

Образование и динамика взрывных волн от наносекундного актуатора

И. А. Знаменская,* Н. Н. Сысоев,† И. В. Мурсенкова,‡ И. Э. Иванов,§ Ф. Н. Глазырин¶
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
 кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Нестационарное поле скорости течения за ударными (взрывными) волнами в воздухе исследовано методом цифровой трассерной анемометрии (Particle Image Velocimetry, PIV). Ударные волны были инициированы поверхностным скользящим разрядом наносекундной длительности (плазменным листом) при давлении воздуха $(2 \div 4) \times 10^4$ Па. Анализ пространственного распределения скорости потока за фронтом ударных волн показал, что импульсный энерговклад однороден вдоль разрядных каналов плазменного листа.

PACS: 47.40.Nm, 52.80.-s УДК: 533.6.011.72, 537.52

Ключевые слова: скользящий поверхностный разряд, плазменный лист, импульсный энерговклад, взрывная волна.

Одной из актуальных задач плазменной аэродинамики является исследование газодинамических возмущений, вызванных быстрым введением энергии в объем при инициировании импульсных разрядов длительностью менее микросекунды [1–3]. Для определения воздействия разряда на поток в целом необходимо, наряду с исследованием теплового воздействия и ионного ветра, определить динамику ударных волн и течения за ними. Параметры ударно-волновой конфигурации, вызванной быстрым введением энергии в ограниченную область пространства, определяются интенсивностью и пространственно-временным распределением энерговложения.

Импульсный скользящий поверхностный разряд наносекундной длительности (плазменный лист) [1] может быть использован в качестве плазменного актуатора для управляемого воздействия на пограничный слой газодинамического потока, в том числе — разрывного. Воздействие 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% [1].

Отдельного внимания требует вопрос об однородности энерговклада в направлении движения разрядных каналов актуатора, особенно наиболее интенсивных. Анализ энерговклада вдоль разрядных каналов был проведен по анализу течения, формирующегося после разряда, с применением метода цифрового трассирова-

ния (Particle Image Velocimetry, PIV). Использование этого метода для исследования течений, создаваемых электрическими разрядами в газе, связано с дополнительными сложностями — взаимодействием вещества трассирующих частиц (трассеров) с плазмой, влиянием свечения разряда на получаемые изображения, и т. д.

Экспериментально методом цифрового трассирования исследованы нестационарные поля скоростей, возникающие при развитии течения за ударными (взрывными) волнами, инициированными импульсным поверхностным разрядом, скользящим по поверхности диэлектрика на стенке разрядной камеры прямоугольного сечения [1]. Два плазменных листа инициировались симметрично на верхней и нижней стенках разрядной камеры, имеющей сечение 24×48 мм² (в плоскости YOZ на рис. 1). Боковые стенки камеры образованы плоскопараллельными кварцевыми окнами длиной 170 мм, дающими возможность оптического исследования течения по всему сечению. Площадь зоны поверхностного разряда — 30×100 мм² (в плоскости XOY на рис. 1) при поперечном размере камеры 48 мм. Средняя толщина плазменного листа составляла ~ 0.5 мм при давлении в экспериментах $(2 \div 4) \times 10^4$ Па [1]. Область разряда состоит из каналов, направленных перпендикулярно стёклам камеры. Каналы развивались за время ~ 30 нс, их плотность на поверхности составляла около 1 канала на 1 мм длины плазменного листа [1].

При давлении выше 10^4 Па на поверхности плазменного листа формируются отдельные каналы повышенной интенсивности, характеризующиеся более ярким видимым свечением (рис. 1). Длительности свечения плазменных каналов разряда в зависимости от их интенсивности может составлять от десятков наносекунд до нескольких микросекунд [1], время энерговклада (протекания тока разряда) не превышает 200 нс.

В качестве трассеров PIV-системы использовались частицы оксида титана размером менее 1 мкм. Поскольку разряд инициировался при давлении ниже атмосферного, была разработана специальная процедура заполнения исследуемой области частицами и поддержания необходимой плотности частиц. Перед на-

