

03;04

## **Взаимодействие СВЧ-излучения с эрозионной плазменной струей**

© В.Г. Бровкин, А.С. Пащина, Н.М. Рязанский

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва  
E-mail: fgkach@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2016 г.

Представлены результаты исследований взаимодействия мощного импульсного СВЧ-излучения с плазменной струей, формируемой с помощью разряда в капилляре с аблирующей стенкой. Обнаружено существенное влияние импульса СВЧ-излучения на картину течения плазменной струи. В зависимости от уровня начального возмущения струи возможны различные сценарии его эволюции вниз по потоку: затухание либо усиление, сопровождающееся развитием турбулентности, вплоть до прерывания течения при превышении определенного порога энергетического воздействия. Обнаружено существенное влияние плазменной струи и ее состояния на пространственное положение зоны выделения энергии СВЧ-импульса.

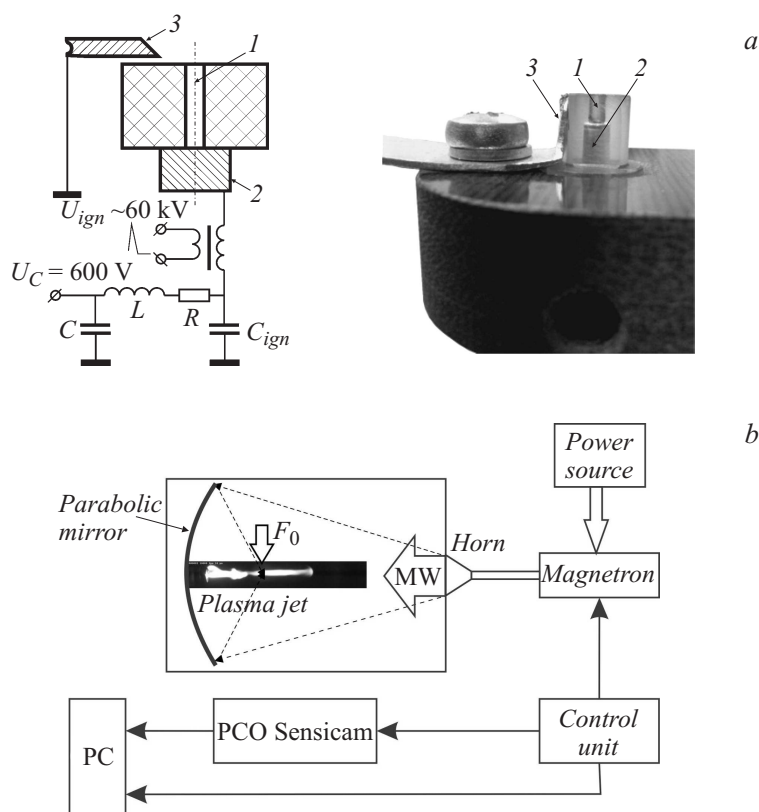
Взаимодействие СВЧ-разряда с газоплазменными течениями является одной из важных проблем магнитоплазменной аэродинамики. Несомненным достоинством данного вида разряда является возможность управления параметрами, конфигурацией и местом пространственной локализации зоны энергетического выделения путем изменения параметров СВЧ-излучения и системы его фокусировки. Эффективность воздействия на свойства набегающего потока убедительно показали эксперименты, в которых зажигание СВЧ-разряда в окрестности обтекаемого тела приводило к существенной деформации присоединенной ударной волны и снижению силы сопротивления [1]. В дальнейшем изучались комбинированные разряды, посредством которых удалось существенно понизить порог СВЧ-пробоя и обеспечить локализацию разряда в требуемой области пространства. Здесь для инициации СВЧ-разряда использовалась лазерная или импульсная высоковольтная искра [2].

