

03

## Исследование взаимодействия сверхзвукового потока воздуха с поперечным разрядом

© С.В. Бобашев<sup>1,2</sup>, В.П. Белик<sup>1</sup>, Н.А. Монахов<sup>1,2</sup>,  
М.В. Петренко<sup>1</sup>, П.А. Попов<sup>1,2</sup>, В.А. Сахаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург

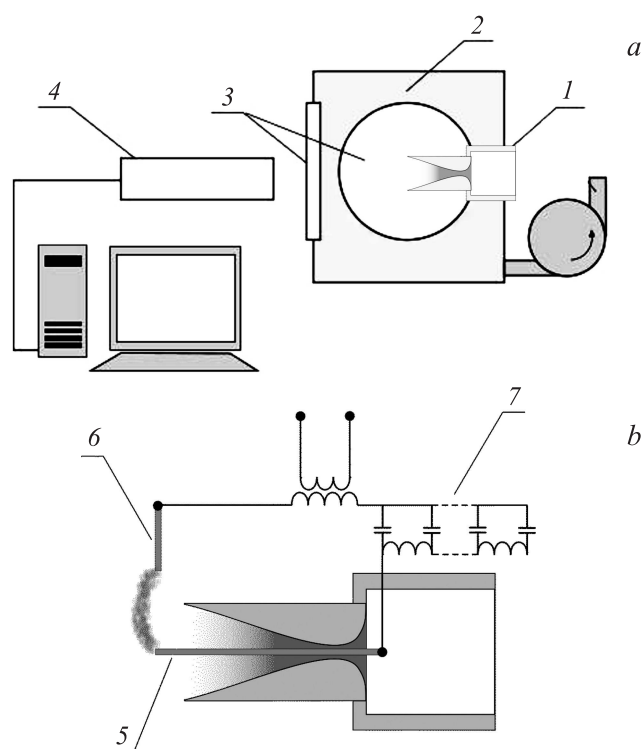
<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: pavel.popov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 2 июня 2015 г.

Проведены экспериментальные исследования взаимодействия сверхзвукового потока воздуха с поперечным разрядом. Получены спектры излучения в диапазоне длин волн 600–700 нм из различных областей потока. Определен состав и изучены особенности взаимодействия сверхзвукового потока с разрядом, обнаружен заметный вынос материала электродов газовым потоком.

Исследование взаимодействия высокоскоростных потоков газа с низкотемпературной плазмой является одним из актуальных направлений магнитоплазменной аэродинамики [1,2]. Физические процессы, происходящие при взаимодействии плазменных образований со сверхзвуковым потоком, весьма сложны и недостаточно изучены. В частности, процесс ионизации газа при больших скоростях движения имеет ряд принципиальных особенностей, вызванных выносом заряженных частиц из области сильного электрического поля.

Данная работа является продолжением цикла исследований, посвященного изучению особенностей взаимодействия сверхзвуковых течений с низкотемпературной плазмой. В работе [3] исследовалось воздействие плазмы газового разряда на структуру обтекания тела и тепловые потоки к его поверхности. Было показано, что вращающийся разряд существенно изменяет ударно-волновую конфигурацию и, как следствие, тепловые потоки к поверхности модели. Установлено, что локальные приэлектродные процессы оказывают сильное влияние на динамику разряда в целом [4]. В случае дозвуковых течений схожие



**Рис. 1.** Общая схема экспериментальной установки (а) и сверхзвуковое сопло с электродами (b).

результаты были получены в работе [5]. В работе [6] проведено исследование кратковременного взаимодействия сверхзвукового газового потока с низкотемпературной лазерной плазмой, которое показало существенное изменение структуры течения и образование ударных волн. Данная работа посвящена изучению особенностей взаимодействия сверхзвуковых струйных течений с плазмой газового разряда.

