

УДК 533.9.082.5; 537.523

**Особенности радиального распределения параметров плазмы  
начального участка сверхзвуковой струи, формируемой  
импульсным капиллярным разрядом**

А. С. Пащина, А. В. Ефимов, В. Ф. Чиннов, А. Г. Агеев

*Представлены результаты спектроскопии начального участка сверхзвуковой плазменной струи, формируемой с помощью импульсного разряда в капилляре с аблирующей стенкой, выполненной из углеродсодержащего полимера. Выявлены особенности пространственного распределения электронной плотности и интенсивности спектральных компонент, которые, в частности, вызваны высоким значением электронной температуры в «горячей» центральной зоне, превышающем «нормальную» температуру, а также существенной неизобаричностью начального участка сверхзвуковой струи. Зарегистрированные с высоким временным (1—50 мкс) и пространственным (30—50 мкм) разрешением излучательные свойства высокотемпературного ядра струи (интенсивность и контур бальмеровских линий  $H_\alpha$  и  $H_\beta$ , относительные интенсивности ионных линий  $C II$ ) позволили установить основные закономерности в распределениях давления и температуры в окрестности центрального скачка уплотнения. Благодаря наличию в потоке молекулярных компонентов, проявляющих свои излучательные свойства на периферии струи, удалось получить представление о параметрах плазмы в зоне образования «висячих» скачков уплотнения.*

PACS: 52.70.Kz; 52.75.Hn; 52.35.Tc

*Ключевые слова:* импульсный разряд, капилляр, абляция, спектроскопия, сверхзвуковая струя, профиль давления, концентрация электронов, температура.

**Введение**

Импульсный разряд в капилляре с аблирующей стенкой привлекает внимание исследователей благодаря возможности получения сильно-ионизованной плотной плазмы требуемого химического состава в широком диапазоне параметров за счет использования достаточно простых процедур: выбора вида и способа подачи рабочего тела (абляция стенки капилляра, инъекция рабочего вещества), размеров капилляра, параметров разрядного импульса [1, 2]. Большой круг прикладных задач связан с применением капиллярного

разряда для получения высокоэнтальпийных потоков плотной плазмы [1] и, в частности, плазменных струй [3—8]. Характер течения плазменных струй — ламинарный или турбулентный — существенно зависит от параметров плазмы и ее компонентного состава, которые, в свою очередь, определяются физико-химическими свойствами аблирующего вещества стенки капилляра, его геометрией, параметрами разрядного импульса, химическим составом и параметрами атмосферы окружающего газа. Ламинарные струи характеризуются резко выраженными границами, слабой расходимостью или полным ее отсутствием, устойчивостью в потоке газа, большой длиной начального участка, достигающей 200 и более калибров относительно диаметра капилляра [4, 5, 9—12]. При использовании капилляров, выполненных из углеродсодержащих полимеров, ламинарный характер течения удается поддерживать в достаточно широком диапазоне мощностей разрядного импульса, обеспечивающих формирование как дозвуковых, так и сверхзвуковых струй. Физическая природа свойств таких плазменных струй в настоящее время понятна не до конца.

Пащина Анатолий Степанович, заведующий лабораторией.  
Ефимов Александр Валерьевич, научный сотрудник.  
Чиннов Валерий Федорович, главный научный сотрудник.  
Агеев Алексей Геннадьевич, аспирант.  
Объединенный институт высоких температур РАН.  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.  
Тел. +7 (926) 791-09-75. E-mail: fgrach@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.

© Пащина А. С., Ефимов А. В., Чиннов В. Ф.,  
Агеев А. Г., 2016

Пролить свет на многие вопросы позволяет знание пространственно-временной эволюции параметров эрозионной плазмы, в частности — электронной концентрации и температуры, что предполагает использование методов оптической спектроскопии. Имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные по этому вопросу весьма немногочисленны и выполнены лишь для дозвукового режима течения. Большой цикл оптических исследований дозвуковых плазменных струй, инжектируемых в атмосферу воздуха при нормальных условиях, был проведен в начале 1990-х годов группами исследователей НИИРП, НИИТП [4, 5] МГУ [7, 8, 13] и МИФИ [14]. В результате исследований выявлена существенно неоднородная структура плазменной струи, получены интегральные по времени профили электронной концентрации и температуры плазмы в продольном и поперечном сечениях. В то же время неполнота анализа состояния плазмы не позволила объяснить большое несоответствие измеренных значений концентрации электронов  $n_e > 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и температуры  $T \sim 0,4\text{—}0,6 \text{ эВ}$  (без определения ее принадлежности) в плазме эрозионного разряда атмосферного давления.

