

03:04

## **Анализ однородности энерговклада при развитии каналов плазменного актуатора на основе цифрового трассирования**

© Ф.Н. Глазырин, И.А. Знаменская, И.В. Мурсенкова,  
Д.С. Наумов, Н.Н. Сысоев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
E-mail: zoond@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2015 г.

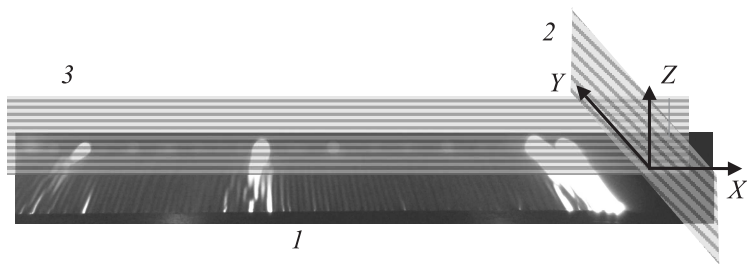
Методом цифровой трассерной анемометрии исследованы нестационарные поля скоростей, возникающие при развитии течения за ударными (взрывными) волнами, инициированными импульсным поверхностным разрядом в воздухе при давлении  $(2-4) \cdot 10^4$  Па. Плазменные листы (разряды наносекундной длительности, скользящие по поверхности диэлектрика) инициировались на стенках камеры прямоугольного сечения. Пространственный анализ формы фронта ударных волн и распределения скорости потока за ними показали, что импульсный энерговклад однороден вдоль разрядных каналов плазменного листа, при том что интегральное видимое свечение плазмы ослабевает вдоль направления распространения каналов.

Импульсный скользящий поверхностный разряд (плазменный лист) [1] может быть использован в качестве плазменного актуатора. Воздействие его на пограничный слой газодинамического потока достигается преимущественно за счет ударно-волновой конфигурации, возникающей при инициировании разряда. Ранее проводился анализ течения, инициируемого таким разрядом в воздухе, на основе сравнения результатов численного моделирования с теневыми изображениями ударных волн. Было показано, что доля энергии разряда, вводимая в приповерхностную область газа, может достигать 60% [2]. Между тем теневые изображения, на основе которых получены оценки [2], отображают интегральное вдоль направления зондирующего луча значение параметров течения, а именно вторую производную показателя преломления газа. Отдельного внимания требует вопрос об однородности энерговклада в направлении от катода к аноду, особенно в ярких разрядных

каналах. В данной работе проведен анализ однородности энерговклада вдоль разрядных каналов по анализу течения, формирующегося после разряда. Для исследования был применен метод цифровой трассерной анемометрии (Particle Image Velocimetry, PIV).

Данный метод широко используется в последнее десятилетие для получения полей скорости газа в дозвуковом, трансзвуковом [3] диапазонах скоростей, исследуются возможности его использования для течений газа с разрывами [4,5]. В работе [6] с помощью цифровой трассерной визуализации получены данные об усредненных полях скоростей течения, создаваемого периодическим разрядом. В работе [7] продемонстрирована визуализация методом PIV профилей скорости за взрывными (ударными) волнами, образующимися при электрическом взрыве проволоочки. С помощью восьмимпульсной лазерной системы получены последовательные изображения полей скорости за фронтом сферической взрывной волны. Отмечается, что на фронте волны зафиксировано значительное уширение профиля скорости, по-видимому, обусловленное преимущественно инерционным запаздыванием жидких трассирующих частиц. Зона турбулентного мелкомасштабного течения, инициированного взрывом и разлетом его продуктов, ограничивала возможности PIV-визуализации областью непосредственно за фронтом ударной волны.

Применение метода PIV к течениям, создаваемым электрическими разрядами в газе, связано с дополнительными сложностями — взаимодействием вещества трассеров с плазмой, влиянием свечения разряда на изображения и т. д. В данной работе экспериментально методом PIV исследованы нестационарные поля скоростей, возникающие при развитии течения за ударными (взрывными) волнами, инициированными импульсным поверхностным разрядом, скользящим по поверхности диэлектрика (плазменным листом) на стенке разрядной камеры прямоугольного сечения [1]. Два плазменных листа инициировались симметрично на верхней и нижней стенках разрядной камеры, имеющей сечение  $24 \times 48$  mm ( $Z \times Y$  на рис. 1). Боковые стенки камеры образованы плоскопараллельными кварцевыми окнами длиной 170 mm ( $X$ ), дающими возможность оптического исследования течения по всему сечению. Площадь зоны поверхностного разряда  $30 \times 100$  mm ( $Y \times X$ ) при поперечном размере камеры 48 mm, средняя толщина плазменного листа  $\sim 0.5$  mm ( $Z$ ) при давлении в экспериментах  $(2-4) \cdot 10^4$  Pa [2]. Область разряда состоит из каналов, направленных перпендикулярно стеклам камеры