Экспериментальные исследования были проведены на импульсной газодинамической установке, построенной на базе трубы Людвига (рис. 1). Коническое сопло 1 имеет угол раствора  $60^\circ$ , диаметр

критического и выходного сечений 10 и 60 mm соответственно (рис. 1). Выходное сечение сопла расположено внутри вакуумной камеры 2 цилиндрической формы с внутренним диаметром 0.5 m и высотой 0.4 m, оборудованной форвакуумным насосом. Дозвуковая часть сопла отделена от атмосферы пластиковой диафрагмой. На боковой поверхности камеры имеются окна 3 для спектроскопической диагностики. Регистрация спектров излучения проводилась с помощью монохроматора 4, оборудованного ПЗС-линейкой и подключенного к компьютеру.

На расстоянии 20 mm от выходного сечения сопла установлена пара электродов. Центральный электрод 5 диаметром 4 mm расположен на оси сопла, второй электрод 6 — на расстоянии 20 mm от среза сопла. В качестве материала электродов использовался алюминий. Электроды подключены к импульсному источнику питания 7, представляющему собой LC-линию из 14 ячеек, каждая из которых имеет емкость  $C = 300 \mu\text{F}$  и индуктивность  $L = 3.5 \mu\text{H}$ . Данная конструкция источника позволяет получить импульс тока длительностью  $t \sim 1 \text{ ns}$ , близкий к прямоугольному. Последовательно в цепь разряда включен высоковольтный трансформатор малой индуктивности, формирующий импульс длительностью  $t \sim 10^{-6} \text{ s}$  и амплитудой до  $U \sim 30 \text{ kV}$  для инициирования газового разряда.

Перед экспериментом камера откачивается до остаточного давления  $P = 0.1 \text{ Torr}$ , что соответствует давлению в сверхзвуковой струе на срезе сопла. После разрушения диафрагмы начинается истечение атмосферного воздуха в камеру через сопло. Запуск источника питания осуществляется спустя  $t = 200 \mu\text{s}$  после разрушения диафрагмы, когда течение в сверхзвуковом сопле можно считать установившимся. В этот момент на центральный и внешний электроды подается высоковольтный иницирующий импульс, формирующий начальную область разряда. Далее через сформированный канал в течение времени  $t \approx 1 \text{ ns}$  происходит разрядка основной батареи. В настоящих экспериментах напряжение на источнике питания варьировалось в диапазоне  $U = 300\text{--}600 \text{ V}$ , а ток в цепи разряда достигал  $I = 1.7 \text{ kA}$ . Суммарная энергия, вкладываемая в разряд за время импульса, варьировалась в пределах  $Q = 250\text{--}700 \text{ J}$  в зависимости от начального напряжения на источнике.

На основе моделирования невязкого течения в сопле были рассчитаны параметры сверхзвуковой струи воздуха в плоскости среза сопла. Число Маха составляет величину  $M \approx 5.5$ , давление  $P \approx 0.1 \text{ Torr}$ .