*E-mail: znamen@phys.msu.ru

†E-mail: sysoev@phys.msu.ru

‡E-mail: murs_i@physics.msu.ru

§E-mail: ivanovmai@gmail.com

¶E-mail: zoond@mail.ru

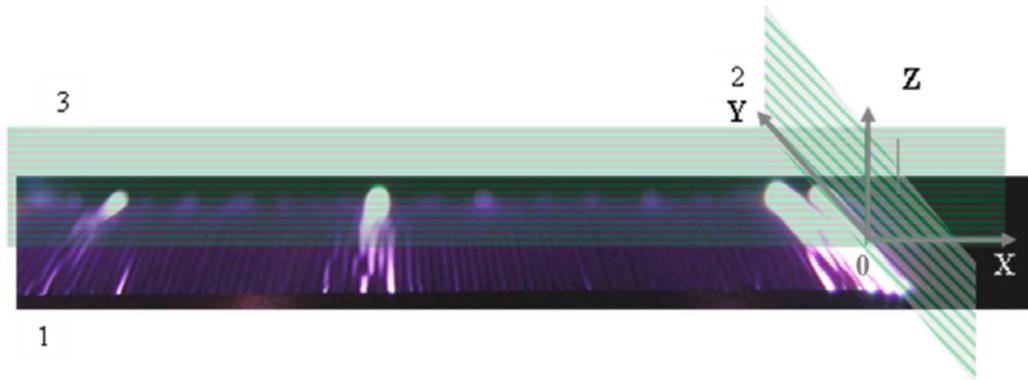


Рис. 1: Фотоизображение каналов поверхностного разряда в неподвижном воздухе при давлении 2×10^4 Па (вид под углом к плоскости XOY) (1) и два положения лазерного ножа в экспериментах (2, 3).

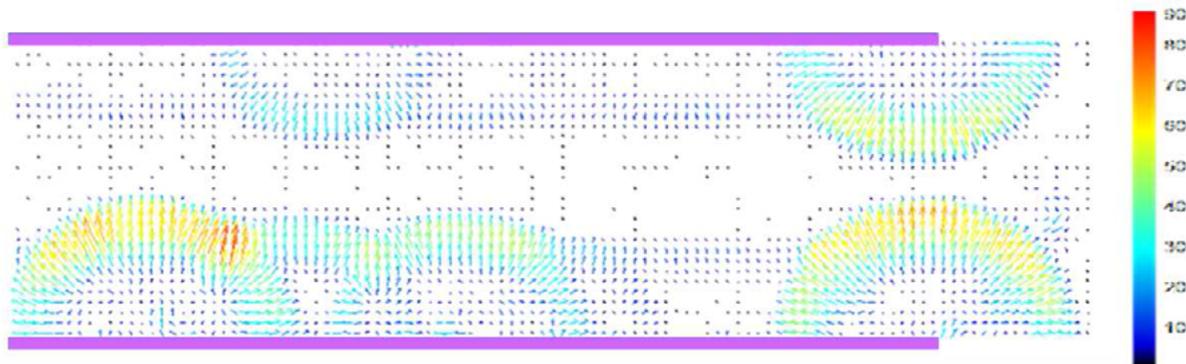


Рис. 2: Поле скорости течения через 18 мкс после разряда. Давление $3,1 \times 10^4$ Па. Длина области разряда на изображении 65 мм. Значения на шкале скоростей приведены в метрах в секунду

чалом каждого эксперимента производился засев разрядной камеры частицами, и затем объём откачивался до рабочего давления. Подсветка трассирующих частиц осуществлялась лазерными импульсами длительностью 6 нс; задержка между двумя импульсами варьировалась от 1 до 5 мкс. Запуск лазера был синхронизирован с инициацией разряда.

Исследования проводились при двух различных положениях лазерного ножа PIV-системы [4]. В первой конфигурации лазерный нож направлялся сквозь окна разрядной камеры вдоль линии развития плазменных каналов (в плоскости YOZ , см. 2 на рис. 1). Во второй конфигурации лазерный нож направлялся перпендикулярно каналам плазменного листа (в плоскости XOZ , см. 3 на рис. 1). Таким образом, были получены PIV-изображения вблизи разрядных каналов в двух взаимно перпендикулярных направлениях, позволяющие восстановить пространственное распределение ударно-волновых конфигураций, возникающих после инициации разряда, и соответствующих полей скорости течения.

Полуцилиндрические взрывные волны от отдельных каналов разряда взаимодействуют, образуя квазипараллельный ударно-волновой фронт [1]. На рис. 2

показано полученное PIV-методом поле скоростей за ударными волнами от поверхностного скользящего разряда в плоскости, расположенной перпендикулярно каналам разряда в центральной части разрядной камеры (параллельно кварцевым стеклам) при давлении воздуха $3,1 \times 10^4$ Па через 18 мкс после разряда. Фронты полуцилиндрических ударных волн разной интенсивности от каналов плазменного листа интерферируют друг с другом. В области каналов повышенной интенсивности ударные волны сильнее, и образуют полуцилиндрические участки,двигающиеся быстрее соседних участков фронта. В результате за огибающей ударной волной формируется течение, направленное от плазменного листа. Скорости газа за фронтом ударных волн достигают 90 м/с и достаточно хорошо согласуются с данными, полученными в результате численного моделирования на основе модели импульсного энерговклада.

На рис. 3 приведено PIV-изображение поля скорости через 20 мкс после разряда при давлении воздуха $2,9 \times 10^4$ Па, полученное при ориентации лазерного ножа вдоль интенсивного канала нижнего плазменного листа (вариант 2 на рис. 1, плоскость YOZ). Снизу распространяется ударная волна повышенной интенсивности.

