

03.3

## Излучение наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковом потоке воздуха

© И.В. Мурсенкова, А.Ф. Зиганшин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: murs\_i@physics.msu.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 31 января 2024 г.

Принято к публикации 1 февраля 2024 г.

Экспериментально исследовано излучение поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с наклонной ударной волной в ударной трубе при числах Маха потока 1.20–1.60 и плотности 0.01–0.50 kg/m<sup>3</sup>. Разряд с длительностью тока около 500 ns инициировался в рабочей секции ударной трубы при импульсном напряжении 25 kV. Излучение разряда анализировалось на основе разверток и девятикадровых изображений с наносекундным разрешением. Установлено, что в сверхзвуковых потоках излучение разрядного канала на временном интервале 2–3 μs после окончания тока спадает ступенчато (в две стадии) и затем затухает со временем 800–1300 ns, значительно большим времени затухания в однородном воздухе.

**Ключевые слова:** наносекундный поверхностный скользящий разряд, сверхзвуковой поток, динамика излучения, электронно-оптическая камера.

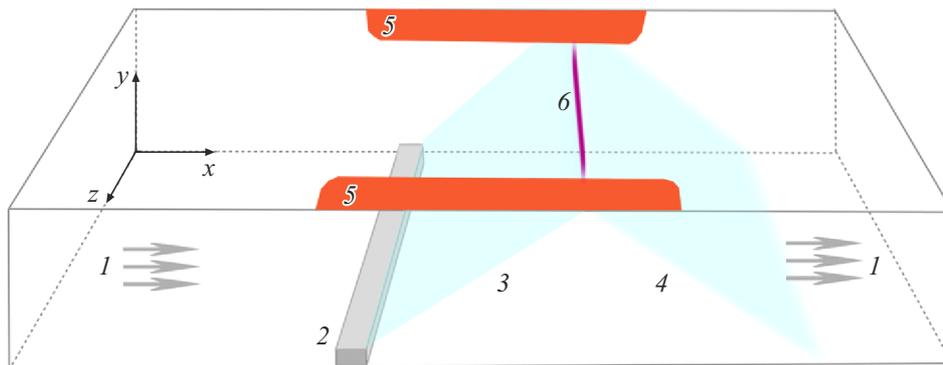
DOI: 10.61011/PJTF.2024.10.57702.19791

В последние десятилетия широко обсуждается применение электрических разрядов в задачах аэродинамики в качестве плазменных актуаторов, которые могут применяться для управления потоком газа [1–4] и горением топлива в двигателях [5]. К преимуществам плазменных актуаторов относятся высокое быстродействие и хорошая интегрируемость в сложные течения. Актуаторы на основе поверхностных разрядов рассматриваются как перспективные устройства для управления пограничными слоями [1,3,4]. Импульсные разряды генерируют также ударные волны, которые могут влиять и на поток в целом, и на пограничный слой, локальные скачки уплотнения, отрывные зоны [4,6]. Измерение параметров разрядов непосредственно в высокоскоростных потоках необходимо выполнять для прогнозирования конкретного воздействия на поток. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование динамики свечения поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с наклонной ударной волной, а также оценка характерных времен процессов в релаксирующей плазме.

