Параметры плазмы наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха

Мурсенкова И.В., Уланов П.Ю., Кузнецов А.Ю., Ляо Ю.

1МГУ им. Ломоносова, физический факультет; Москва, Россия, [murs\_i@physics.msu.ru](mailto:murs_i@physics.msu.ru)

Корректное определение характеристик разрядов в высокоскоростных потоках необходимо для определения механизма их воздействия на течение в задачах плазменной аэродинамики [1]. В работе представлены результаты экспериментальных исследований наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха в ударной трубе (числа Маха потока до 1.7). В разрядной камере инициировались импульсные поверхностные скользящие разряды площадью 100×30 мм2 длительностью ~300 нс [2]. Изучались характеристики разряда в сверхзвуковых потоках с плоской ударной волной и с наклонной ударной волной в разрядной камере.

Для определения параметров плазмы разряда использовались методы эмиссионной спектроскопии и данные измерений тока. Спектры излучения регистрировались при импульсном напряжении 25 кВ и токе ~1 кА. На основе экспериментальных измерений оценивались концентрация электронов, энергия электронов и напряженность электрического поля. Концентрация электронов определялась по уширению линии водорода Hα и по осциллограммам тока. Отмечено, что в неподвижном воздухе при давлениях выше 50 торр и в потоках с ударной волной в спектре наблюдается непрерывная часть. Причиной возникновения континуума, по оценкам, является тормозное излучение. Энергия электронов рассчитывалась на основе обработки континуальной части эмиссионного спектра, которая сравнивалась с теоретическим спектром, построенным для разных энергий электронов. Напряженность электрического поля рассчитывалась по отношению интенсивностей полос второй положительной системы азота N2 и первой отрицательной системы иона азота N2+. Скорости реакции излучения прямо пропорциональны плотности электронов, которые, в свою очередь, зависят от величины электрического поля.

В сверхзвуковых потоках ток наносекундного поверхностного скользящего разряда концентрируется в каналах повышенной проводимости в областях низкой плотности [2, 3]. Экспериментально показано, что спектр и динамика излучения токовых каналов определяются характером их взаимодействия с ударными волнами. Концентрация электронов в разрядных каналах превышает 1015 см-3, интенсивность излучения немонотонно изменяется со временем, длительность послесвечения может превышать 2.5 мкс [3]. Пространственная неоднородность энерговклада приводит к генерации ударных волн, возмущающих сверхзвуковой поток в канале в течение ~100 мкс после разряда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00661 с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ.

Литература.

1. A. Komuro, K. Takashima, K. Suzuki et al. Gas-heating phenomenon in a nanosecond pulse discharge in atmospheric-pressure air and its application for high-speed flow control. Plasma Sources Sci. Technol., 2018. Vol. 27, 104005.
2. Мурсенкова И.В., Ляо Ю., Иванов И.Э., Сысоев Н.Н. Характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха, обтекающем тонкий клин. Вестник МГУ, Сер. 3. Физика. Астрономия. 2019. № 3. C. 54-60.
3. Mursenkova I.V., Kuznetsov A.Yu., and Sazonov A.S. Unsteady interaction of nanosecond surface sliding discharge with plane shock wave. Appl. Phys. Lett., 2019. Vol. 115, No 11. 114102.
4. **Список авторов**
5. Мурсенкова И.В., РФ, Москва, МГУ, физический факультет, E-mail: [murs\_i@physics.msu.ru](mailto:murs_i@physics.msu.ru)
6. Уланов П.Ю., РФ, Москва, МГУ, физический факультет, E-mail: ulapavel@icloud.com
7. Кузнецов А. Ю., РФ, Москва, МГУ, физический факультет, E-mail: kuznecov.alexander15@gmail.com
8. Ляо Ю., РФ, Москва, МГУ, физический факультет, E-mail: 565164346@qq.com

**Plasma parameters of a nanosecond surface sliding discharge in a supersonic air flow**

Mursenkova I.V., Ulanov P.Yu., Kuznetsov A.Yu., Liao Yu.

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics; 119991 Moscow, Leninskie Gory; E-mail:* [*murs\_i@physics.msu.ru*](mailto:murs_i@physics.msu.ru)

A correct monitoring of the characteristics of gas discharges in high-speed flows is necessary to determine the mechanism of their influence on airflows in plasma aerodynamics [1]. The paper presents the results of experimental study of a nanosecond surface sliding discharge in supersonic airflows in a shock tube (the Mach number of the flow is up to 1.7). In the discharge chamber, pulsed surface sliding discharges with an area of ​​100×30 mm2 with a duration of ~300 ns were initiated [2]. The discharge parameters were determined in supersonic flows with a plane shock wave and with an oblique shock wave.

To determine the parameters of the discharge plasma, we used the methods of emission spectroscopy and the current measurements. The emission spectra were recorded at a pulse voltage of 25 kV and a current of ~1 kA. The electron concentration, the electron energy, and the electric field strength in the plasma were estimated on the experimental measurements. The electron concentration was determined from the broadening of the hydrogen Hα line and from the current waveforms. It is noted that in stationary air at pressures above 50 Torr and in flows with a shock wave, a continuous part is observed in the spectrum. The reason for the continuum is bremsstrahlung, according to estimations. The electron energy was calculated on the base of processing the continual part of the emission spectrum, which was compared with the theoretical spectrum calculated for different electron energies. The electric field strength was calculated from the ratio of the intensities of the bands of the second positive system of nitrogen N2 and the first negative system of the nitrogen ion N2 +. The reaction rates of radiation are directly proportional to the density of electrons, which, in turn, depend on the electric field strength.

In supersonic flows, the current of a nanosecond surface sliding discharge is concentrated in the channels of high conductivity in the regions of low density [2, 3]. It has been shown experimentally that the spectra and dynamics of the radiation of discharge channels are determined by their interaction with shock waves. The concentration of electrons in the discharge channels exceeds 1015 cm – 3. The radiation intensity varies no monotonically with time, and the afterglow duration can exceed 2.5 μs [3]. The spatial inhomogeneity of the energy input leads to the generation of shock waves that influence the supersonic flow in the channel for ~ 100 μs after the discharge.

The Russian Foundation for Basic Research supported the work (Grant No. 19-08-00661). This study was supported by the Program for development of the Moscow State University up to 2020.

**References**

1. A. Komuro, K. Takashima, K. Suzuki et al. Gas-heating phenomenon in a nanosecond pulse discharge in atmospheric-pressure air and its application for high-speed flow control. Plasma Sources Sci. Technol., 2018. Vol. 27, 104005.
2. I.V. Mursenkova, Yu. Liao, I.E. Ivanov, and N.N. Sysoev. The Characteristics of a Nanosecond Surface Sliding Discharge in a Supersonic Airflow Flowing around a Thin Wedge. Moscow University Physics Bulletin. 2019. Vol. 74, No. 3, pp. 269–276.
3. Mursenkova I.V., Kuznetsov A.Yu., and Sazonov A.S. Unsteady interaction of nanosecond surface sliding discharge with plane shock wave. Appl. Phys. Lett., 2019. Vol. 115, No 11. 114102.

**List of authors**

1. Mursenkova I.V., RF, Moscow, MSU, Faculty of Physics, E-mail: murs\_i@physics.msu.ru
2. Ulanov P.Yu., RF, Moscow, MSU, Faculty of Physics, E-mail: ulapavel@icloud.com
3. Kuznetsov A.Yu., RF, Moscow, MSU, Faculty of Physics, E-mail: kuznecov.alexander15@gmail.com
4. Liao Yu., RF, Moscow, MSU, Faculty of Physics, E-mail: 565164346@qq.com