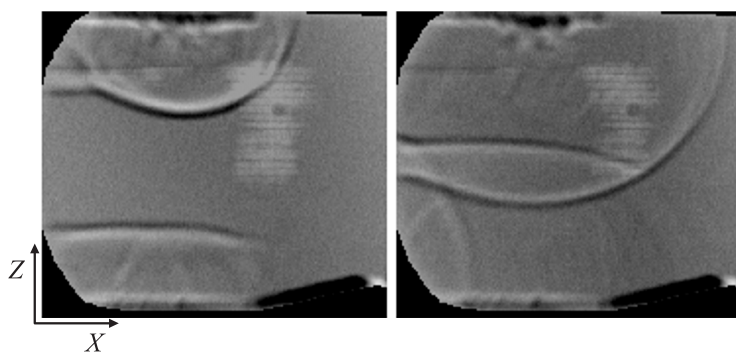


**Рис. 1.** Фотоизображение свечения каналов поверхностного разряда в неподвижном воздухе при давлении  $2 \cdot 10^4$  Па (1) и два положения лазерного ножа (2, 3).

(в направлении  $Y$ ). Каналы развивались за время  $\sim 30$  ns, их плотность на поверхности составляла около 1 канала на 1 mm длины плазменного листа [1,2]. В разряде выделяются отдельные каналы повышенной интенсивности, характеризующиеся также более ярким видимым свечением. Длительность свечения плазменных каналов разряда в зависимости от их интенсивности составляла от 100 ns до нескольких микросекунд [1].

В качестве трассирующих частиц PIV-системы использовался оксид титана (диаметр частиц  $< 1 \mu\text{m}$ ). Поскольку разряд инициировался при пониженном давлении, была разработана процедура засева исследуемой области и поддержания необходимой плотности частиц. Перед началом эксперимента производился засев разрядной камеры частицами, и затем объем откачивался до рабочего давления.

Подсветка трассирующих частиц осуществлялась двойным лазерным импульсом длительностью 6 ns каждый; задержка между двумя импульсами варьировалась от 2 до  $5 \mu\text{s}$ . Лазерный импульс был синхронизирован с инициацией разряда. Съемка проводилась при двух различных конфигурациях PIV-системы. Лазерный нож направлялся сквозь окна разрядной камеры перпендикулярно поверхности плазменного листа в двух различных направлениях (рис. 1). В первой конфигурации нож направлялся вдоль линии развития плазменных каналов (в плоскости  $YZ$ , см. 2 на рис. 1). При этом регистрация PIV-изображения велась по его отражению в поворотной призме, помещенной внутрь разрядной камеры вне области разряда. Во второй конфигурации лазерный нож направлялся перпендикулярно каналам плазменного листа

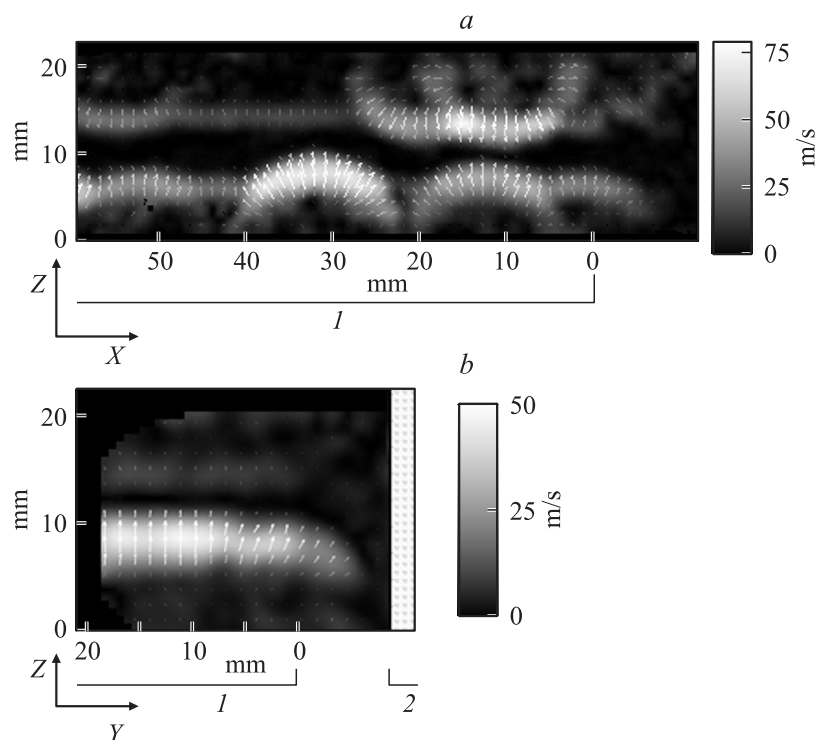


**Рис. 2.** Последовательные теневые изображения ударно-волновой структуры течения, создаваемого двумя параллельными импульсными поверхностными разрядами. Промежуток между кадрами —  $15 \mu\text{s}$ , экспозиция каждого кадра —  $1 \mu\text{s}$ .

(в плоскости  $XZ$ , см. 3 на рис. 1). Таким образом, были получены PIV-изображения зоны разряда с двух взаимно перпендикулярных ракурсов, позволяющие восстановить пространственное распределение ударно-волновых конфигураций, возникающих после инициирования поверхностного разряда, и соответствующих полей скорости течения.