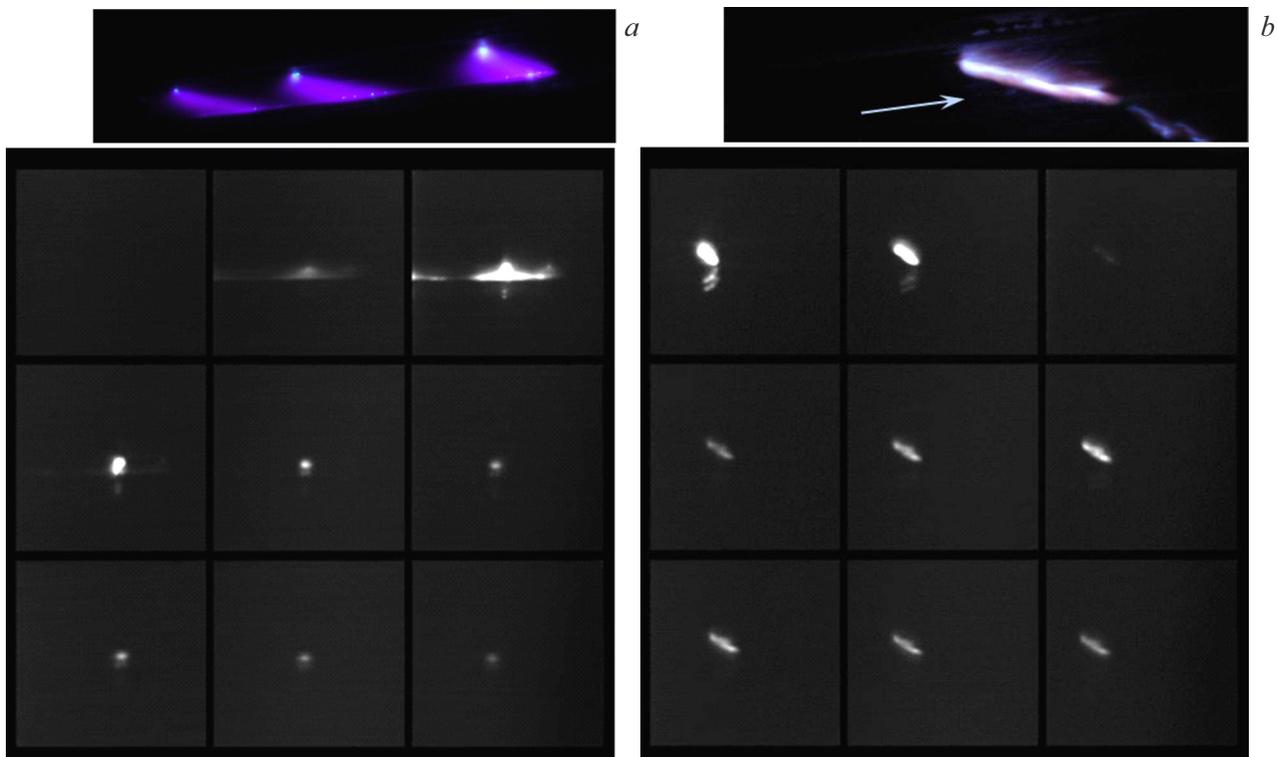
Экспериментальные исследования проводились на ударной трубе с разрядной камерой прямоугольного сечения 24 × 48 mm<sup>2</sup> [4,6]. При начальном давлении воздуха 10–50 Torr на установке реализовались однородные сверхзвуковые потоки воздуха длительностью 200–600 μs с числами Маха 1.20–1.60 при плотности 0.01–0.50 kg/m<sup>3</sup>. Скорость ударных волн измерялась с помощью сигналов датчиков давления, запуск разряда синхронизировался с положением фронта исходной ударной волны в канале ударной трубы (числа Маха 2.50–4.40). Приложение импульсного напряжения 25 kV к электродам на верхней стенке рабочей секции (рис. 1)

инициировало поверхностный скользящий разряд. Ток разряда регистрировался малоиндуктивным шунтом. Осциллограммы тока имели колебательный характер с максимальным значением до 1500 А и затуханием, зависящим от плотности газа. Максимум тока наблюдался через 30 ns, колебания тока затухали в течение 500–700 ns. Приведенное электрическое поле  $E/N$  ( $E$  — напряженность,  $N$  — концентрация молекул) оценивалось в пределах  $(2–10) \cdot 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ .

Протяженность электродов разряда была 100 mm в направлении потока. При сверхзвуковом обтекании прямоугольного параллелепипеда, расположенного на нижней стенке рабочей секции, создавалась наклонная ударная волна, отражающаяся от верхней стенки (рис. 1). При этом разряд развивался в виде одиночного прямолинейного интенсивного канала (рис. 2, b). Локализация разряда в одиночный канал связана с формированием области пониженной плотности в пограничном слое потока на верхней стенке, в которой реализуется повышенное значение приведенного электрического поля [7]. Концентрация электронов, рассчитанная по максимальному току в канале, достигает  $(1–6) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . В спектре излучения основная часть определяется второй положительной системой азота ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) и присутствует континуум [7]. Свечение разряда регистрировалось через боковые кварцевые стенки рабочей секции фото- и электронно-оптическими камерами (K008, K011 [8]). Диапазон спектральной чувствительности электронно-оптических камер 380–850 nm. Камеры располагались под углом к плоскости разряда. Запуск камер осуществлялся при подаче сигнала генератора для инициирования разряда. Обработка разверток и девятикадровых изображений свечения проводилась с помощью программы



**Рис. 1.** Схема течения в канале разрядной камеры. 1 — сверхзвуковой поток, 2 — препятствие, 3 — наклонная ударная волна, 4 — отраженная ударная волна, 5 — электроды разряда, 6 — разрядный канал.



