

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
ПЛАЗМА

УДК 533.9

ПАРАМЕТРЫ ПРОДОЛЬНОГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА© 2023 г. Р. С. Трошкин^a, А. А. Фирсов^{a,*}^a Объединенный институт высоких температур РАН, Москва Россия

*e-mail: af@iht.org

Поступила в редакцию 10.11.2022 г.

После доработки 20.01.2023 г.

Принята к публикации 20.01.2023 г.

Исследованы свойства электрического разряда в сверхзвуковом потоке воздуха и проблема определения температуры контрагированного плазменного канала с радиальным распределением температуры. Рассмотрен прямой разряд длиной 30 мм вдали от стенок канала в ядре сверхзвукового потока с параметрами: число Маха $M = 2$, скорость потока $V \sim 500$ м/с, температура торможения $T_0 = 300$ К, статическое давление газа $P_{st} = 22$ кПа. Осесимметричная геометрия экспериментов в конфигурации с двумя соосными электродами, расположенными параллельно потоку, была выбрана во избежание появления части канала тока, перпендикулярной потоку, и соответствующих пульсаций разряда. Получена вольтамперная характеристика разряда, и с помощью эмиссионной спектроскопии были установлены зависимости температуры электроразрядной плазмы от электрических параметров разряда. Также с помощью метода теневой визуализации и высокоскоростной съемки была получена оценка толщины теплового конуса, размера разрядного канала и их зависимость от тока разряда.

Ключевые слова: электрический разряд постоянного тока, дуговой разряд, сверхзвуковой поток, эмиссионная спектроскопия, температура газа, параметры разрядного канала

DOI: 10.31857/S036729212360022X, EDN: VFSGSE

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие сверхзвукового потока с разрядом постоянного тока изучается на протяжении длительного времени, первые исследования в данном направлении были выполнены в 60-х годах [1]. Выполненные исследования взаимодействия электрических разрядов разных типов с потоком газа имеют преимущественно прикладной характер, и делятся на 1) плазменную аэродинамику и управление потоком [2, 3], и 2) плазменно-стимулированное горение [4]. К первой группе задач относятся возможности управления потоком с помощью газоразрядной плазмы. Разряд постоянного тока (включая импульсные дуги), как правило, применяется для управления сверхзвуковыми течениями. Например, в работе [5] представлены результаты экспериментального исследования влияния импульсного разряда на пограничный слой у плоской стенки в сверхзвуковом потоке при различных параметрах разряда. Также разряд такого типа может влиять на структуру течения, например, применение плазменного актуатора для управления структурой течения позволяет оптимизировать работу воздухозаборника [6, 7], обеспечивает управление положением

ударной волны [8–10], позволяет быстро менять силу/момент аэродинамического элемента, или структуру его обтекания [11–13]. Также дуговой разряд может быть использован для измерения скорости сверхзвукового потока и реагирующих смесей [14].

Вторая группа задач посвящена исследованию плазменно-стимулированного горения. Преимущества использования плазмы электрических разрядов для управления горением в потоке горючих смесей заключаются в уменьшении времени зажигания топлива или в инициировании зажигания в сложных условиях, в улучшении перемешивания топливно-воздушной смеси, а также для стабилизации фронта пламени [15–18].

Фундаментальные исследования разряда постоянного тока также проводились одновременно несколькими научными группами с целью установления параметров разряда, его динамики в движущемся газе, а также влияния разряда на скоростной воздушный поток. Были оценены микроскопические характеристики разряда, такие как температура, концентрация заряженных частиц [19, 20]. В работе [21] с помощью теневой визуализации показана структура скачков уплот-

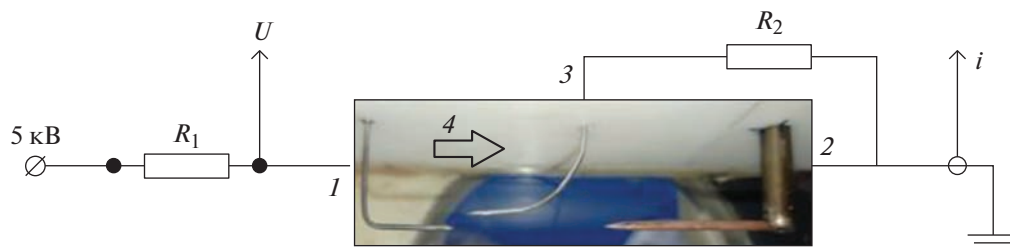


Рис. 1. Схемы электрического питания разряда, электрических измерений и геометрическая конфигурация электродов. 1 – верхний по газовому потоку электрод; 2 – нижний по потоку электрод; 3 – инициирующий электрод; 4 – газовый поток.

нения газа около разряда, и установлено его влияние на расположенное за разрядом препятствие. Позднее была выполнена высокоскоростная съемка для уточнения формы разряда [22], определено влияние скорости потока на параметры разряда [23], установлена зависимость величины тока и межэлектродного расстояния на длину разряда [24], а также с помощью численного моделирования рассмотрен процесс “перепробоя” (пробой промежутка газа между элементами токового канала) и формирование нового токового канала) [25]. Во всех этих работах, как правило, рассматривался продольно-поперечный разряд, однако его длина изменяется во времени, что приводит к пульсации параметров. Для фундаментального исследования такой объект не очень удобен, и ряд свойств проще установить для продольного разряда, который был рассмотрен в работе [26]. Однако геометрия электродов была достаточно громоздкой и влияла на исследуемый объект, а количество диагностических методов было ограничено.

