

УДК 533.9.03

## ФОРМИРОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

© 2024 г. А. Г. Русских<sup>а,\*</sup>, А. С. Жигалин<sup>а</sup>, В. И. Орешкин<sup>а</sup>,  
Н. А. Лабецкая<sup>а</sup>, А. М. Кузьминых<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

\*e-mail: russ@ovpe2.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 14.05.2024 г.

После доработки 25.05.2024 г.

Принята к публикации 30.05.2024 г.

Описан метод формирования алюминиевых и водородных плазменных струй. Проиллюстрирован механизм формирования протяженных плазменных структур, реализуемый в процессе горения сильноточного вакуумного дугового разряда. Показано, что фронт токонесущей плазмы распространяется с различной скоростью для алюминиевой и водородной плазмы. Водородная плазма имеет существенно большую начальную скорость (около 30 см/мкс) по сравнению с алюминиевой плазмой (около 10 см/мкс). Показано, что скорость движения основной массы водородной плазменной струи составляет около 9 см/мкс. При помощи спектральной диагностики было доказано, что водородный плазменный джет действительно состоит в основном из водорода.

*Ключевые слова:* плазменные струи, сильноточный вакуумный дуговой разряд

DOI: 10.31857/S0367292124070054, EDN: OJNBVR

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию водородных струй (джетов) обусловлен тем, что в астрофизике существует ряд космических объектов [1], в которых наблюдается формирование весьма протяженных плазменных струй, состоящих из ионизованного водорода. Исследования космических струй долгое время основывались на сочетании аналитических, наблюдательных и численных исследований для выяснения связанных с этим сложных явлений. При наличии достаточно большого объема наблюдаемых в космосе объектов типа плазменных джетов, понимание процесса их формирования до сих пор основывается только на теоретических моделях [2] и предположениях. Очевидно, что нахождение реального, экспериментально контролируемого механизма формирования таких структур чрезвычайно полезно для исследования таких систем. Кроме того, есть большой интерес к моделированию взаимодействия водородных плазменных струй с такими объек-

тами как газ или с другой плазмой, которая встречается на пути такого джета. При определенных условиях результаты лабораторных экспериментов можно напрямую сравнивать с астрофизическими системами с помощью аргументов масштабирования [3].

В лабораторных условиях интерес к созданию металлических плазменных струй обусловлен возможностью их использования как в технологических процессах, так и в научно-исследовательских целях (например, для формирования плазменной оболочки лайнерных систем, которые используются как источники мощного рентгеновского излучения [4–11]).

Из литературы известно несколько способов формирования плазменных струй. Так в работах [3, 12] для формирования плазменных струй рассматривается использование модифицированного Z-пинча проволочной решетки. В этих экспериментах быстро нарастающий ток (достигающий 1 МА за 240 нс) подается на конический каскад из тонких металлических (Al, W, Fe) проводов.

Резистивный нагрев быстро превращает поверхность проводов в горячую корональную плазму, которая затем ускоряется по направлению к оси массива проводов за счет суммарной силы  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ . Когда плазма достигает оси, образуется конечный стоячий скачок уплотнения, и плазма перенаправляется в осевую струю. В работах [3, 13, 14] сообщается об экспериментах, в которых плазменная струя создавалась собственным тороидальным магнитным полем импульса тока в конфигурации струи «магнитная башня». В данных экспериментах источником плазмы служила взрываема алюминевая фольга. В работе [15] представлены результаты экспериментов по исследованию осевых плазменных потоков, образующихся при сжатии токовой плазменной оболочки, на плазмо-фокусной установке КПФ-4-ФЕНИКС, в рамках программы по лабораторному моделированию астрофизических джетов. О генерации плазменных струй в плазменном фокусе сообщается также и в работе [16]. Для лабораторного моделирования струйных выбросов из молодых звезд в работе [17] также была использована плазмо-фокусная установка ПФ-3. С целью исследования и определения характеристик процессов взаимодействия плазменных потоков с окружающей средой и геомагнитным полем, процессов генерации ионосферных возмущений разных пространственных и временных масштабов в работе [18] получены временные зависимости газодинамических параметров высокоскоростной алюминиевой плазменной струи при ее инъекции в ионосферу на высотах 140–300 км с помощью взрывных плазменных генераторов ВГПС.