Проведенные нами исследования дозвуковой плазменной струи с использованием спектроскопии высокого пространственного и временного разрешения и детальный анализ состояния плазмы [15] позволили расширить и дополнить общие представления о параметрах и динамике эрозионной плазмы, полученные в [4, 5, 7, 8, 13, 14], а также прояснить вопросы, связанные с выбором методов диагностики в условиях нарушения локального термодинамического равновесия (ЛТР). Было показано, что структура начального участка дозвуковой плазменной струи характеризуется наличием четко выраженного разделения на высокотемпературное ядро, состоящее преимущественно из водорода, и низкотемпературную периферийную область, содержащую атомы, молекулы продуктов абляции стенки капилляра и материала электродов и, вероятно, кластерную компоненту. Вследствие высокой объемной доли водорода, обусловленной составом аблирующего вещества стенки капилляра (полиметилметакрилат — ПММА), пространственное распределение и количественные значения параметров плазмы капиллярного разряда в горячей приосевой зоне (электронная концентрация, температура, профили интенсивностей излучения спектральных компонент) оказываются близкими к параметрам стационарной водородной дуги при соизмеримых значениях разрядного тока и геометрических размерах разрядного канала ([16], стр. 173—181). В то же время большие значения температурного

градиента  $grad_r T_e \sim 1 \text{ эВ/мм}$  и, как следствие, диффузионные потоки к границам струи, приводят к тому, что условие ЛТР выполняется только в горячей приосевой зоне, в которой  $T_e > 1,4 \text{ эВ}$ . В периферийной низкотемпературной зоне условие ЛТР заведомо не выполняется. Невыполнимость закона Больцмана существенно ограничивает применение локальных методов диагностики, в частности, использование метода больцмановской экспоненты (МБЭ), приводящего к систематическому занижению значений электронной температуры.

Течение дозвуковых плазменных струй с достаточной точностью можно считать изобарическим, так что параметры и пространственное распределение компонент плазмы в этом режиме определяются преимущественно температурным профилем. Однако при увеличении скорости потока возрастает роль неизобаричности, влияние которой на параметры плазмы становится существенным в сверхзвуковом режиме, в особенности, на начальном участке струи в области образования ударно-волновых структур [17—20]. В настоящее время число экспериментальных исследований, посвященных изучению этого вопроса, достаточно ограничено. К тому же эти исследования проведены при существенно иных параметрах разряда, масштабах и газодинамических параметрах плазменных струй [19, 21]. Поэтому, определение основных электрофизических параметров сверхзвуковых струй плазмы, формируемых с помощью импульсного разряда в капилляре с аблирующей стенкой представляется актуальной задачей, способствующей более глубокому пониманию физики процессов, ответственных за формирование их свойств. При этом оптическая спектроскопия является одним из немногих методов, пригодным для определения газодинамических параметров микроструйных течений плазмы, что позволяет расширить представления о картине сверхзвуковых течений, полученные иными методами для чисто газовых струй [13—15] и струй слабоионизованной плазмы [19] существенно больших масштабов.

Целью данной работы являлось определение параметров плазмы сверхзвуковой струи в окрестности центрального скачка уплотнения, где влияние неизобаричности течения проявляется особенно сильно.

### Объект исследований и результаты спектральных измерений

Объектом исследований являлась сверхзвуковая плазменная струя, формируемая с помощью импульсного разряда в капилляре, стенки которого выполнены из углеродсодержащего полимера

ПММА ( $C_3H_8O_2$ ). В качестве материала электродов использованы медь (внутренний электрод) и алюминий (наружный электрод). Диаметр капилляра и его глубина составляют  $d = 1$  мм и  $h = 4$  мм соответственно. Конструкция разрядника, схема экспериментальной установки и методы проведения исследований подробно описаны в работе [15]. В качестве источника питания разряда использован емкостной накопитель, подключаемый к разряднику через времязадающую индуктивность. Алгоритм изменения мощности разрядного импульса примерно соответствует полуволне синусоиды.