Цели работы состояли в исследовании в сверхзвуковом газовом потоке свойств продольного электрического разряда, созданного с помощью минималистичной (с точки зрения влияния на поток) конфигурации электродов, а также в определении радиального распределения температуры в контрагированном (тонком цилиндрическом) плазменном канале.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Для получения подробного описания локальных характеристик разряда постоянного тока и течения газа вблизи разряда желательно организовать стационарный объект с достаточно стабильными параметрами, поэтому была выбрана осесимметричная конфигурация эксперимента, препятствующая появлению поперечного по отношению к скорости потока (и сносимого потоком) участка токового канала. Постановка эксперимента была реализована в импульсной сверхзвуковой аэродинамической трубе ИАДТ-50

ОИВТ РАН. Разряд зажигался в ядре сверхзвукового потока (т.е. вдали от стенок) с параметрами – число Маха $M = 2$, скорость газового потока $V \sim 500$ м/с, температура торможения $T_0 = 300$ К, статическое давление газа $P_{st} = 22$ кПа между тонкими соосными электродами, расположенными параллельно потоку, с расстоянием между концами электродов 30 мм. Электрическое питание разряда подводилось от источника постоянного напряжения 5 кВ через балластное сопротивление, регулирующее разрядный ток в пределах 0.5–7 А. В рассматриваемой конфигурации были использованы два электрода – передний вольфрамовый электрод диаметром 1 мм и задний медный диаметром 2 мм. Также для зажигания использовался третий инициирующий электрод, который был изогнут и предназначался для начального пробоя. Таким образом разряд, который сначала зажигался в виде петли, сносился потоком, а затем достигнув нижнего по газовому потоку электрода, переходил в продольную форму. Геометрия третьего электрода выполнялась таким образом, чтобы влияние косога скачка уплотнения, падающего от электрода на область разряда, было минимальным. Такая конфигурация была признана удачной, в том числе и с точки зрения выполнения численного моделирования для последующего сравнения с экспериментом. Электрическая схема и базовая конфигурация электродов показаны на рис. 1.

В ходе экспериментов проводилась высокоскоростная съемка разряда на камеру Photron S9 с временной экспозицией 1–2 мкс. Особенности газового течения регистрировались с помощью оптической теневой системы высокого пространственного разрешения с экспозицией 100 нс, которая определялась длительностью импульса подсветки. Оптические эмиссионные спектры разряда были получены в диапазоне 287–367 нм с помощью спектрографа на основе монохроматора Oriel MS 257 (решетка 1800 штр/мм) и ПЗС-камеры Andor DU420. Сухой воздух в баке высокого давления был подготовлен с помощью коммерческого осушителя воздуха Remeza RFD 61, но не-

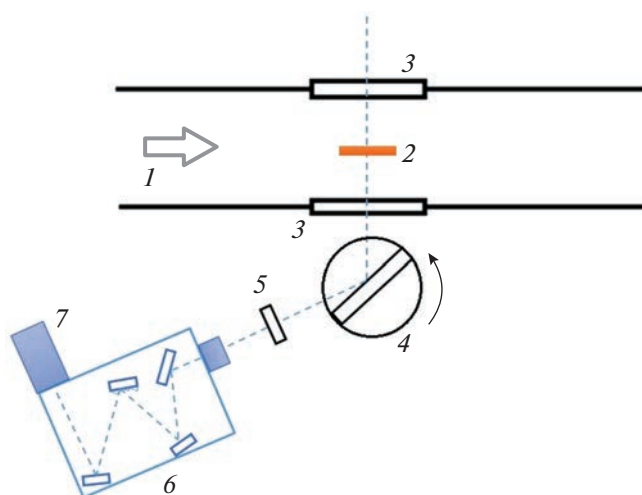


Рис. 2. Схема spectroscopic измерений. 1 – сверхзвуковой газовый поток; 2 – разряд постоянного тока; 3 – прозрачное окно; 4 – вращающееся зеркало для спектрографа; 5 – линза; 6 – монохроматор; 7 – камера для регистрации спектра.

которое количество водяного пара все же присутствовало в потоке воздуха. В спектрах видны молекулярные полосы второй положительной системы молекулярного азота, полосы молекул OH и NH , а также ряд линий элементов, появляющихся из-за эрозии электрода. Излучение второй положительной системы азота более интенсивное, чем других систем; есть часть полосы в диапазоне 310–340 нм, которая меньше перекрывается излучением от других атомов и молекул, поэтому она была использована для измерения температуры газа в разряде.

Вращательную и колебательную температуру электроразрядной плазмы определяли путем сравнения спектров второй положительной системы азота с модельными спектрами той же системы, полученные с помощью программы *Spectraig*. Температура газа приравнивалась к найденной вращательной температуре основного электронного состояния. Температура определялась по излучению тонкого сечения разряда. С помощью поворотного зеркала была определена температура в разных точках по длине разряда (3 точки на 30 мм длины). Схема spectroscopic измерений представлена на рис. 2.

Эмиссионная спектроскопия требует точной настройки оптической системы. Перед серией экспериментов была проведена калибровка спектрографа с помощью ртутной лампы с известным спектром оптического излучения. Также была выполнена горизонтальная калибровка для определения углового поворота зеркала на 1 мм разряда при движении оптической оси системы вдоль разряда. Это позволило получить спектры в различных точках вдоль разряда.

3. ПОЛУЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

После подачи электрического питания на передний электрод происходит пробой между передним и иницирующим электродами, и разряд начинает гореть в виде петли, – такой разряд имеет поперечный участок тока по отношению к потоку. Высокоскоростной воздушный поток сносит разряд вниз по течению, это сопровождается ростом напряжения на разряде, этот момент хорошо виден на рис. 3, на котором приведена осциллограмма напряжения разряда. Когда токовый канал достигает медного электрода, происходит переключение тока на задний электрод. После контакта петли с нижним по потоку электродом разряд становится прямолинейным, ток и напряжение разряда становятся стабильными и почти постоянными. Зажигание и стабилизация разряда показаны на рис. 4.

Теневая съемка позволяет визуализировать градиенты плотности среды (ударные волны, скачки уплотнения). В данном эксперименте наличие разряда в сверхзвуковом воздушном потоке приводит к образованию конуса с нагретым газом вокруг нити разряда и слабого конуса Маха перед разрядом. Теневое изображение поля сверхзвукового течения с разрядом представлено на рис. 5. Хорошо видно, что конус с нагретым газом несколько шире видимого канала разряда. По полученным кадрам с помощью редактора изображений в 3-х точках вдоль разряда была установлена толщина теплового конуса, возникшего вследствие теплового воздействия плазмы. Распределение диаметра теплового конуса вдоль разрядного канала при различных токах разряда показано на рис. 6а. Из графика можно сделать вывод, что диаметр теплового конуса по всей длине увеличивается с ростом тока. С помощью высокоскоростной съемки были получены изображения разряда постоянного тока. Зная масштаб кадра с помощью редактора изображений строилось радиальное распределение интенсивности светимости (см. рис. 7а). Толщина токового канала была определена на высоте 5% интенсивности в 3 точках вдоль разряда. На рис. 6б показана зависимость диаметра токового канала от тока разряда в точке 15 мм от переднего электрода. Из графика видно, что с увеличением тока диаметр канала увеличивается.

Важно отметить, что полученная в результате экспериментов вольт-амперная характеристика разряда находится в хорошем количественном согласии с результатами численного моделирования [27], проведенного двумя способами (пакеты *FlowVision* [28] и *Plasmaero* [29–31]), как показано на рис. 8. Профили тока, полученные при моделировании, хорошо согласуются с диаметром канала, определенным экспериментально: в опыте

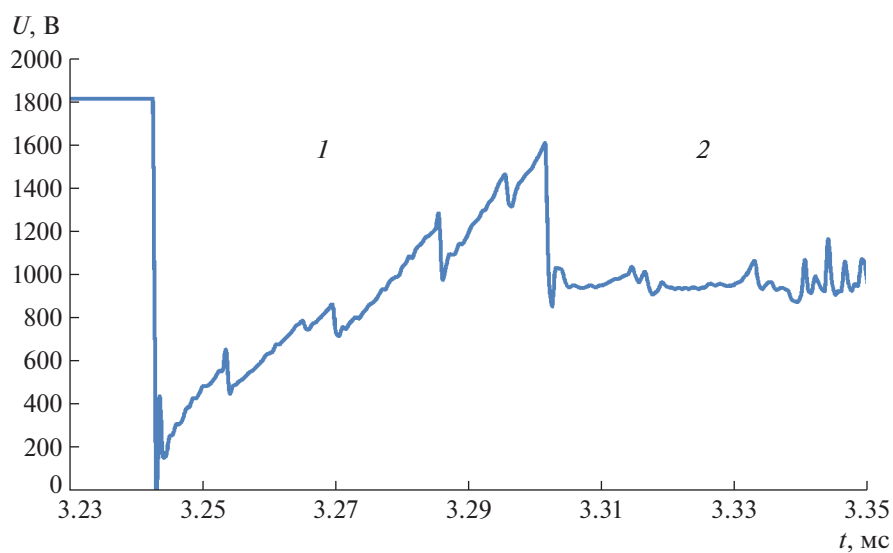


Рис. 3. Осциллограмма напряжения разряда. 1 – продольно-поперечный режим; 2 – продольный режим (стабильное напряжение).

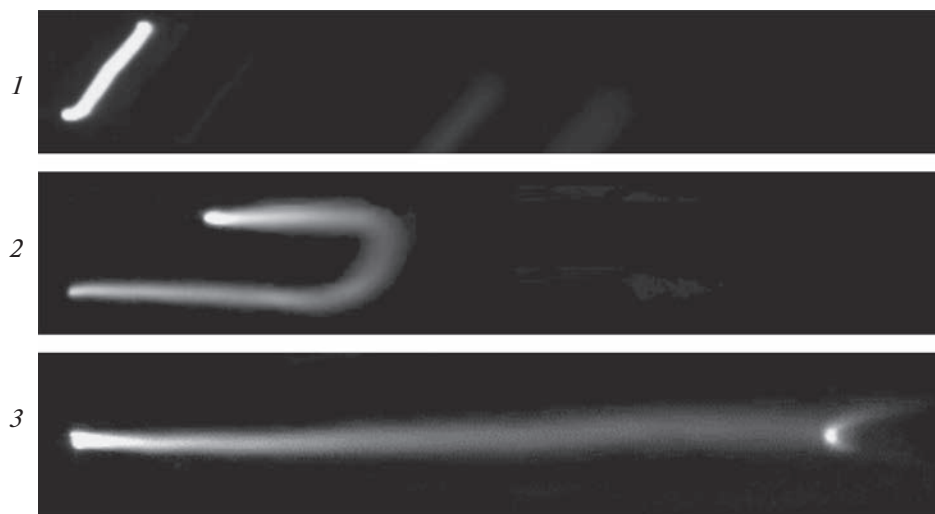


Рис. 4. Изображения разрядного канала в сверхзвуковом газовом потоке: 1–2 запуск и 3 – стабильная работа.