Формированию и использованию металлических плазменных струй авторами статьи также было посвящено несколько работ [19–28]. В данной же работе основной упор делается на исследовании водородных плазменных струй, хотя в качестве сравнения свойств формируемых джетов приводятся некоторые данные и для плазменных струй из алюминия. Работа посвящена исследованию узконаправленных плазменных струй в вакууме, формирующихся при горении сильноточного вакуумного дугового разряда. В зависимости от того какие материалы используются в качестве электродов и изоляторов в плазменной пушке, будет меняться и состав формируемого плазменного джета. Так, например, если электроды плазменной пушки будут изго-

товлены из легкоплавких материалов (алюминия, магния, висмута и т. д.), а изолятор из полиэтилена или керамики, то элементный состав джета будет определяться материалом электродов. В случае использования в качестве электродов дуги тугоплавких металлов (железо, молибден, вольфрам и т. д.), а в качестве — изолятора капролона плазменный джет будет преимущественно водородным.

## 2. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ

Принцип формирования плазменных струй в процессе горения вакуумного сильноточного разряда проиллюстрирован на рис. 1. Коаксиальные электроды дугового разряда разделены изолятором, при этом торец центрального стержневого катода, верхняя плоскость изолятора и анода находятся в одной плоскости. При коммутации вакуумного дугового разряда происходит самопробой по поверхности диэлектрика и ток дуги  $J_1$  начинает протекать от анода к катоду по поверхности диэлектрика (см. рис. 1а).

Поскольку речь идет о сильноточном дуговом разряде, то ток  $J_1$  достаточно равномерно протекает по всей поверхности диэлектрика, материал диэлектрика начинает активно испаряться и ионизоваться, что приводит к появлению слоя плазмы. Одновременно происходит и испарение и ионизация материала электродов, а интенсивность данного процесса зависит от эрозионных свойств материала, из которого они изготовлены. Данный процесс авторами статьи исследовался в работах [19, 26–28]. Магнитное поле тока  $J_1$  создает собственное магнитное поле  $B\varphi_1$  которое воздействует на создаваемую плазму с силой  $\mathbf{J}_1 \times \mathbf{B}\varphi_1$  ускоряя ее по направлению вверх. Поскольку ток протекает непосредственно через плазму, то движущаяся вверх плазма увлекает за собой и часть тока дуги  $J_2$ , который оказывается вмороженным в данную часть плазмы и распределен по всему расширяющемуся объему плазмы (см. рис. 1б, в). Ток  $J_2$  также обладает собственным магнитным полем  $B\varphi_2$  которое давит на плазму с силой  $\mathbf{J}_2 \times \mathbf{B}\varphi_2$ , но уже по направлению к оси формируемого джета. Именно данная составляющая магнитного давления тока дуги формирует плазменную структуру в виде джета. Кроме того, часть тока  $J_2$  протекает через область расширяющейся разреженной плазмы выталкивая плазму на периферию радиально от плазменной пушки.