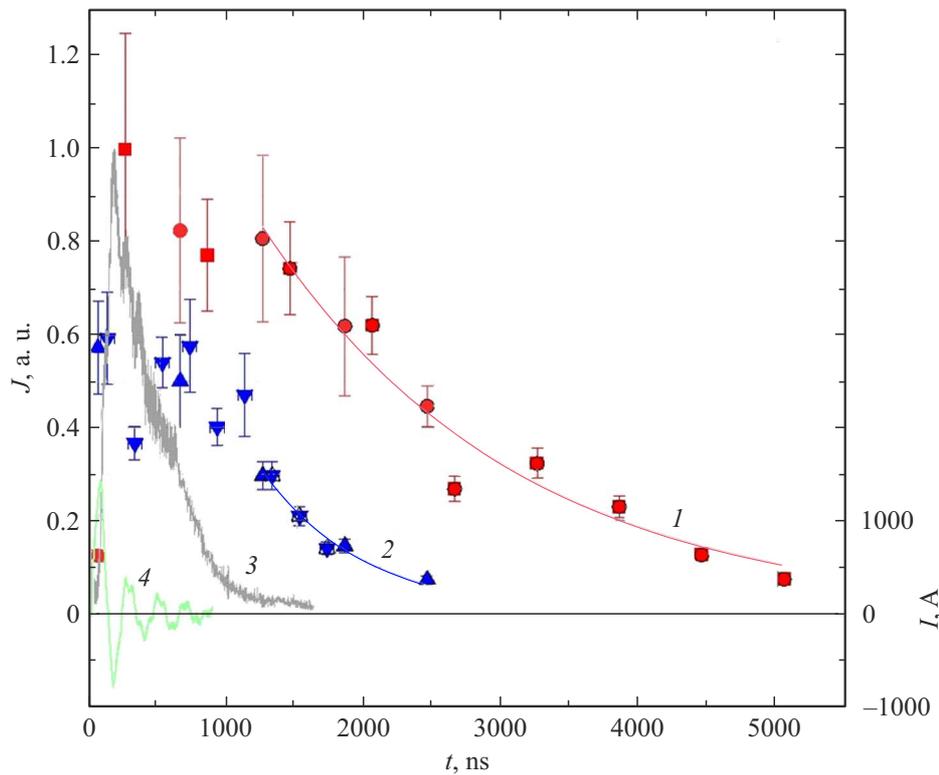
**Рис. 2.** Фотоизображения (вверху) и девятикадровые изображения (внизу) свечения поверхностного скользящего разряда в неподвижном воздухе при плотности  $0.02 \text{ kg/m}^3$  (a) и в потоке с наклонной ударной волной (b). Число Маха потока 1.55, плотность  $0.08 \text{ kg/m}^3$ . Направление потока показано стрелкой. На девятикадровых изображениях экспозиция кадра 100 ns, пауза между кадрами 100 ns.

сканирования, написанной в среде Matlab. Выбиралась прямоугольная область обработки, определялось среднее значение интенсивности и сопоставлялось времени. По полученным значениям строились временные зависимости интенсивности свечения разряда. Время затухания определялось на завершающей стадии свечения путем экспоненциальной аппроксимации спада интенсивности.

На рис. 2, a на фотоизображении разряда в неподвижном воздухе видно свечение плазменного слоя, состоя-

щего из диффузных и ярких каналов. Временная зависимость интенсивности яркого канала (кривая 3 на рис. 3) показывает корреляцию излучения с осцилляциями тока и дальнейшее затухание с временем 100–350 ns [6]. Свечение плазмы после завершения тока связано со столкновениями молекул азота в метастабильных состояниях и заселением состояния  $C^3\Pi_u$  [6].

Эксперименты в сверхзвуковых потоках с числами Маха 1.20–1.60 показали, что свечение одиночного разрядного канала имеет большую интенсивность и дли-



**Рис. 3.** Временные зависимости интенсивности свечения разрядного канала в сверхзвуковых потоках (1, 2) и яркого канала в неподвижном воздухе (3). 4 — ток разряда в неподвижном воздухе. Плотность воздуха 0.41 (1), 0.12 kg/m<sup>3</sup> (2–4). Число Маха потока 1.25 (1), 1.46 (2). Каждая из кривых 1, 2 объединяет результаты двух экспериментов, линиями показана экспоненциальная аппроксимация.