Исследования проведены при следующих параметрах разрядного импульса: энергия емкостного накопителя  $Q \sim 80$  Дж, амплитуда разрядного тока  $I_p \sim 350\text{—}400$  А, падение напряжения на разрядном промежутке  $U_p \sim 200\text{—}250$  В, длительность разрядного импульса  $t_p \sim 1$  мс, пиковое значение мощности разряда  $N \sim 100$  кВт. Исследования проведены для плазменной струи, инжектируемой в атмосферу воздуха при давлении  $p = 1$  атм. Этим условиям соответствуют следующие значения газодинамических параметров, оценка которых получена на основе результатов оптической визуализации потока и путем анализа ударно-волновых структур: число Маха  $M \sim 2\text{—}2,5$ , степень нерасчетности  $n = p_{\text{вых}}/p_{\infty} \sim 2\text{—}10$ , скорость головной части струи  $v_f \sim 300\text{—}500$  м/с, давление внутри капилляра  $p_{\text{кап}} \sim 20\text{—}40$  атм, давление на срезе капилляра  $p_{\text{вых}} \sim 10$  атм. К середине разрядного импульса (при пиковом значении мощности разряда) длина струи достигает 10—15 см. Максимальный диаметр струи достигается в середине первой секции ударно-волновой структуры и в несколько раз превышает диаметр отверстия капилляра. Для указанных параметров разрядного импульса его величина составляет  $d_{\text{макс}} = 3\text{—}4$  мм.

Для детального изучения пространственно-временной эволюции параметров короткоимпульсного (1 мс) разряда со сложной структурой использована аппаратура высокого пространственного (30—50 мкм) и временного (1—50 мкс) разрешения. Регистрация спектральных данных осуществляется при помощи камеры Andor iStar (длительность экспозиции от 100 нс), устанавли-

ваемой в выходной фокальной плоскости спектрографа MS-257 (решетки 1800 и 2400 штр./мм, размер входной щели  $\delta = 20$  мкм). Для синхронизации аппаратуры используется генератор импульсов Г5-56, обеспечивающий заданное время задержки  $\tau$  запуска камеры относительно момента зажигания разряда. В настоящей работе приведены результаты спектроскопии для  $\tau = 500$  мкс, что соответствует моменту достижения максимальной мощности разряда. Для расчета поперечных профилей параметров, к регистрируемым в эксперименте хордовым зависимостям интенсивности излучения (проинтегрированным по линии наблюдения) применяется процедура обратного преобразования Радона [22].

Спектр сверхзвуковой струи содержит интенсивные линии бальмеровской серии водорода  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ , линии атомов углерода, линии возбужденных атомов меди (материал внутреннего электрода), линии однократно ионизованных атомов меди Cu II, углерода C II, азота N II, кислорода O II. Эти линии были использованы для определения концентрации электронов  $n_e$  (линейный Штарк-эффект для линий  $H_\alpha$  и  $H_\beta$ ) и температуры  $T_e$  (по отношениям ионных линий углерода C II, а также линий меди Cu II). В приосевой зоне начального участка линии однократно ионизованных атомов меди и углерода преобладают над линиями возбужденных атомов (см. рис. 1). На периферии струи в спектре присутствуют линии алюминия Al I (материал наружного электрода), линии возбужденных атомов кислорода O I, азота N I, а также молекулярные полосы — фиолетовая система полос радикала CN (продукт плазмохимических превращений аблирующего вещества стенки капилляра и воздуха) и система полос Свана радикала  $C_2$  (материал стенки капилляра), — которые использовались для определения колебательной и вращательной температур. Результаты оценок колебательной  $T_v$  и вращательной  $T_r$  температур, выполненные с использованием спектров фиолетовой системы полос CN (переход  $B^2\Sigma^+ - B^2\Sigma$ ) и молекулярных полос Свана (переход  $d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$  радикала  $C_2$ ), хорошо согласуются друг с другом и приводят к следующим значениям:  $T_v = 8\text{—}9$  кК и  $T_r = 5\text{—}7$  кК.