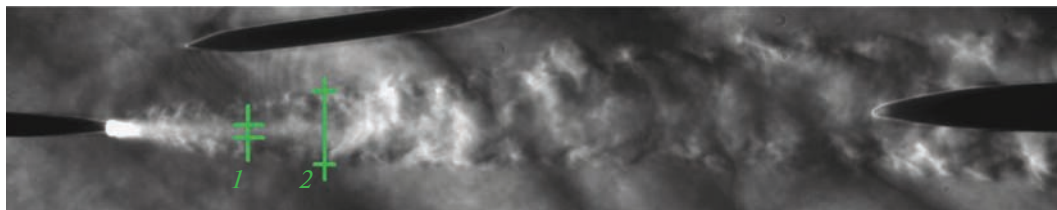


Рис. 5. Типичное теневое изображение поля сверхзвукового потока с разрядом. 1 – разрядный канал; 2 – тепловой конус.

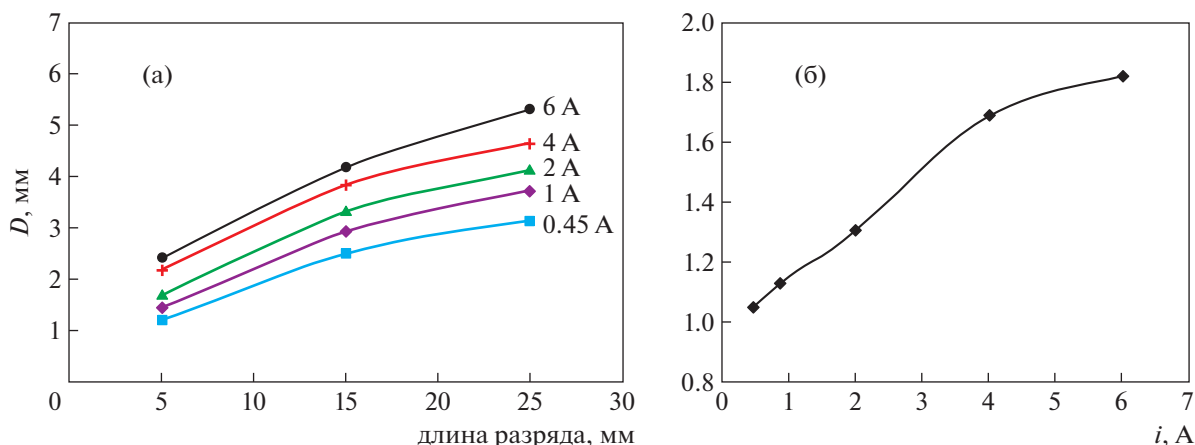


Рис. 6. Толщина теплового конуса вдоль разряда при различных токах (а) и зависимость толщины токового канала от тока разряда в точке 15 мм (б).

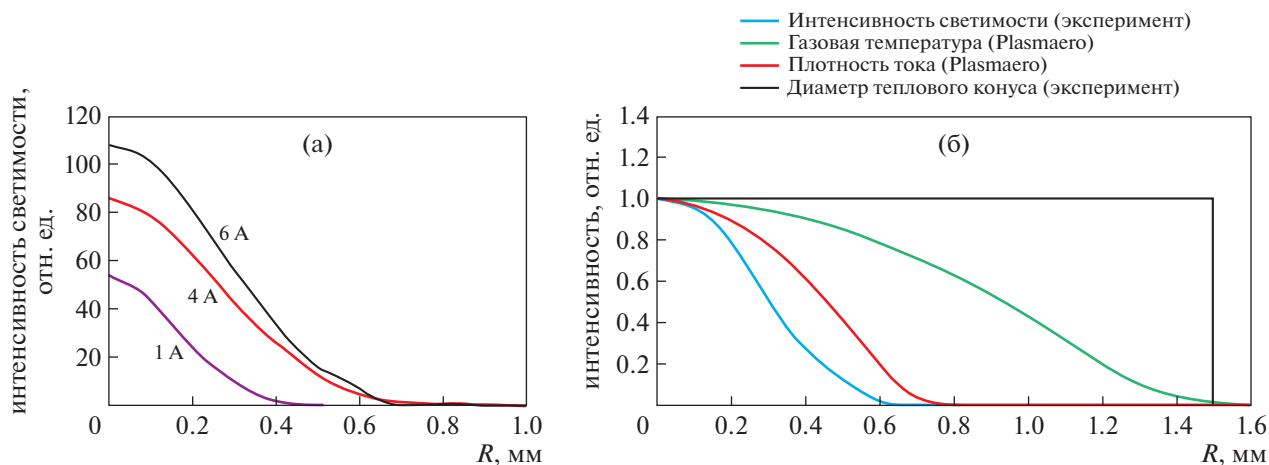


Рис. 7. Профиль интенсивности светимости токового канала на расстоянии 15 мм от переднего электрода для различных токов (а) и радиальные профили температуры, плотности тока и интенсивности светимости токового канала для тока 1 А (б).