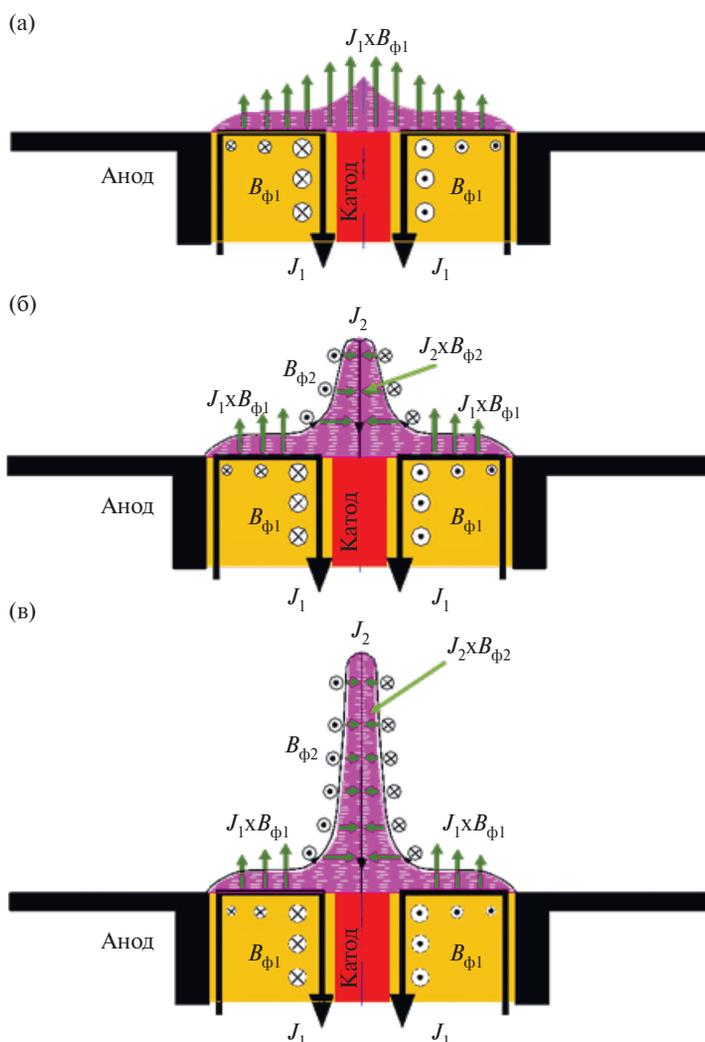


Рис. 1. Механизм формирования плазменных струй.

По всей видимости именно разреженная, но хорошо проводящая периферийная плазма играет роль обратного токопровода для тока дугового разряда. Разумеется, схема, показанная на рис. 1, является упрощенной, а ток  $J_2$  протекает не только по внешней поверхности плазменной струи, а распределен по всей высоте плазменного столба. Для того чтобы понять как именно распределен ток по высоте плазменного джета и каковы свойства создаваемой плазмы и была проведена серия экспериментов, описанная ниже.

### 3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на экспериментальном комплексе, который включает в себя сильноточный генератор ИМРИ-5 [29] и набор как электрофизической, так и оптической диагностики. Сильноточный генератор ИМРИ-5

использовался в качестве источника тока для плазменной пушки и обеспечивал синусоидальный ток с амплитудой около 250 кА и фронтом нарастания 600 нс. В качестве узла нагрузки генератора использовалась плазменная пушка (рис. 2), электроды которой находились в одной плоскости и разделялись изолятором. Вакуумный дуговой разряд инициировался при пробое по поверхности торца изолятора. Диаметр катода, расположенного по центру пушки составлял 3 мм. Диаметр изолятора составлял 10 мм. Состав плазмы определялся материалом электродов и изолятора узла нагрузки. В данной статье рассмотрено два варианта узла нагрузки.

В первом варианте электроды плазменной пушки были изготовлены из алюминия, а в качестве изолятора использовался полиэтилен ( $[-CH_2-CH_2-]_n$ ). Полиэтилен относительно устой-

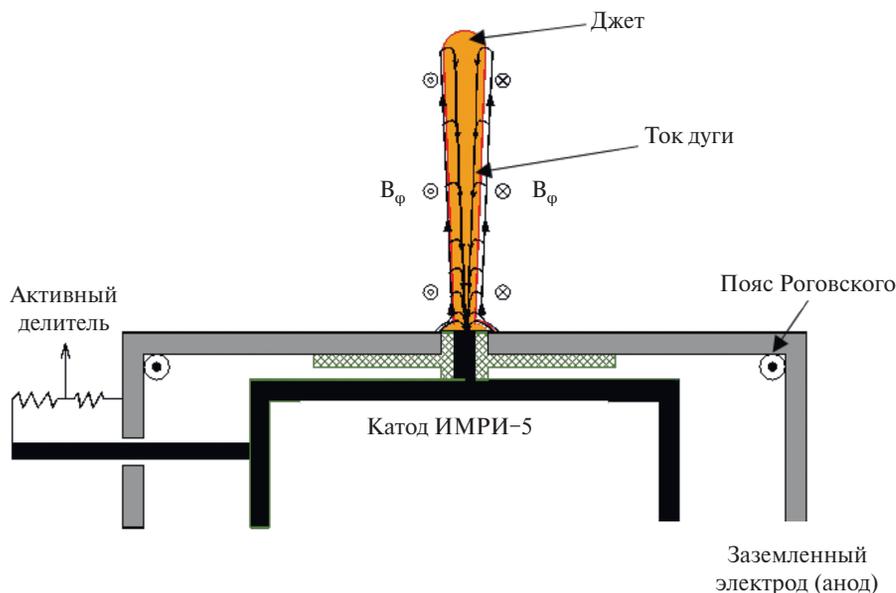


Рис. 2. Схема эксперимента.

чив к термическому и радиационному воздействию и в процессе горения дугового разряда выделяет относительно небольшое количество водорода. Алюминий же напротив является легкоплавким материалом, а электроды, изготовленные из него, легко испаряются. Поскольку при таком сочетании материала электродов и изолятора основным испаренным материалом является алюминий, то в данном случае мы будем говорить об алюминиевом джете.