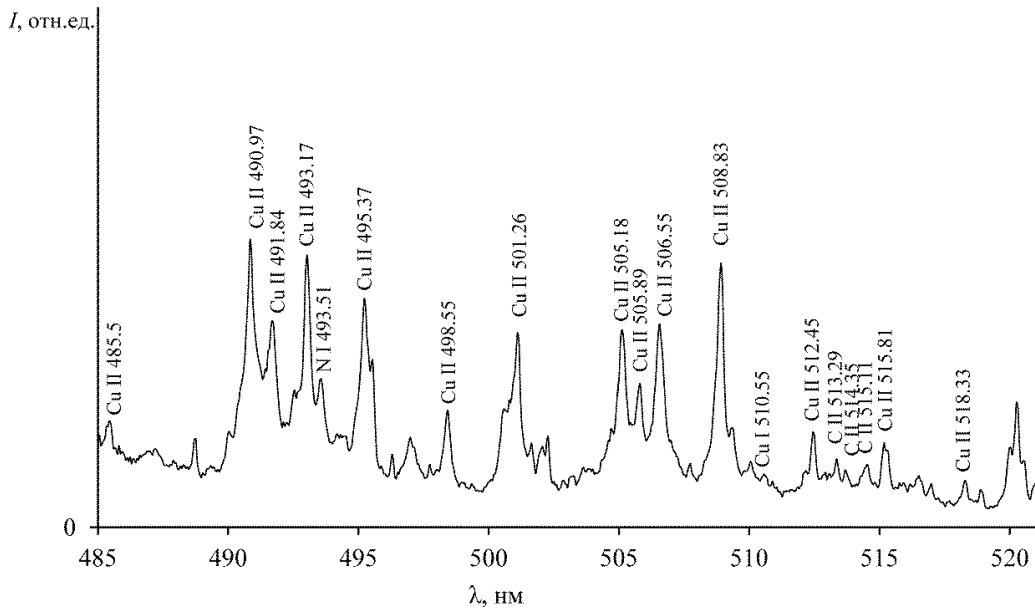


Рис. 1. Детальный спектр излучения плазмы в области разрежения на расстоянии  $z = 2$  мм от среза капилляра. Длительность экспозиции камеры спектрографа 5 мкс.

Наличие в спектре сверхзвуковой струи линий однократно ионизованных атомов продуктов деполимеризации капилляра (углерод, кислород) и внутреннего электрода (медь) с энергией возбуждения около 20 эВ, которые наблюдаются вплоть до расстояний  $z = 50\text{—}70$  мм от среза капилляра, свидетельствует о высокой температуре электронов  $T_e$  на этом участке, а именно, не менее 2 эВ. Концентрация электронов на этом участке, определенная на основе линейного Штарк-эффекта для линий водорода  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ , изменяется незначительно и составляет  $n_e = (1,5\text{--}2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Основным методом определения электронной температуры  $T_e$  нами избран метод относительных интенсивностей спектральных линий ионов углерода C II. Определенные таким образом значения температуры составляют  $T_e \sim 2$  эВ в окрестности диска Маха ( $z = 2,5$  мм) и  $T_e \sim 2,2\text{--}2,5$  эВ на расстоянии  $z = 0,5$  мм от среза капилляра. Близкое значение температуры электронов ( $T_e \sim 2,4 \pm 0,2$  эВ) в окрестности среза капилляра ( $z = 0,5$  мм) было получено с использованием отношения интенсивностей наблюдаемых в УФ части спектра ионных линий меди — Cu II 248,9 нм ( $E^* = 8,23$  эВ) и 254,4 нм ( $E^* = 13,38$  эВ).

### Распределение параметров плазмы по сечению струи

Пространственная неоднородность плазмы обуславливается значительными градиентами температуры  $\text{grad} T$  и неизобаричностью сверхзвукового течения. В наибольшей степени влияние указанных факторов проявляется в области ударно-волновых структур, характеризующейся мак-

симальным перепадом давления между центральной и периферийной зонами с ожидаемым минимумом на оси струи. Поперечные профили концентрации электронов и спектральных компонентов для этой области (в окрестности центрального скачка уплотнения) представлены на рис. 2.

Свойства исследуемой плазмы в «особых» точках, которые соответствуют «нормальным» температурам для электронной концентрации  $n_e^*$  и населенности излучающих уровней спектральных компонентов  $n_{H\alpha}^*$ ,  $n_{H\beta}^*$ ,  $n_{C_2}^*$ ,  $n_{Cu}^*$  [23], а также расчетные зависимости этих свойств от температуры и давления в предположении ЛТР, позволяют построить поперечные профили температуры  $T_e(r)$  и давления  $p(r)$  в различных сечениях струи.