при электрическом токе 1 А диаметр на высоте 5% от максимальной интенсивности свечения равен 1.2 мм, а при токе 6 А — 1.8 мм. Сравнение профилей светимости и плотности тока для 1 А представлены на рис. 7б. Диаметр теплового конуса составлял от 3 до 5.5 мм на расстоянии 25 мм от входного электрода при изменении тока, что также хорошо согласуется с данными моделирования. Полученный результат позволяет сделать вывод об удовлетворительном согласии данных эксперимента с результатами моделирования и провести дальнейшее сравнение и анализ полученных данных.

Измерение температуры плазмы электрического разряда в сверхзвуковом потоке является

технически сложной задачей. С помощью метода эмиссионной спектроскопии удалось получить спектры оптического излучения в трех точках вдоль разряда. Затем с помощью программы *Spectraig* строились модельные спектры второй положительной системы азота $N_2(2+)$ с известной вращательной и колебательной температурой. Экспериментальные спектры сравнивались с полученными модельными спектрами, и далее методом наилучшего совпадения подбиралась температура разряда, как показано на рис. 9а. Таким методом была получена температура для каждого значения тока в трех точках вдоль разряда — 5, 15 и 25 мм. Из полученных данных следует: вдоль разряда в направлении потока температура не-

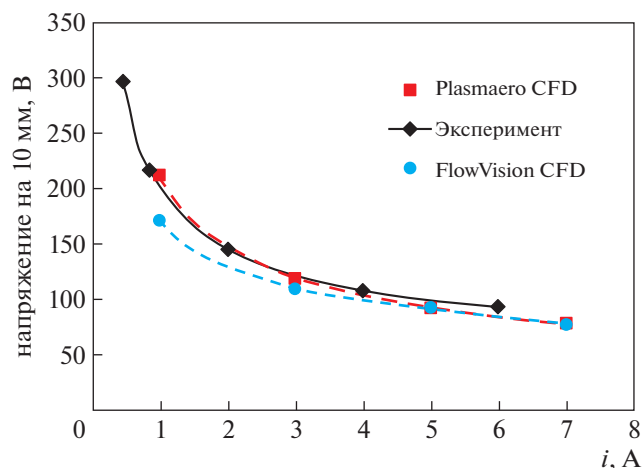


Рис. 8. Вольтамперная характеристика в сравнении с результатами моделирования, полученными в работе [27].

сколько снижается, как показано на рис. 10; с увеличением тока разряда температура медленно увеличивается, и таким образом получена оценка температуры в разряде, которая составила 4000–7000 K в зависимости от тока разряда. Полученные качественные оценки соответствуют оценкам, полученным в работе [32]. Умеренный рост температуры разряда в данном случае обусловлен диссоциацией молекулярного азота (которая имеет место в диапазоне 5000–9000 K), что существенно увеличивает эффективную теплоемкость воздуха. При максимальном разрядном токе 6 А при использовании вольфрамового электрода вблизи него на исследуемом участке спектра все же видны линии металлов, но, несмотря на это, удалось обработать полученные спектры. Формализация метода сравнения экспериментального спектра с модельным может быть выполнена следующим образом. Суть метода заключается в по-

строении модельных спектров для различных температур с небольшим температурным шагом (~50 K) и последовательном вычитании модельных спектров из экспериментального спектра. Затем разница между экспериментальным и модельным спектрами усредняется. Искомая температура – это температура, при которой модельный спектр меньше всего отклоняется от экспериментального. Ошибка при определении температуры этим методом составляет ± 100 K, а относительная погрешность около 2%.

Сравнение полученных экспериментальных зависимостей температуры от тока с результатами моделирования, проведенного в [27], показано на рис. 9б для точки, удаленной от электрода на 15 мм (сравниваются максимальная температура в сечении из данных моделирования с значением температуры, полученной экспериментально). Эти величины температуры имеют существенную количественную разницу. Предполагается, что отличие температуры, полученной в результате моделирования в коде Plasmaero от эксперимента связано с тем, что экспериментальный спектр является интегральным (усредненным) вдоль линии наблюдения, а в качестве результата моделирования используется максимальная локальная температура для данного участка.

Зная распределение температуры газа T_g и распределение приведенного электрического поля E/N по радиусу в разряде из результатов моделирования разряда в Plasmaero [27] (см. рис. 11), можно получить интегральный синтетический спектр для данных из моделирования. Распределение температуры электронов по радиусу было получено из распределения E/N на основе зависимости $T_e(E/N)$ из работы [33], полученной с помощью программы решения уравнения Больцмана BOLSIG+. Можно получить интегральный спектр, по своей сути аналогичный получаемому в эксперименте, следующим образом: в програм-