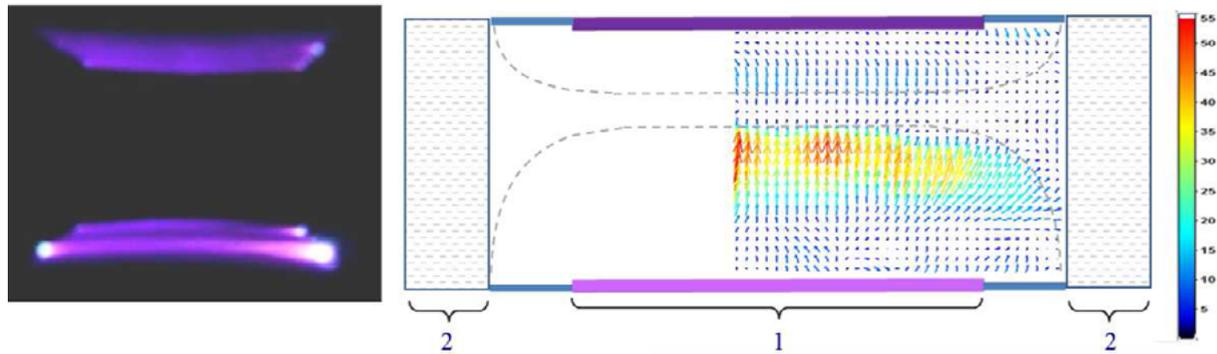


Рис. 3: Фотоизображение каналов поверхностных разрядов на стенках разрядной камеры в неподвижном воздухе, вид в плоскости YOZ (слева); поле скорости течения через 20 мкс после разряда (справа). 1 — область разряда шириной 30 мм, 2 — стёкла. Давление $2,9 \times 10^4$ Па

ности, исходящая от интенсивного разрядного канала; сверху — слабая ударная волна от верхнего разрядного канала нормальной интенсивности. Формирующийся вдоль разрядного канала фронт ударной волны параллелен верхней и нижней поверхностям (по которым скользят каналы). Поля скоростей, полученные с двух ракурсов, близки по значениям при близких значениях интенсивности свечения канала. 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 [4]. Это свидетельствует о постоянстве энерговклада по направлению распро-

странения канала. Неоднородность свечения каналов скользящего поверхностного разряда (рис. 1), очевидно, создается в основном накоплением светового потока при длительном послесвечении разряда.

Таким образом, анализ формы фронта ударных волн и распределения скорости потока за ними показывают, что мгновенный энерговклад, обеспечиваемый плазменным актуатором, однороден вдоль направления разрядных каналов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-02417 и Программы развития МГУ до 2020 г.

- [1] Знаменская И. А., Латфуллин Д. Ф., Луцкий А. Е., Мурсенкова И. В., Сысоев Н. Н. ЖТФ. **77**, № 5. С. 10. (2007).
 [2] Benard N., Zouzou N., Claverie A., Sotton J., Moreau E. J. Appl. Phys. **111**. P. 033303. (2012).
 [3] Takashima (Udagawa) K., Zuzeek Y., Lempert W. R.,

Adamovich I. V. Plasma Sources Science and Technology. **20**. P. 055009. (2011).

- [4] Глазырин Ф. Н., Знаменская И. А., Мурсенкова И. В. и др. Письма в ЖТФ. **42**, № 2. С. 16. (2016).

The formation and dynamics of the shock waves from the nanosecond actuator

I. A. Znamenskaya^a, N. N. Sysoev^b, I. V. Mursenkova^c, I. E. Ivanov^d, F. N. Glazyrin^e

Department of of Molecular Processes and Extreme Matter States, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: ^aznamen@phys.msu.ru, ^bsysoev@phys.msu.ru, ^cmurs_i@physics.msu.ru, ^divanovmai@gmail.com, ^ezoond@mail.ru.

Nonstationary velocity fields behind shock (blast) waves in air have been studied experimentally by the particle image velocimetry (PIV) technique. Shock waves have been initiated by surface sliding discharge of nanosecond duration (plasma sheet) in air at pressure of $(2-4) \times 10^4$ Pa. Analysis of the spatial distribution of flow velocities behind shock waves showed that the pulsed energy deposition is homogeneous along the discharge channels of a plasma sheet.

PACS: 47.40.Nm, 52.80.-s

Keywords: sliding surface discharge, plasma sheet, pulse energy input, blast wave.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Знаменская Ирина Александровна — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: znamen@phys.msu.ru.
2. Сысоев Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-10-97, e-mail: sysoev@phys.msu.ru.
3. Мурсенкова Ирина Владимировна — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: murs_i@physics.msu.ru
4. Иванов Игорь Эдуардович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (495) 939-27-41, e-mail: ivanovmai@gmail.com.
5. Глазырин Фёдор Николаевич — аспирант; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: zoond@mail.ru.