Для определения «нормальных» температур спектральных компонентов выполняется вспомогательный расчет равновесного состава плазмы в диапазоне ожидаемого изменения ее температуры  $T_e = 2\text{--}3$  эВ, давления  $p = 0,2\text{--}2$  атм и варьируемого отношения парциальных давлений смеси H:C:O, первоначальный стехиометрический состав которой ( $C_3H_8O_2$ ) в момент возникновения плазмы в результате абляции дается соотношением H:C:O = 53,3 % : 33,3 % : 13,3 %. Для учета возможной роли материала электрода (Cu) в среду добавляются атомы (и ионы) меди в количестве 0,1 % объемных (линии Cu I и Cu II наблюдаются в спектре излучения и используются нами в диагностических целях). В расчёте учитывается, что в исследуемой среде переменными являются как полное давление плазмы, так и соотношение парциальных давлений на различных радиусах струи: в приосевой зоне сосредоточена легкая компонента (H,  $H^+$ ), а на периферии — тяжелая (C,  $C^+$ , O,  $O^+$ ,  $C_2$ ,  $O_2$ ).

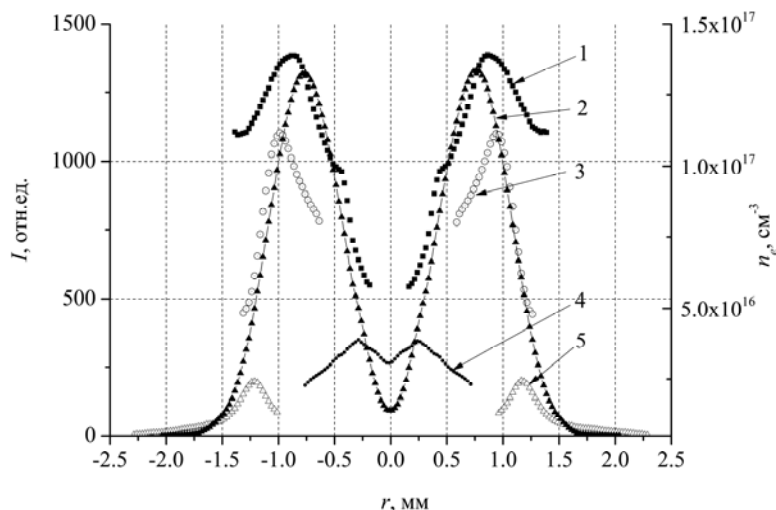


Рис. 2. Профили электронной концентрации  $n_e$  и интенсивностей излучения спектральных компонент плазмы в окрестности центрального скачка уплотнения: 1 —  $n_e$ , 2 —  $H_{\alpha}$ , 3 —  $H_{\beta}$ , 4 —  $C II$  513,3 нм, 5 —  $C_2$  516,56 нм.

Совместное рассмотрение экспериментальных зависимостей  $[H^*(3)](r)$  и  $n_e(r)$  в сопоставлении с их расчетными изменениями  $[H^*(3)](p, T)$ ,  $n_e(p, T)$  позволяет получить согласованное изменение  $p(r)$  и  $T_e(r)$  в диапазоне изменения  $r = 0—1,2$  мм. Результаты оценок и вид полученных таким образом распределений  $p(r)$  и  $T_e(r)$  представлены на рис. 3. Центральная зона струи сильно ионизована ( $n_e \approx [H^+] \gg [H], [C]$ ) и характеризуется температурой  $T_e(r = 0) \sim 28$  кК, превышающей «нормальную» температуру  $T_M(H_{\beta}, H_{\alpha})$ . Температура электронов в низкотемпературной периферийной зоне

составляет  $T_e(r = 1,2 \text{ мм}) \sim 10—12$  кК, что примерно в 1,3—1,5 раза превышает значения, полученные для дозвуковой струи [15]. Сопоставление температуры электронов на радиусе  $r = 1,2$  мм с температурами  $T_v$  и  $T_r$ , полученными при обработке спектров полос радикала  $C_2$ , указывает на значительный отрыв  $T_e$  (см. рис. 3). Как и следовало ожидать, для периферийной области эрозийного разряда, особенно в области разрежения, приближение однотемпературной ЛТР-плазмы не выполняется.