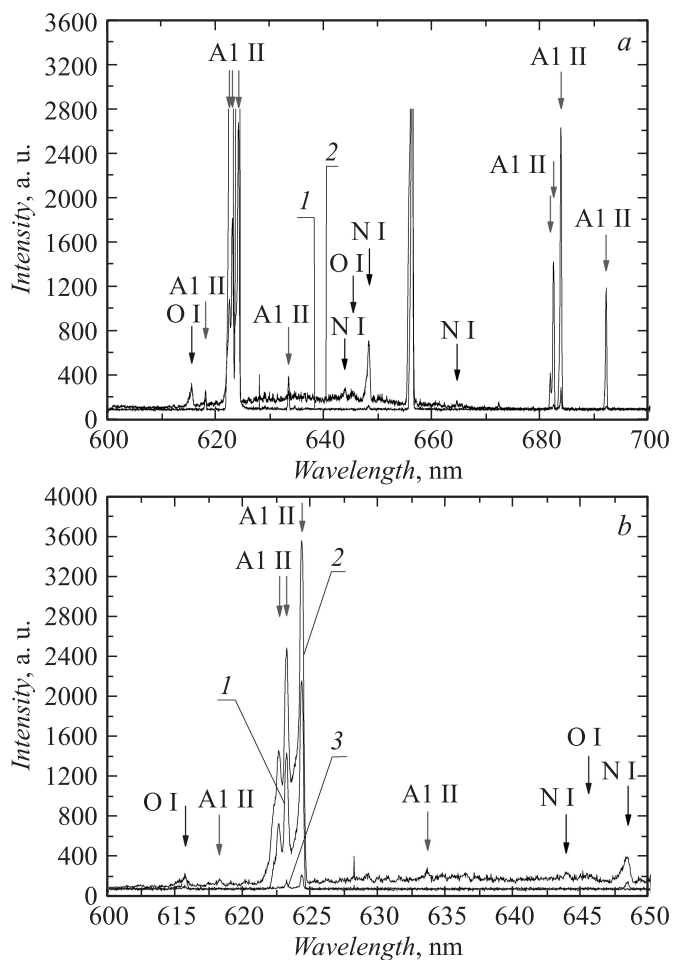
По результатам расчета за время горения разряда ( $t \approx 1$  ms) давление в вакуумной камере повышается не более чем в 2 раза. При таком соотношении давлений не происходит отрыва сверхзвукового потока в сопле, а его структура близка к расчетной.

В данной работе особенности взаимодействия сверхзвуковой струи с разрядом исследовались при помощи спектроскопической диагностики в видимом диапазоне длин волн. Регистрировались спектры излучения из областей на расстоянии 30, 50, 70 и 90 mm (область I–IV соответственно) от среза сопла и лежащих на линии, расположенной посередине между электродами.

Регистрация спектров осуществлялась с помощью монохроматора, построенного по схеме Сейя–Намиока, оснащенного ПЗС-линейкой TOSHIBA TCD1304DG. Применение ПЗС-линеек данного типа в спектральных приборах для исследования импульсных источников излучения исследовалось в работе [7]. Минимальное время накопления заряда для данного типа линеек составляет  $t \approx 20$  ms, что в данном случае позволяет регистрировать только интегральные по времени спектры излучения. За одно измерение регистрировались участки спектра шириной  $\Delta\lambda \approx 100$  nm. Обратная линейная дисперсия используемого спектрального прибора с решеткой  $1200 \text{ mm}^{-1}$  составляет величину  $1.9 \text{ nm/mm}$ . Калибровка спектрометра по длинам волн производилась по линиям Ne I из базы данных NIST Atomic Spectra Database [8], при этом погрешность определения длины волны во всем регистрируемом диапазоне составила  $\Delta\lambda < 0.01$  nm.

В работе представлены результаты экспериментов при сверхзвуковом истечении газа из сопла и условиях неподвижного газа в вакуумной камере при давлениях  $P = 0.1$  и  $10$  Torr. Регистрация спектров излучения производилась в диапазоне длин волн  $\lambda = 600\text{--}700$  nm. Такой выбор диапазона обусловлен особенностями применяемого спектрального прибора, а также присутствием в нем небольшого количества линий излучения материала электродов (Al) и линий газов (N, O).

На рис. 2 представлены спектры излучения из различных областей в условиях неподвижного газа и сверхзвукового потока. Наличие сильных линий излучения ионов  $\text{Al}^+$  (длины волн Al II  $\lambda = 622.62$ ,  $623.17$  и  $624.34$  nm) говорит о заметном поступлении материала электродов в область разряда. Их интенсивность в сверхзвуковом потоке значительно уменьшается при увеличении расстояния до среза сопла и существенно превосходит интенсивность данных линий при разряде в



**Рис. 2.** Спектры излучения: *a* — из области I (спектр 1) и области II (спектр 2) в случае сверхзвукового потока; *b* — из области III в случае стационарного газа при давлении  $P = 0.1$  и 10 Торр (спектр 1 и 3) и в случае сверхзвукового потока (спектр 2).

стационарном газе при давлении  $P = 0.1$  Torr. Также следует отметить, что с изменением расстояния от среза сопла изменяются отношения интенсивностей излучения в линиях ионов Al II, что может быть связано с изменением температуры вещества в потоке.