Весьма интересным способом организации комбинированного разряда является применение тонкой плазменной струи, создаваемой посредством импульсного капиллярного разряда [3]. В принципе, такая

плазменная струя может также использоваться для эффективного управления параметрами сверхзвукового потока [4] с одновременной инициацией и существенным понижением порога СВЧ-пробоя. Более того, мощное СВЧ-излучение может оказывать влияние на газодинамические и плазменные свойства самой струи (в частности, на ее устойчивость), что может представлять самостоятельный методический и научный интерес для изучения динамики струйных течений [5,6] при внешнем дистанционном воздействии. Важным аспектом такого взаимодействия является возможность модификации параметров плотной плазмы, что в настоящее время вызывает повышенный интерес в связи с проблемой создания окон радиопрозрачности в условиях гиперзвукового полета [7]. Поэтому основной целью наших экспериментов было определение круга явлений, возникающих при взаимодействии плазменной струи с мощным СВЧ-излучением, что, на наш взгляд, представляет несомненный интерес для различных приложений.

Объектом наших исследований являлась плазменная струя, формируемая с помощью импульсного разряда в капилляре с аблирующей стенкой (материал — полиметилметакрилат), параметры и режимы которого детально изучены в предыдущих наших работах [3,8]. Начальный диаметр капилляра составляет 1 мм, длина — 4 мм. В ходе экспериментов изучалось два режима течения плазменной струи — дозвуковой и сверхзвуковой — с существенно различными значениями скорости струи, продолжительности ее существования и мощности разрядного импульса. Типичные значения указанных параметров для дозвуковой и сверхзвуковой струй соответственно составляют: скорость фронта струи  $v_{sub} \sim 30$  м/с и  $v_{sup} \sim 300$  м/с, длительность разрядного импульса  $t_{sub} = 9$  мс и  $t_{sup} = 1$  мс, пиковая мощность разряда  $P_{sub} \approx 10$  кВт и  $P_{sup} \approx 80$  кВт. Выбор параметров разряда ограничен условием установления ламинарного течения, при котором достигается наибольшая длина (10–20 см) плазменной струи. Причем в сверхзвуковом режиме пиковая мощность разряда выбрана несколько ниже порогового значения, превышение которого сопровождается развитием турбулентности и резким сокращением длины ламинарного участка, что позволяет повысить „чувствительность“ струи к воздействию импульса СВЧ-излучения.

Капиллярный разрядник (рис. 1, а) устанавливался в металлической камере (диаметр 0,5 м, длина 1 м), в которую через торцевой фланец осуществляется ввод СВЧ-излучения (мощность  $W \approx 600$  кВт, длина волны  $\lambda = 2,3$  см, длительность импульса  $\tau = 8$  мкс), для фокусировки



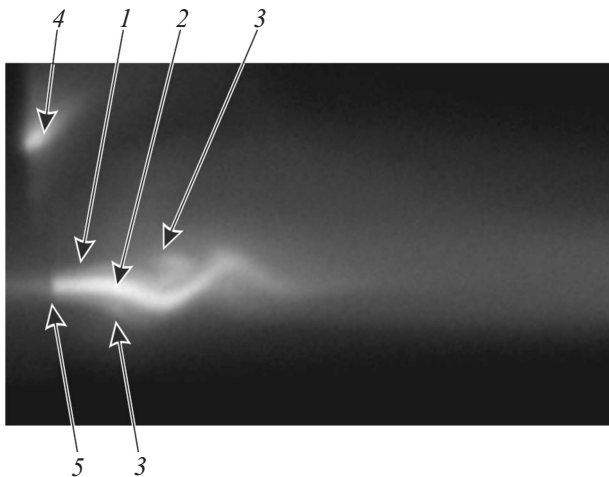
**Рис. 1.** Схема и фото капиллярного разрядника (а) и схема экспериментальной установки (б): 1 — капилляр, 2 — внутренний электрод, 3 — наружный электрод,  $F_0$  — положение фокального пятна.