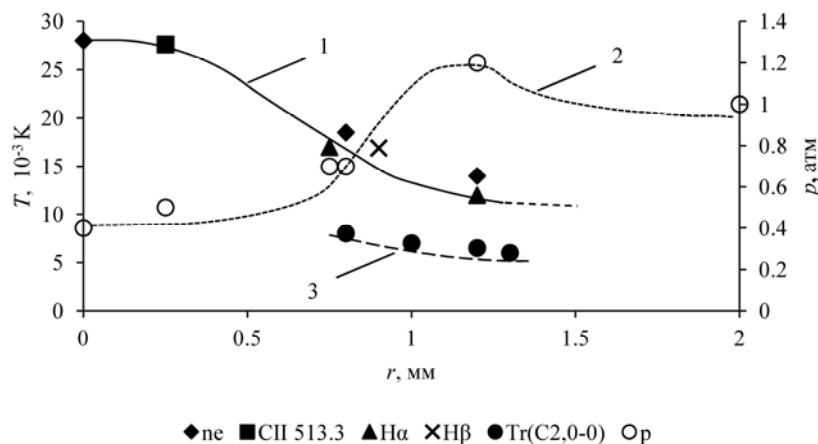


Рис. 3. Распределение параметров плазмы в окрестности центрального скачка уплотнения: 1 — температура электронов, 2 — давление, 3 — вращательная температура  $T_r$  (полоса (0-0) радикала  $C_2$ ).

Восстановленный с помощью упомянутой процедуры профиль давления  $p(r)$  в окрестности диска Маха качественно и количественно согласуется с результатами измерений, полученными для чисто газовых струй с близкими параметрами течения [17, 18]. Минимум давления достигается в приосевой зоне, где его значение составляет  $p(r = 0) = 0,4$  атм. Отметим, что полученное значение давления на радиусе  $r = 1,2$  мм (максимум свечения полосы Свана) оказывается несколько

выше атмосферного (1,2 атм), а на внешней границе струи ( $r = 2$  мм) оно близко к атмосферному [17—20].

### Заключение

В работе представлены результаты спектроскопии начального участка сверхзвуковой плазменной струи, формируемой с помощью импульсного разряда в капилляре с аблирующей стенкой, выполненной из углеродсодержащего полимера.

Высокий уровень электронной температуры в приосевой горячей зоне, достигающей значений  $T_e \sim 2\text{—}3$  эВ и превышающей «нормальную» ( $T_e \sim 1,5\text{—}2,3$  эВ) как для электронной концентрации ( $n_e \sim (1\text{—}2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), так и для населенности излучающих уровней основных спектральных компонентов, а также неизобаричность сверхзвукового течения обуславливают немонотонное распределение параметров в поперечном направлении. При этом неизобаричность сверхзвукового течения обеспечивает более значительную, чем при дозвуковом истечении, немонотонность в пространственном распределении параметров. Роль неизобаричности особенно сильно выражена на начальном участке струи — в области разрежения, где приосевое значение электронной концентрации оказывается существенно ниже (примерно в 2,5 раза), чем на периферии. Наблюдаемый отрыв электронной температуры ( $T_e \approx 12\text{—}13$  кК) от колебательной ( $T_v \approx 8\text{—}9$  кК) и вращательной ( $T_r \approx 5\text{—}7$  кК) температур на периферии струи указывает на существенное отклонение плазмы в этой зоне от состояния ЛТР, что требует аккуратности при выборе методов спектральной диагностики. Восстановленный профиль давления в окрестности диска Маха качественно и количественно согласуется с результатами измерений, полученными для чисто газовых струй с близкими значениями газодинамических параметров. Используемый метод спектроскопии высокого пространственного и временного разрешения может составить хорошую основу для диагностики мелкомасштабных пространственно-неоднородных плазменных объектов, в том числе, газодинамических параметров.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант №16-38-00927 мол\_а.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Минько Л. Я. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. — Минск: Наука и техника, 1970.
2. Огурцова Н. Н., Подмошенский И. В., Шелемина В. М. // ТВТ. 1968. Т. 6. № 1. С. 48.
3. Leonov S., Nebolsin V., Shilov V. / Proc. I Int. Work. Perspect. MHD Plasma Technol. Aerosp. Appl. (ed. V. Bityurin), (IVTAN, Moscow, 1999). P. 58.
4. Авраменко Р. Ф., Николаева В. И., Поскачеева Л. П. / Сборник. «Шаровая молния в лаборатории». — М.: Химия, 1994. С. 15.
5. Авраменко Р. Ф., Бахтин Б. И., Николаева В. И., Поскачеева Л. П., Широков Н. Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 12. С. 57.
6. Еришов А. П., Колесников Е. Б., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Чувашев С. Н., Шибков В. М. // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 646.
7. Еришов А. П., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М. / Сборник. «Шаровая молния в лаборатории». — М.: Химия, 1994. С. 112.
8. Еришов А. П., Розанов В. В., Сысоев Н. Н., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М. // Физическая гидродинамика. 1994. № 4. С. 1.
9. Pashchina A. S., Klimov A. I., Efimov A. V. AIAA 2014-0517 / 52nd Aerosp. Sci. Meet. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014. P. 1.
10. Леонов С. Б., Лукьянов Г. А. // ПМТФ. 1994. № 5. С. 13.
11. Пащина А. С., Климов А. И. // Хим. Физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 78.
12. Эндер А. Я., Кузнецов В. И., Кольшикин И. Н. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 11. С. 3.
13. Александров А. Ф., Бутылкина Н., Гудилин И. А., Гудилин А. А., Еришов А. П., Поскачеева Л. П., Шибков В. М., Чувашев С. Н., Юсупалиев У. Отчет по договору № 532 между Центром МНТП и НИИТП. — М., 1990. — 92 с.
14. Башутин О. А., Вовченко Е. Д., Димитров С. К., Жданов С. К., Кирко Д. Л., Луцько А. С., Махин А. В., Михин С. Г., Мозгрин Д. В., Палов А. П., Плетнев В. В., Савелов А. С., Самсонов Д. В., Смирнов В. М., Тельковский В. Г., Фетисов И. К., Ходаченко Г. В., Цветков И. В. Разработка диагностических методик и исследование физических свойств плазменных образований. Изучение возможности получения плазменных образований с высокими энергетическим вкладом. Отчет о НИР, тема 88-3-021-471. — М.: МИФИ, 1990. — 153 с.
15. Пащина А. С., Ефимов А. В., Чиннов В. Ф. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 4. С. 1.
16. Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Низовский В. Л. Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. — М.: Физматлит, 2008.
17. Gibbings J. C., Ingham J., Johnson D. Flow in a Supersonic Jet expanding from a Convergent Nozzle. Liverpool, 1972. No. 1197.
18. Запругаев В. И., Киселев Н. П. // ПМТФ. 2009. Т. 50. № 3. С. 104.
19. Лукьянов Г. А. Сверхзвуковые струи плазмы. — Л.: Машиностроение, 1985.
20. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1991.
21. Белов С. Н., Огурцова Н. Н., Подмошенский И. В. // ЖПС. 1975. Т. 22. № 3. С. 396.
22. Преображенский Н. Г., Пикалов В. В. Неустойчивые задачи диагностики плазмы. — Новосибирск: Наука, 1982.
23. Лохте-Хольтгревен В. / в кн. «Методы исследования плазмы». С. 108. — М.: Мир, 1971. С. 108.