тельность до 6  $\mu$ s. Высокая повторяемость результатов регистрации свечения дала возможность сопоставить зависимости, полученные на разных временных интервалах при одинаковых условиях в потоке. На рис. 3 приведены временные зависимости излучения разрядных каналов в сверхзвуковых потоках (кривые 1, 2) и в неподвижном воздухе (кривая 3). Для сравнения динамики свечения интенсивности нормированы на максимальное значение. Изменения интенсивности во время протекания тока разряда определяются осцилляциями тока. Затем в сверхзвуковых потоках, после завершения тока, на временном интервале 1500–2000 ns наблюдается стадия незначительного уменьшения интенсивности, далее происходит затухание в течение 2000–3000 ns (кривые 1, 2 на рис. 3). Определенное на этой стадии время затухания свечения разрядного канала в условиях проведенных экспериментов составило 800–1300 ns. Это время в несколько раз больше времени затухания наиболее интенсивных каналов разряда в однородном воздухе.

Динамика излучения поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках анализировалась на основе оценки временных релаксационных процессов в плазменной области. При концентрации электронов  $\sim 10^{15}$  cm<sup>-3</sup> рекомбинация зарядов происходит в течение 10 ns. Локальная температура газа в области разряда может

достигать 5000–10 000 K, как показали численные расчеты газодинамических полей при импульсном энергокладе [7]. Высокая температура приводит к быстрой релаксации колебательной энергии за время 2–10  $\mu$ s [5]. Нагрев газа в плазменной области может происходить также за счет релаксации электронно-возбужденных состояний атомов и молекул [5]. Излучение разрядного канала характеризуется высокой интенсивностью в течение микросекунд, и динамика излучения зависит от локальной плотности в потоке. Таким образом, эксперименты выявили увеличение длительности свечения разряда, связанное с его локализацией в одиночный канал. Послесвечение канала в микросекундном интервале, очевидно, связано с заселением излучающих состояний молекулярного азота, образующихся при столкновениях молекул в метастабильном состоянии  $A^3\Sigma_u^+$  [5,6]. Результаты исследования следует учитывать при разработке плазменных актуаторов для управления высокоскоростными потоками газа с ударными волнами.

### Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного в рамках Программы развития МГУ.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Komuro, K. Takashima, K. Suzuki, Sh. Kanno, T. Nonomura, T. Kaneko, A. Ando, K. Asai, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28**, 065006 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab1daf
- [2] В.М. Шибков, К.Н. Корнев, А.А. Логунов, Ю.К. Нестеренко, *Физика плазмы*, **48** (7), 657 (2022). DOI: 10.31857/S0367292122100201 [V.M. Shibkov, K.N. Kornev, A.A. Logunov, Yu.K. Nesterenko, *Plasma Phys. Rep.*, **48** (7), 806 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22700258].
- [3] I.A. Moralev, I.V. Selivonin, D.I. Tatarenkova, A.A. Firsov, D.S. Preobrazhenskii, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **52**, 304003 (2019). DOI 10.1088/1361-6463/ab1e72
- [4] I.V. Mursenkova, I.A. Znamenskaya, A.E. Lutsky, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 105201 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aaa838
- [5] N.A. Popov, S.M. Starikovskaia, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **91**, 100928 (2022). DOI: 10.1016/j.pecs.2021.100928
- [6] А.Ю. Кузнецов, И.В. Мурсенкова, П.Ю. Уланов, *Письма в ЖТФ*, **45** (24), 48 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.24.48804.17924 [A.Yu. Kuznetsov, I.V. Mursenkova, P.Yu. Ulanov, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (12), 1266 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019120228].
- [7] И.В. Мурсенкова, И.Э. Иванов, Ю. Ляо, А.Ф. Зиганшин, *Физика плазмы*, **49** (6), 600 (2023). DOI: 10.31857/S0367292123600164 [I.V. Mursenkova, I.E. Ivanov, Yu. Liao, A.F. Ziganshin, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (6), 795 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X22601468].
- [8] <https://www.vniiofi.ru/depart/r5/>