Ранее было показано, что цилиндрические взрывные волны от отдельных каналов взаимодействуют [1], образуя квазипараллельный ударно-волновой фронт. В области каналов повышенной яркости взрывные волны более интенсивны и образуют полуцилиндрические участки, выделяющиеся из общего фронта.

Дополнительно к PIV-исследованию течения проводилась теневая визуализация зоны разряда на основе высокоскоростной цифровой камеры. Важным преимуществом высокоскоростной съемки явилась возможность проследить эволюцию ударно-волновой структуры в случае каждого конкретного эксперимента, поскольку структура разряда (плазменного листа), как правило, несколько отличается в каждом случае инициирования разряда, и соответственно отличается эволюция ударно-волновой конфигурации. Теневая визуализация позволила проследить динамику газодинамических разрывов в интервале времени от  $2 \mu\text{s}$  до  $2 \text{ms}$  после разряда, с интервалом между кадрами от  $5 \mu\text{s}$  (рис. 2).



**Рис. 3.** Поля скорости течения, полученные PIV: *a* — съемка перпендикулярно плоскости каналов, *b* — съемка с торца разрядной области. *1* — область разряда, *2* — стекло.

На рис. 3, *a* показано полученное PIV-методом поле скоростей за ударными волнами, инициированными поверхностным разрядом при давлении воздуха  $2.1 \cdot 10^4$  Па через  $18 \mu\text{s}$  после разряда. Лазерный нож располагался в центральной части разрядной камеры перпендикулярно каналам разряда (вариант 3 на рис. 1, плоскость *XZ*). Хорошо видны фронты полуцилиндрических ударных волн разной интенсивности, интерферирующих друг с другом и формирующих течение, направленное от верхней и нижней поверхностей к центральной области. Максимальные отклонения формы результирующего фронта от

плоской соответствуют участкам полуцилиндрических фронтов ударных волн от ярких (наиболее интенсивных) каналов скользящего разряда.

На рис. 3, *b* приведено PIV-изображение поля скоростей при давлении воздуха  $2.6 \cdot 10^4$  Па, через  $20 \mu\text{s}$  после разряда, полученное при ориентации лазерного ножа вдоль канала повышенной интенсивности нижнего плазменного листа (вариант 2 на рис. 1, плоскость  $YZ$ ). Снизу распространяется ударная волна повышенной интенсивности, исходящая из области яркого разрядного канала, сверху — ударная волна нормальной интенсивности от верхнего плазменного листа. Справа, вне области горения плазменного листа, фронты ударных волн, движущихся к стеклу, искривлены. Поля скоростей, полученные с двух ракурсов, близки по значениям при близких значениях интенсивности свечения канала, скорости газа достигают  $75 \text{ m/s}$ . Усредненная по полю изображения величина скорости течения за фронтом ударной волны в пределах погрешности совпадает с оценками, полученными за прямым скачком уплотнения с числом Маха 1.1–1.3 [1].

Важно отметить, что формирующийся вдоль разрядного канала фронт ударной волны параллелен верхней и нижней поверхностям (по которым скользят каналы). Проведенный анализ полей скорости PIV также показывает, что в вертикальном сечении интенсивность ударной волны и поле скорости газа за ее фронтом существенно не изменяются на длине разрядного канала. Это свидетельствует о постоянстве энергоклада по направлению распространения канала. На фотоизображении (интегральном по времени свечения плазменного листа) излучение ярких каналов неравномерно по их длине (вдоль направления  $Y$ ). Ранее было показано, что видимое свечение разряда по времени существенно превышает время протекания тока разряда. Таким образом, неоднородность свечения, очевидно, создается в основном накоплением светового потока при длительном послесвечении разряда [8].

Анализ формы фронта ударных волн и распределения скорости потока за ними показывает, что мгновенный энергоклад, обеспечиваемый плазменным листом, однороден вдоль направления разрядных каналов, при том что интегральное видимое свечение плазмы ослабевает вдоль направления распространения каналов плазменного листа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-08-02417 и Программы развития МГУ до 2020 г.

## Список литературы

- [1] Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В., Сысов Н.Н. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 5. С. 10–18.
- [2] Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 17. С. 35–41.
- [3] Sartor F., Losfeld G., Bur R. // Exp. Fluids. 2012. V. 53. N 3. P. 815–827.
- [4] Havermann M., Haertig J., Rey C., George A. 2008 Particle Image Velocimetry // Topics in Appl. Phys. 2008. V. 112. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008. P. 429–443.
- [5] Hartmann A., Klaas M., Schröder W. // Exp. Fluids. 2012. V. 52. N 3. P. 591–604.
- [6] Moralev I., Boytsov S., Kazansky P., Bityurin V. // Exp. Fluids. 2014. V. 55. N 5. P. 1747.
- [7] Murphy M.J., Adrian R.J. // Exp. Fluids. 2010. V. 49. N 1. P. 193–202.
- [8] Знаменская И., Латфуллин Д., Мурсенкова И. // Докл. Академии наук. Физика. 2009. Т. 427. № 1. С. 32–34.