## Features of a radial distribution of plasma parameters at the initial section of a supersonic jet created by the pulsed discharge in a capillary

A. S. Pashchina, A. V. Efimov, V. F. Chinnov, and A. G. Ageev

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: fgrach@mail.ru

Received March 14, 2016

*The results of spectroscopic studies of the initial section of the supersonic plasma jet created by a pulsed discharge in the capillary with the ablative wall are presented. Features of the spatial distribution of the electron density and the intensity of the spectral components, which, in particular, caused by the high electron temperature in the hot central zone, exceeding the "normal" temperature, as well as significant non-isobaricity at the initial section of supersonic jet are revealed. The radiative properties of high-temperature jet core (intensity and profile of the Balmer lines  $H_\alpha$  and  $H_\beta$ , relative intensities of C II lines) registered with high temporal (1—50  $\mu$ s) and spatial (30—50 micron) resolution allowed to establish basic patterns of pressure and temperature distributions in the vicinity of the central shock. The presence of the molecular components exhibiting their emission properties at the plasma jet periphery permit us to estimate the parameters of the plasma in the spatial domain, where "detached" shock waves of the supersonic jet are created.*

PACS: 52.70.Kz; 52.75.Hn; 52.35.Tc

**Keywords:** pulse discharge, capillary, ablation, spectroscopy, supersonic jet, pressure profile, electron density, temperature.