которого используется параболическое зеркало (рис 1, б). Напряженность электрического поля в фокальном пятне составляет примерно  $E \sim 3 \text{ kV/cm}$ , что существенно ниже порога зажигания самостоятельного СВЧ-разряда при атмосферном давлении. При выборе пространственного положения разрядника добивались совмещения оси плазменной струи с главной осью фокусирующей системы. Для совмещения средней части струи с фокальной областью СВЧ-излучения и предотвращения

инициации СВЧ-разряда на металлических деталях капиллярного разрядника последний размещался на определенном удалении от фокального пятна. При этом расстояние между центром фокального пятна и срезом капилляра было выбрано равным 6 см и не изменялось в ходе экспериментов.

Исследование взаимодействия СВЧ-излучения с плазменной струей проведено при различных задержках СВЧ-импульса относительно момента зажигания капиллярного разряда. Для регистрации временной эволюции плазменной струи в целом использовалась скоростная видеокамера Motion Pro N3 (длительность экспозиции —  $1 \mu\text{s}$ , частота кадров 10 kHz). Для детального изучения начальной стадии взаимодействия применялась однокадровая камера PCO Sensicam (длительность экспозиции — от 100 ns), допускающая возможность синхронизации кадра относительно начала СВЧ-импульса и момента зажигания капиллярного разряда, что позволяет проследить динамику взаимодействия как в течение СВЧ-импульса, так и в моменты времени, предшествующие его подаче и после его завершения.

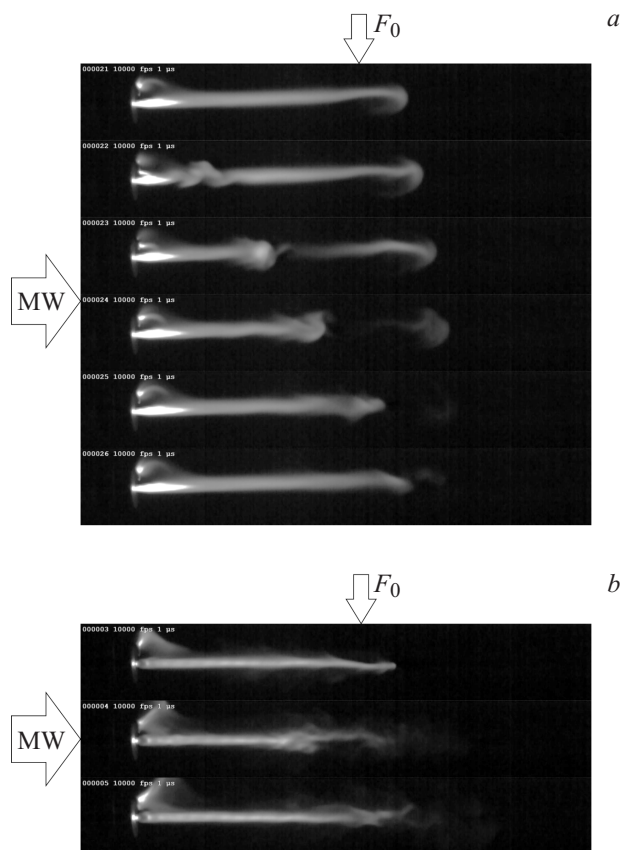
Включение импульса СВЧ-излучения приводит к возмущению плазменной струи, кардинально изменяющему всю последующую картину течения. Многочисленные пуски показали, что в момент включения СВЧ-импульса возмущению подвергается ограниченный (сильно проводящий) участок струи, отстоящий на расстоянии 1–3 см от среза капилляра, в окрестности которого, по-видимому, поглощается основная доля энергии импульса СВЧ-излучения. Более сильному воздействию подвержены дозвуковые струи, для которых скорость плазмы на срезе капилляра не превышает 150–200 м/с. Для таких струй включение СВЧ-импульса приводит к деформации начального участка (длиной около 10–15 мм), ядро которого принимает форму, близкую к синусоиде, а на периферии наблюдается формирование упорядоченных вихревых структур (рис. 2). Интервал времени между моментом включения СВЧ-импульса и началом заметной деформации не превышает  $2 \mu\text{s}$ , и к концу СВЧ-импульса (примерно за  $1–2 \mu\text{s}$  до его окончания) амплитуда деформации и размеры вихревых структур достигают максимальных значений. Основные черты такой картины течения качественно сохраняются в течение продолжительного интервала времени — на протяжении оставшейся части СВЧ-импульса (примерно  $2 \mu\text{s}$ ) и в течение 20–30  $\mu\text{s}$  после его окончания. По истечении указанного интервала времени становится заметным дрейф возмущения вниз по потоку, вызванный поступлением новых порций плазмы из капилляра, вследствие чего



