and heating I: Field equations, modelling and vortex formation. *Journal of Electrostatics*, 66, 2008, 84–93.
5. **Moreau, E., Léger, L., Touchard, G.** Effect of a DC surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25 m/s. *Journal of Electrostatics* 64 (3-4), 2006, pp. 215-225
6. **Znamenskaya, I.A., Koroteev, D.A., Lutsky, A.E.,** Discontinuity breakdown on shock wave interaction with nanosecond discharge. *Physics of Fluids*, vol. 20, 2008, pp 056101-1-056101-6, Available at <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/20/5/10.1063/1.2908010>
7. **Znamenskaya, I.A., Lutskiĭ, A.E., Mursenkova, I.V.** The surface energy deposited into gas during initiation of a pulsed plasma sheet discharge. *Technical Physics Letters*, Volume 30, Issue 12, 2004, Pages 1036-1038
8. **Znamenskaya, I.A., Koroteev, D.A., and Popov N.A.** A Nanosecond High-Current Discharge in a Supersonic Gas Flow. *High Temperature*. Vol. 43, No. 6, 2005, pp. 817–824
9. **Godunov, S. K.,** A Difference Scheme for Numerical Solution of Discontinuous Solution of Hydrodynamic Equations, *Math. Sbornik*, 47, 1969, 271–306, translated US Joint Publ. Res. Service, JPRS 7226.

I.A. Znamenskaya, I.A. Doroshchenko, D.S. Naumov, T.D. Naumova, T.A. Kuli-zade  
Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1-2  
Leninskiye Gory

## HIGH-SPEED RECORDING OF THE BLAST WAVES CREATED BY THE PULSED DISCHARGE

An experimental investigation of pulsed combined discharge glow characteristics, and analysis of flow with blast waves, created by the discharge, are presented in the report. The localization of the discharge behind the wedge in the flow was investigated too. The contracted volume discharge was considered as electrical breakdown - vertical plasma column 24 mm long. As a result of the nanosecond-lasting breakdown, the internal energy of the gas increased, that led to flow with cylindrical shock (blast) waves formation. The flow evolution was visualized via high-speed shadowgraphy. Blast waves were recorded, their position and speed were measured; instability of post-discharge hot gas channel also was visualized. A 2D numerical simulation of flow based on the Euler equations was performed. The model of pulse cylindrical energy deposition was used; initial conditions were taken from the experimental data. Inverse problem was solved comparing CFD and experimental shock waves position. It was shown that 20-22% of the combined discharge energy, stored in the capacitor was converted into internal gas energy (about 140 - 155 mJ). Shock waves from surface discharges were visualized and analyzed as well. In case of

initiation of a discharge in a nonuniform gas-dynamic flow contraction mechanism is different. Breakdown occurs in the lowest density region because density reduction leads to an increase of a normalized electric field parameter  $E / N$ . Thus, it is possible to control the energy input into the low-density areas in the flow separation zone. It is shown that the luminescence time for both localization regimes substantially exceeds time of the current - 200 ns, and, respectively, the energy input time, which is equal to current time. There is a long afterglow phase in both of the contraction regimes, which is absent in the volume discharge regime. The duration of the afterglow phase is up to 12.5  $\mu$ s.

CYLINDRICAL BLAST WAVES, HIGH-SPEED SHADOWGRAPHY, PIV, COMBINED  
NANOSECOND DISCHARGE