### REFERENCES

1. L. Ya. Min'ko, *Obtaining and Studying the Pulse Plasma Flows* (Nauka i Tekhnika, Minsk, 1970) [in Russian].
2. N. N. Ogurtsova, I. V. Podmoshensky, and V. M. Shelemina, *High Temp.*, **6** (1), 48 (1968).
3. S. Leonov, V. Nebolsin, V. Shilov, in *Proc. I Intern. Work. Perspect. MHD Plasma Technol. Aerosp. Appl.* (ed. V. Bityurin), (IVTAN, Moscow, 1999), pp. 58–65.
4. R. F. Avramenko, V. I. Nikolaeva, and L. P. Poskacheeva, in *Book: Ball Lightning in Laboratory*, pp. 15–56. Ed. by R.F. Avramenko, A.I.Klimov, O.A. Sinkevich, (Chemistry, Moscow, 1994) [in Russian].
5. R. F. Avramenko, B. I. Bakhtin, V. I. Nikolaeva, L. P. Poskacheeva, and N. N. Shirokov, *Tech. Phys.*, **60** (12), 57–64 (1990).
6. A. P. Ershov, E. B. Kolesnikov, I. B. Timofeev, V. A. Chernikov, S. N. Chuvashov, V. M. Shibkov, *High Temp.*, **45**, 646 (2007).
7. A. P. Ershov, I. B. Timofeev, S. N. Chuvashov, V. M. Shibkov, in *Book: Ball Lightning in Laboratory*, pp. 112–118. Ed. by R.F. Avramenko, A.I.Klimov, O.A. Sinkevich, (Chemistry, Moscow, 1994) [in Russian].
8. A. P. Ershov, V. V. Rozanov, N. N. Sisoiev, I. B. Timofeev, S. N. Chuvashov, V. M. Shibkov, *Fizicheskaya Gidrodinamika*, No. 4, 1 (1994) (*Phys. Fac. Lomonosov MGU*, 1994) [in Russian].
9. A. S. Pashchina, A. I. Klimov, and A. V. Efimov, in *Proc. 52nd Aerosp. Sci. Meet., AIAA Paper 2014-0517* (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014). doi:10.2514/6.2014-0517.
10. S. B. Leonov, and I. Lukyanov, *PMTF*, No. 5, 13 (1994).
11. A. S. Pashchina and A. I. Klimov, *Chem. Phys.*, **33** (2), 78 (2014).
12. A. Ya. Ender, V. I. Kuznetsov, and I. N. Kolyshkin, *Tech. Phys.*, **85** (11), 3 (2015).
13. A. F. Alexandrov, N. Butilkina, I. A. Gudilin, A. A. Gudilin, A. P. Ershov, L. P. Poskacheeva, V. M. Shibkov, S. N. Chuvashov, and U. Yusupaliev, *Tech. Rep. No. 532* (Center MNTP&NIITP, Moscow, 1990) [in Russian].
14. O. A. Bashutin, E. D. Vovchenko, S. K. Dimitrov, S. K. Jdanov, D. L. Kirko, A. S. Luc'ko, A.V. Makhin, S. G. Mikhin, D. V. Mozgrin, A. P. Palov, V. V. Pletnev, A. S. Savelov, D. V. Samsonov, V. M. Smirnov, V. G. Tel'kovsky, I. K. Fetisov, G. V. Khodachenko, and I. V. Tsvetkov, *The development of diagnostic methods and the study of the physical properties of plasma formations. Studying the possibility of obtaining plasma formations with high energy input*. *Tech. Rep.*, Subject No 88-3-021-471 (MIFI, Moscow, 1990) [in Russian].
15. A. S. Pashchina, A. V. Efimov, and V. F. Chinnov, *High Temp.*, **54** (4), 1 (2016).
16. E. I. Asinovsky, A. V. Kirillin, and V. L. Nizovsky, *Stabilized electric arcs and their application in the thermo-physical experiment* (Fizmatlit, Moscow, 2008) [in Russian].
17. J. C. Gibbings, J. Ingham, D. Johnson, *Flow in a Supersonic Jet Expanding From a Convergent Nozzle*, *Tech. rep. No. 1197* (HM Stationery Office, Liverpool, 1972).
18. V. I. Zapryagaev and N. P. Kiselev, *PMTF*, **50** (3), 104 (2009).
19. G. A. Lukyanov, *Supersonic Plasma Jets* (Mashinostroyeniye, Moscow, 1985) [in Russian].
20. G. N. Abramovich, *Applied Gas Dynamics* (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].
21. S. N. Belov, N. N. Ogurtsova, and I. V. Podmoshensky, *JPS*, **22**, 396 (1975).
22. N. G. Preobrajensky and V. V. Pikalov, *Non-stable Problems of Plasma Diagnostics* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
23. W. Lochte-Holtgreven, in *Book: Plasma Diagnostics*, pp. 108-168 (Amsterdam, North Holland, 1968; Moscow, Mir, 1971).