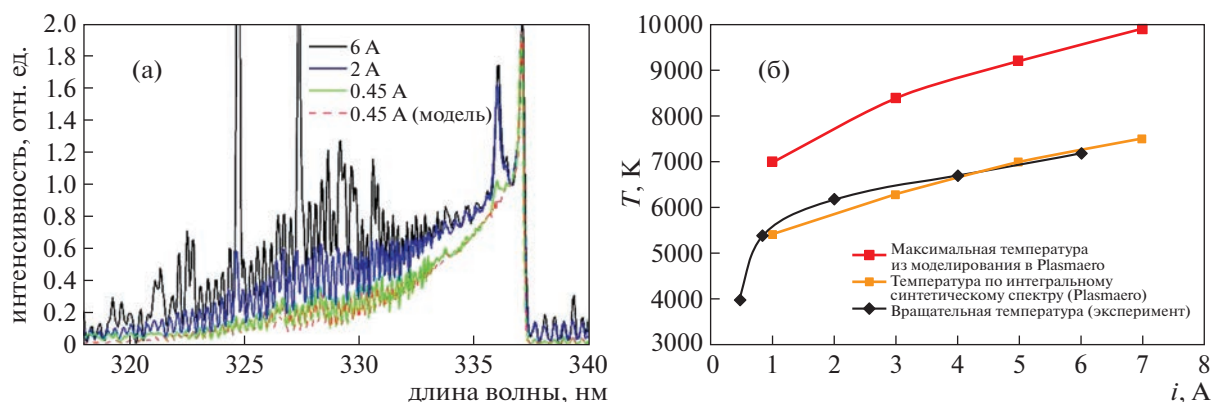


Рис. 9. Типичные спектры разряда при различном токе (а) и сравнение экспериментальных зависимостей температуры от величины тока разряда с результатами, полученными с помощью CFD-метода (б).

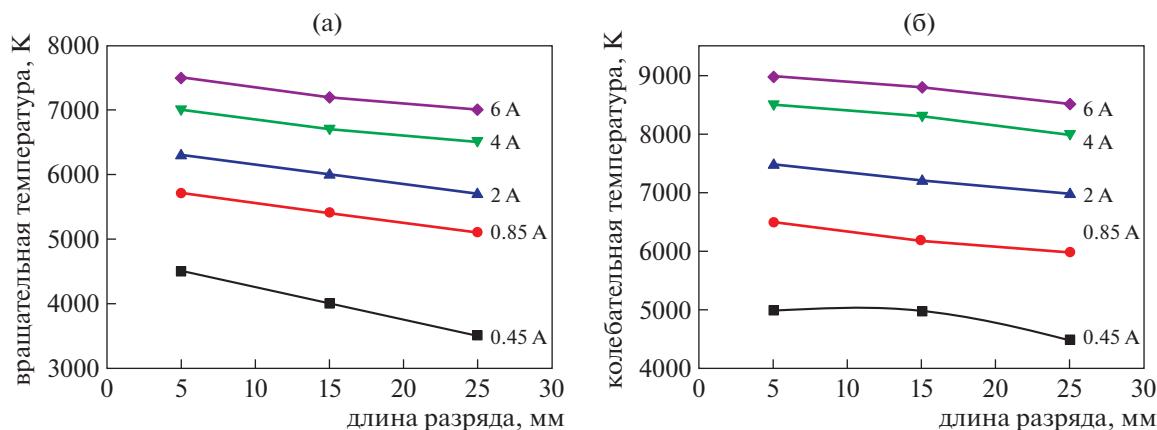


Рис. 10. Вращательная (а) и колебательная (б) температура плазмы вдоль разряда при различном токе разряда.

ме Spesair для каждой точки радиального распределения с шагом 0.1 мм при известных газовой температуре T_g и температуре электронов T_e в разрядной плазме строится спектр, как показано на рис. 12, после чего все полученные спектры складываются. Для полученного интегрального спектра выбирается ближайший модельный спектр, как показано на рис. 13, для определения “эффективной” (или средней) температуры. Например, при токе 5 А с максимальной температурой 9200 К модельный интегральный спектр, построенный с учетом радиальных распределений из моделирования в Plasmaго, будет соответствовать температуре 7000 К, что хорошо согласуется с экспериментом (см. рис. 9б).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований экспериментально были получены характеристики продольного разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке воздуха. Получена ВАХ разряда, которая хорошо согласуется с результатами моделирования. С помощью эмиссионной спектроскопии была определена температура электроразрядной плазмы. Температура плазмы была получена в 3-х точках вдоль разрядной нити при различном токе разряда. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы: температура разряда падает вдоль разряда; с увеличением тока разряда температура растет медленно из-за процесса диссоциации молекул азота; получена оценка температуры в разряде, которая составила 4000–7000 К в зависимости от тока разряда. Также было проведено сравнение полученной зависимости температуры от тока с результатами численного моделирования в CFD пакете Plasmaго. Показано, что при учете радиального распределения температуры, экспериментальные данные имеют хорошее численное совпадение с результатами моделирования.

Таким образом, измеряемая в эксперименте с помощью эмиссионной спектроскопии температура плазмы контрагированного разрядного канала является усредненной по радиусу, а максимальная температура примерно в 1.3 раза больше. С помощью высокоскоростной съемки и обработки полученных данных было установлено, что толщина токового канала увеличивается с ростом тока разряда, количественная оценка толщины токового канала в зависимости от тока составила 1.2–1.8 мм. По результатам обработки теневой визуализации разряда в потоке было получено, что тепловой конус увеличивается вдоль разряда, получена количественная оценка толщины теплового конуса, которая составила от 3 до 5.5 мм в

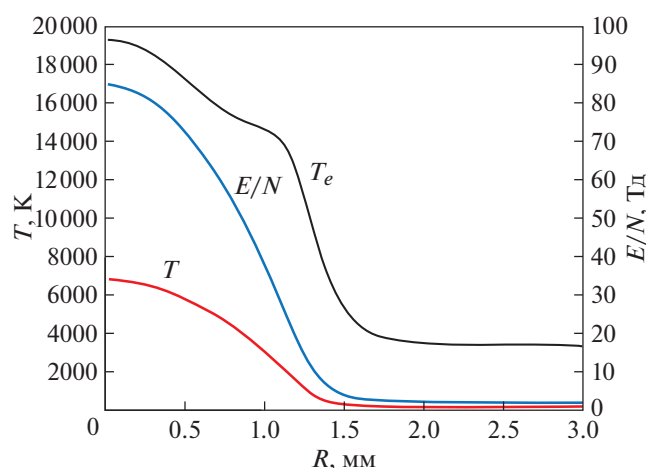


Рис. 11. Радиальные профили приведенного электрического поля E/N , температуры газа T_g и температуры электронов T_e на расстоянии 15 мм от переднего электрода при токе 1 А, полученные с помощью кода Plasmaго [27].