На полученных спектрах можно выделить линии возбужденных атомов O I ( $\lambda = 615.82$  nm) и N I ( $\lambda = 648.27$  nm). Следует отметить, что данные линии появляются только на некотором расстоянии от среза сопла (область II–IV), а их интенсивность с увеличением расстояния спадает незначительно.

В случае сверхзвукового потока в областях II–IV наблюдается излучение в непрерывном спектре с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 640$  nm. Исходя из предположения о тепловом характере данного излучения, температура, соответствующая максимуму интенсивности, по нашей оценке составляет величину  $T \approx 0.4$  eV. Отметим, что в случае неподвижного газа с давлением  $P = 0.1$  Torr излучение в непрерывном спектре не наблюдается.

Проведена оценка температуры по относительной интенсивности излучения пары спектральных линий, принадлежащих одному иону [9]. Для области II рассматривались линии ионов Al II с длинами волн  $\lambda = 683.71$  и  $691.99$  nm, а также линии возбужденных атомов N I с  $\lambda = 664.49$  и  $672.26$  nm. В первом случае температура составила  $T = 0.13$  eV, а во втором случае  $T = 0.29$  eV. Для областей III и IV оценка проводилась по относительной интенсивности излучения линий Al II. В области III температура  $T = 0.22$  eV, в области IV —  $T = 0.27$  eV. Таким образом, усредненная по времени температура на удалении 50–90 mm от среза сопла составляет величину  $T = 0.1–0.3$  eV.

Разряд развивается в воздушной среде с концентрацией частиц  $N \sim 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, при этом плотность тока разряда в канале достигает величины  $j \sim 10^3$  A/cm<sup>2</sup> [4]. При таких условиях ионную компоненту плазмы составляет материал электродов, поступающий из локализованных на поверхности катода эмиссионных центров малого размера с плотностью тока до  $j \sim 10^7$  A/cm<sup>2</sup>, а ток обусловлен термоавтоэлектронной эмиссией [10]. По результатам оценки концентрация электронов в канале разряда составляет величину  $N_e \sim 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>, большая плотность тока при этом обусловлена низкой частотой столкновений электронов с молекулами газовой среды, что приводит к слабой ионизации потока воздуха. Подтверждением данных фактов служит

отсутствие в спектре излучения плазмы разряда в воздушном потоке (область I) линий ионов  $N^+$  и выше, а также интенсивное излучение в линиях ионов  $Al^+$ .

Полученная спектральная картина излучения позволяет сделать вывод о том, что область разряда сносится набегающим потоком и осуществляется заметный вынос материала электродов на расстояние, сравнимое с поперечным размером сверхзвуковой струи. Отсутствие в спектрах излучения из областей, удаленных от среза сопла на расстоянии 50–90 мм, линий, соответствующих ионам азота и кислорода, а также свечение в непрерывном спектре с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 640$  нм говорит о том, что происходит нагрев сверхзвукового потока без его заметной ионизации.

## Список литературы

- [1] *Starikovskiy A., Aleksandrov N.* // Aeronautics and Astronautics / Mulder M. (ed.). InTech, 2011.
- [2] *Adamovich I.V.* // Encyclopedia of Aerospace Engineering. John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [3] *Бобашев С.В., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 12. С. 51–56.
- [4] *Бобашев С.В., Менде Н.П., Монахов Н.А., Сахаров В.А.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 12. С. 29–32.
- [5] *Клементьева И.Б., Битюрин В.А., Толкунов Б.Н., Моралев И.А.* // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49. № 6. С. 816–825.
- [6] *Гарбарук А.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 21. С. 97–103.
- [7] *Белик В.П., Петренко М.В., Савушкин А.В.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 21. С. 102–110.
- [8] NIST Atomic Spectra Database // <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>
- [9] *Очкин В.Н.* Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2010. 592 с.
- [10] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: ИД „Интеллект“, 2009. 736 с.