**Рис. 2.** Картина течения дозвуковой плазменной струи, соответствующая моменту времени  $t = 6 \mu\text{s}$  после подачи СВЧ-импульса: 1 — граница струи, 2 — высокотемпературное ядро, 3 — вихри, 4 — факел наружного электрода, 5 — срез капилляра, время задержки СВЧ-импульса  $\tau_d = 3 \mu\text{s}$ , длительность экспозиции  $\tau_{exp} = 100 \text{ ns}$ .

амплитуда деформации начального участка плавно убывает, а полное восстановление его исходной формы наступает примерно через  $50 \mu\text{s}$  после выключения СВЧ-импульса.

Последующая эволюция возмущения развивается по двум основным сценариям, соответствующим его усилению или затуханию. Начальная стадия первого сценария характеризуется дальнейшим увеличением поперечных размеров и трансформацией возмущенного участка, форма которого по мере эволюции все далее отклоняется от синусоидальной (см. кадр 2 на рис. 3, *a*). Трансформация затрагивает и вихревые структуры, размеры которых уменьшаются по сравнению с первоначальными, что, по-видимому, обусловлено их нелинейным взаимодействием [5,6]. Завершение данного сценария характеризуется кардинальной перестройкой течения, результирующая картина которого зависит от скорости потока. Для дозвуковых струй усиление возмущения, как правило, заканчивается прерыванием исходного потока и образованием в месте разрыва контактной границы, разделяющей участки струи,



**Рис. 3.** Динамика течения дозвуковой (*a*) и сверхзвуковой (*b*) плазменной струи после воздействия импульсом СВЧ-излучения: *a* —  $t_d = 2$  ms, *b* —  $t_d = 200$   $\mu$ s, частота кадров 10 kHz, стрелка  $F_0$  — положение фокального пятна.

расположенные до и после разрыва (рис. 3, *a*). Скорость контактной границы в момент ее образования оказывается сравнимой (несколько ниже) со скоростью плазмы внутри струи, что позволяет оценить ее значение —  $v_{pl} \approx 150\text{--}200$  m/s. Для сверхзвуковых струй этот сценарий завершается формированием турбулентного участка, который сносится вниз по потоку под воздействием новых поступлений плазмы

из капилляра (рис. 3, *b*). Отметим, что для дозвуковых струй переход к мелкомасштабной турбулентности в явном виде не наблюдается. Существует также и другой сценарий, согласно которому происходит затухание исходного возмущения. В этом случае наблюдается снижение амплитуды деформации и „расползание“ области возмущения вдоль оси струи в обоих направлениях на фоне ее дрейфа вниз по потоку.

Реализация того или иного сценария, очевидно, определяется интенсивностью исходного возмущения, зависящей от плотности мощности СВЧ-излучения в зоне поглощения и ее пространственного положения относительно струи, которые, в свою очередь, зависят от параметров плазмы в окрестности струи, отслеживающих изменение мощности эрозионного разряда [8]. Существование такой зависимости подтверждается результатами многочисленных экспериментов, проведенных при различных задержках СВЧ-импульса относительно момента зажигания эрозионного разряда, в которых было обнаружено — чем выше мощность разряда, тем далее зона энерговыведения отстоит от среза капилляра. Однако ее положение никогда не достигает положения фокального пятна, даже если длина плазменной струи к моменту включения СВЧ-импульса значительно перекрывает это расстояние.