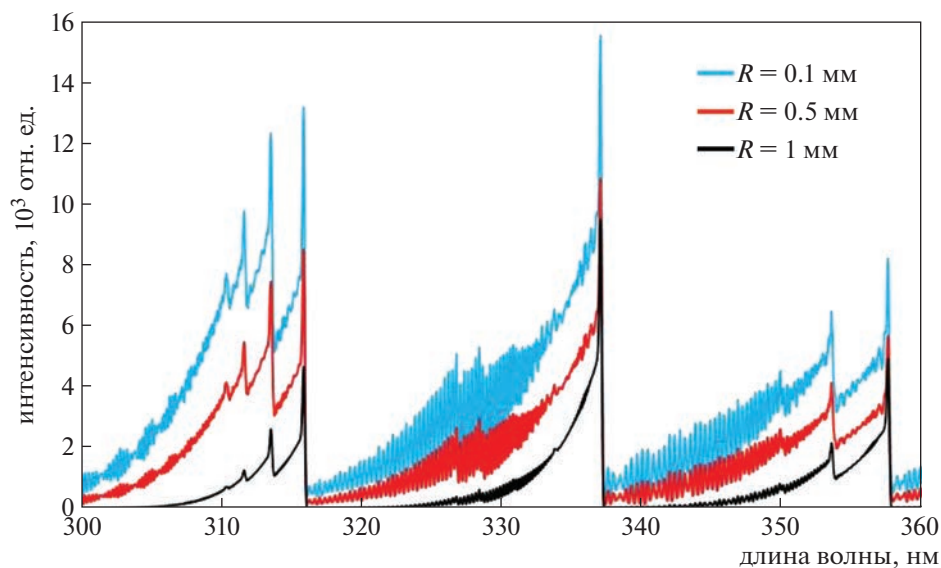


Рис. 12. Спектры оптического излучения в нескольких точках вдоль радиуса разрядного канала при токе 1 А.

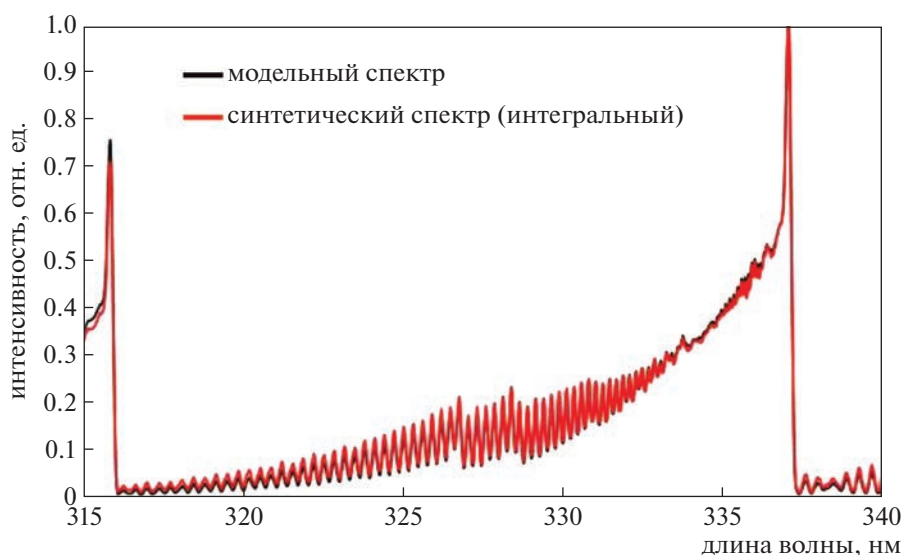


Рис. 13. Сравнение синтетического спектра, созданного с учетом распределения температуры по радиусу для температуры плазмы на оси 7000 К (разрядный ток 1 А), с модельным спектром для температуры 5200 К. Спектры нормированы на кант 337 нм.

точке 25 мм от переднего электрода при изменении тока. Полученные значения толщин токового канала и теплового конуса количественно хорошо совпадают с результатами численного моделирования.

Авторы благодарят ведущего инженера К.В. Савелкина за помощь в подготовке и проведении экспериментов. Данная работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-79-10408.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alferov V.I., Bushmin A.S.* // Sov. Phys. JETP. 1963. V. 17. P. 1190.
2. *Caruana D.* // Plasma Phys Control Fusion. 2010. V. 52. P. 124045.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/12/124045>
3. *Poggie J., McLaughlin T., Leonov S.* // Aerospace-Lab Journal AL10. 2015.
<https://doi.org/10.12762/2015.AL10-01>

4. Leonov S. // *Energies* (Basel). 2018. V. 11. P. 1733.
<https://doi.org/10.3390/en11071733>
5. Yatskih A.A., Semenov A.N., Yermolaev Yu.G., Kosinov A.D., Semionov N.V. // *Siberian Journal of Physics*. 2017. V. 12. P. 41.
<https://doi.org/10.25205/2541-9447-2017-12-3-41-48>
6. Falempin F., Firsov A.A., Yarantsev D.A., Goldfeld M.A., Timofeev K., Leonov S.B. // *Exp Fluids*. 2015. V. 56. P. 54.
<https://doi.org/10.1007/s00348-015-1928-4>
7. Ferrero A. // *Aerospace*. 2020. V. 7. P. 32.
<https://doi.org/10.3390/aerospace7030032>
8. Andrews P., Lax P., Leonov S. // *Energies* (Basel). 2022. V. 15. P. 7104.
<https://doi.org/10.3390/EN1519714>
9. Ma X., Fan J., Wu Y., Liu, Xue R. // *Physics of Fluids*. 2022. V. 34. P. 086102.
<https://doi.org/10.1063/5.0095487>
10. Tang M., Wu Y., Wang H. // *Acta Astronaut.* 2022. V. 198. P. 577.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.010>
11. Watanabe Y., Elliott S., Firsov A., Houpt A., Leonov S. // *J. Phys D Appl Phys*. 2019. V. 52. P. 444003.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/AB352F>
12. Hongyu W., Feng X., Jie L., Cheng Y., Yanguang Y. // *Acta Astronaut.* 2021. V. 187. P. 325.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.06.049>
13. Gong G., Li Y., Wang Y., Kuang P. // *AIP Adv.* 2020. V. 10. P. 055212.
<https://doi.org/10.1063/1.5145235>
14. Ershov A.P., Kamenshchikov S.A., Kolesnikov E.B., Logunov A.A., Firsov A.A., Chernikov V.A. // *Fluid Dynamics*. 2008. V. 43. P. 605.
<https://doi.org/10.1134/S0015462808040133>
15. Feng R., Sun M., Wang H., Huang Y., Tian Y., Wang C., Liu X., Zhu J., Wang Z. // *Aerosp Sci Technol.* 2022. V. 121. P. 107381.
<https://doi.org/10.1016/J.AST.2022.107381>
16. Leonov S.B., Elliott S., Carter C., Houpt A., Lax P., Ombrello T. // *Exp Therm Fluid Sci.* 2021. V. 124. P. 110355.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110355>
17. Firsov A.A., Kolosov N.S. // *J Phys Conf Ser.* 2021. V. 2100.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2100/1/012017>
18. Leonov S.B., Savelkin K.V., Firsov A.A., Yarantsev D.A. // *High Temperature*. 2010. V. 48. P. 896.
<https://doi.org/10.1134/S0018151X10060179>
19. Ershov A.P., Surkont O.S., Timofeev I.B., Shibkov V.M., Chernikov V.A. // *High Temperature*. 2004. V. 42. P. 667.
<https://doi.org/10.1023/B:HITE.0000046519.53287.47>
20. Ershov A.P., Kalinin A.V., Surkont O.S., Timofeev I.B., Shibkov V.M., Chernikov V.A. // *High Temperature*. 2004. V. 42. P. 865.
<https://doi.org/10.1007/S10740-005-0029-0>
21. Leonov S.B., Yarantsev D.A. // *Fluid Dynamics*. 2008. V. 43. P. 945.
<https://doi.org/10.1134/S001546280806015X>
22. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A. // *Plasma Physics Reports*. 2017. V. 43. P. 373.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X17030114>
23. Shibkov V.M., Shibkova L.V., Logunov A.A. // *Plasma Physics Reports*. 2018. V. 44. P. 754.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X18080056>
24. Perevoshchikov E.E., Firsov A.A. // *Plasma Physics Reports*. 2023. V. 49. № 5. P. 634.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22601894>
25. Bityurin V.A., Bocharov A.N., Dobrovolskaya A.S., Popov N.A., Firsov A.A. // *Plasma Physics Reports*. 2023. V. 49. № 5. P. 575.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22601869>
26. Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I., Ravaev A.A., Khodataev K.V. // *Technical Physics* 2004. V. 49. № 7. P. 833.
<https://doi.org/10.1134/1.1778855>
27. Firsov A., Bityurin V., Tarasov D., Dobrovolskaya A., Troshkin R., Bocharov A. // *Energies* (Basel). 2022. V. 15. P. 7015.
<https://doi.org/10.3390/en15197015>
28. Aksenov A.A. // *Computer Research and Modeling*. 2017. V. 9. P. 5.
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2017-9-5-20>
29. Bityurin V.A., Bocharov A.N. // *Fluid Dynamics* 2006. V. 41. № 5. V. 41. P. 843.
<https://doi.org/10.1007/S10697-006-0100-5>
30. Bityurin V.A., Bocharov A.N., Popov N.A. // *Fluid Dynamics*. 2008. 43:4. V. 43. P. 642.
<https://doi.org/10.1134/S0015462808040170>
31. Bityurin V.A., Bocharov A.N., Popov N.A. // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2019. V. 52. P. 354001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/AB2181>
32. Шибков В.М., Корнев К.Н., Логунов А.А., Нестеренко Ю.К. // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 7. Shibkov V.M., Kornev K.N., Logunov A.A., Nesterenko Yu.K. // *Plasma Physics Reports*. 2022. V. 48. P. 798.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X22700246>
33. Pusateri E.N., Morris H.E., Nelson E.M., Ji W. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. V. 120. P. 7300.
<https://doi.org/10.1002/2015JD023100>