Таким образом, динамика возмущения плазменной струи во многом сходна с эволюцией неустойчивости свободных сдвиговых течений и содержит характерные признаки такой неустойчивости, а именно: усиление первичной неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, приводящей к последовательному сворачиванию слоев сдвига в вихревые структуры, их нелинейное взаимодействие, разрушение и развитие турбулентности [5,6]. Однако существуют некоторые особенности. Во-первых, эволюция неустойчивости зависит от начального уровня возмущения. В частности, сценарий, заканчивающийся развитием турбулентности, реализуется при высокой интенсивности начального возмущения и достаточно высокой скорости течения, близкой к порогу ламинарно-турбулентного перехода  $Re \sim Re_{cr}$ . Принимая во внимание данные  $Re_{cr} \sim 100-600$  для газовых струй [9], получим скорость потока  $v_{cr} \sim 1-6$  km/s (рабочий газ — водород,  $T = 4000$  K,  $p = 1$  Bar,  $d = 1$  mm). Такая скорость достигается в сверхзвуковых струях, в экспериментах с которыми и наблюдается формирование турбулентного участка. В дозвуковых струях перехода к турбулентности не наблюдается, а превышение некоторого порога интенсивности исходного возмущения приводит в итоге к прерыванию течения. При низкой интенсивности возмущения не происходит его усиления как для дозвуковых, так и

для сверхзвуковых струй. Во-вторых, воздействие СВЧ-импульса всегда приводит к развитию асимметричной (спиральной) моды неустойчивости, которая, как правило, доминирует в струйных течениях с паузейлевским профилем скорости, а также в условиях несимметричного внешнего воздействия [6]. Допуская возможность формирования на срезе капилляра профиля скорости, близкого к паузейлевскому, что может оказаться вполне вероятным в силу существенно неоднородных радиальных профилей температуры и концентрации компонент плазмы [8], нам все же представляется, что главной причиной возбуждения асимметричной моды является несимметричное расположение зоны энерговыделения относительно оси струи в силу особенностей схемы организации разряда [3]. В заключение отметим, что обнаруженная взаимосвязь места пространственной локализации СВЧ-разряда (его смещение до 4–5 см относительно фокуса) с параметрами плазменной струи позволяет по-новому подойти к постановке задачи управления пространственным положением и параметрами зоны энерговыделения, что является важным для многих приложений, в частности магнито-плазменной аэродинамики.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Битюрину В.А. за полезные советы и замечания, высказанные при обсуждении данной работы.

## Список литературы

- [1] *Kolesnichenko Y.F., Brovkin V.G., Leonov S.B. et al. // 32nd AIAA Plasmadynamics Lasers Conf. 4th Weakly Ioniz. Gases Work. USA, Anaheim, CA, 2001. N June. P. 1–26.*
- [2] *Афанасьев С.А., Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф., Машек И.Ч. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 15. С. 40–46.*
- [3] *Пащина А.С., Климов А.И. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 78–86.*
- [4] *Leonov S., Nebolsin V., Shilov V. // I Int. Work. Perspect. MHD Plasma Technol. Aerosp. Appl. / Ed. Bityurin V. Moscow, Russia: IVTAN, 1999. P. 58–65.*
- [5] *Анискин В.М., Бунтин Д.А., Маслов А.А. и др. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 2. С. 17–23.*
- [6] *Козлов Г.В., Грек Г.Р., Литвиненко М.В. и др. // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2010. Т. 5. № 1. С. 9–28.*
- [7] *Keidar M., Kim M., Boyd I. // J. Spacecr. Rockets. 2008. V. 45. N 3. P. 445–453.*
- [8] *Пащина А.С., Ефимов А.В., Чиннов В.Ф. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 4. С. 1–18.*
- [9] *Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 9. С. 34–40.*