Во втором варианте электроды плазменной пушки были изготовлены из стали, а в качестве изолятора использовался капролон (полиамид  $(-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}-)_n$ ). Полиамид, обладая высокими механическими свойствами, тем не менее имеет низкую стойкость к радиации и разлагается при температуре свыше  $300^\circ\text{C}$  выделяя большое количество водорода. Стальные электроды же имеют очень высокую эрозионную устойчивость и практически не испаряются при горении дугового разряда. Поскольку при таком сочетании материала электродов и изолятора основным испаренным материалом является водород, то в данном случае мы будем говорить об водородном джете. Необходимо отметить, что поскольку типичная электронная температура плазмы вакуумного дугового разряда составляет  $3-5$  эВ [30], а энергия связи молекулярного водорода и энергия ионизации атомарного водорода составляет  $4.48$  и  $13.6$  эВ соответственно,

при испарении водорода с поверхности диэлектрика может присутствовать некоторое количество молекулярного и атомарного не ионизованного водорода. Определение соотношения долей нейтрального и ионизованного водорода не входит в задачи данных экспериментов и будет проведено в дальнейших работах. Поскольку на нейтральные частицы не действуют электромагнитные поля, формирующие структуру плазменной струи, то в дальнейшем мы будем говорить только о водороде, находящемся в ионизованном состоянии.

В процессе проведения экспериментов использовалась схема, показанная на рис. 2.

#### 4. ДИАГНОСТИКА

Для определения полного тока дуги использовался пояс Роговского, расположенный на входе коаксиальных электродов плазменной пушки, вне зоны доступа плазмы. Пояс Роговского состоял из  $1040$  витков и был нагружен на шунт с сопротивлением  $196$  мОм. Производная полного тока дуги измерялась индуктивной петлей, расположенной также на входе коаксиальных электродов плазменной пушки.

В ходе проведения экспериментов при помощи 4-кадровой оптической камеры HFSC-Pro регистрировалось изображение плазменной струи в различные моменты времени с экспозицией в  $10$  нс. Время между кадрами  $120$  нс. Для ре-

гистрации изображения движения плазмы вдоль оси плазменной струи, использовался оптический хронограф ФЭР-7 с щелевой разверткой, при этом щель хронографа шириной 200 мкм располагалась по центру вдоль оси плазменной пушки.

В части экспериментов регистрировался видимый спектр собственного свечения плазмы с разрешением по времени. Для регистрации видимого спектра плазменной струи был использован спектрометр с щелевой разверткой Hamamatsu Streak Camera C10910. Щель спектрометра шириной 200 мкм располагалась поперек плазменной струи на расстоянии 0.5 см от торца плазменной пушки.

Для того чтобы понять, как распределен ток, протекающий по плазме, были проведены измерения величины тока, протекающего на разных высотах плазменного столба. При проведении данных измерений формирование плазменной струи происходило внутри коаксиального металлического цилиндра диаметром 30 мм и высотой 60 мм (рис. 3). Пояс Роговского регистрировал полный ток, протекающий через плазменную пушку. Для регистрации производной тока, протекающего на разных высотах плазменного столба использовались индуктивные петли. Индуктивные петли были расположены на расстоянии 10, 20 и 30 мм от торца пушки. Для того чтобы получить ток, протекающий в местах

расположения индуктивных петель, сигналы, полученные с индуктивных петель, интегрировались по времени. Для калибровки индуктивных петель были проведены дополнительные измерения, в которых участок цепи, на котором формируется джет, заменялся на металлический стержень, соединенный с заземленным электродом. Калибровка производилась исходя из того, что в режиме короткого замыкания индуктивные петли должны измерять одну и ту же  $dI/dt$  что и калиброванная петля на входе узла нагрузки.

Для понимания того, как можно интерпретировать сигналы с индуктивных петель, необходимо помнить, что формирующийся джет окружен не вакуумом, а хоть и разряженной, но достаточно горячей и хорошо проводящей плазмой. Ток генератора, протекающий от анода к катоду распределен во всем объеме расширяющейся плазмы, а его магнитное поле, вмороженное в эту плазму с одной стороны, формирует плазменный джет, а с другой стороны выталкивает плазму на периферию, формируя своего рода обратный токопровод. Поскольку первая индуктивная петля расположена примерно на одном расстоянии от пушки как по высоте (1 см) так и по радиусу (1.5 см), то до момента когда расширяющаяся малоплотная плазма долетит до места расположения датчика его сигнал по всей видимости пропорционален величине скорости нарастания не скомпенсиро-

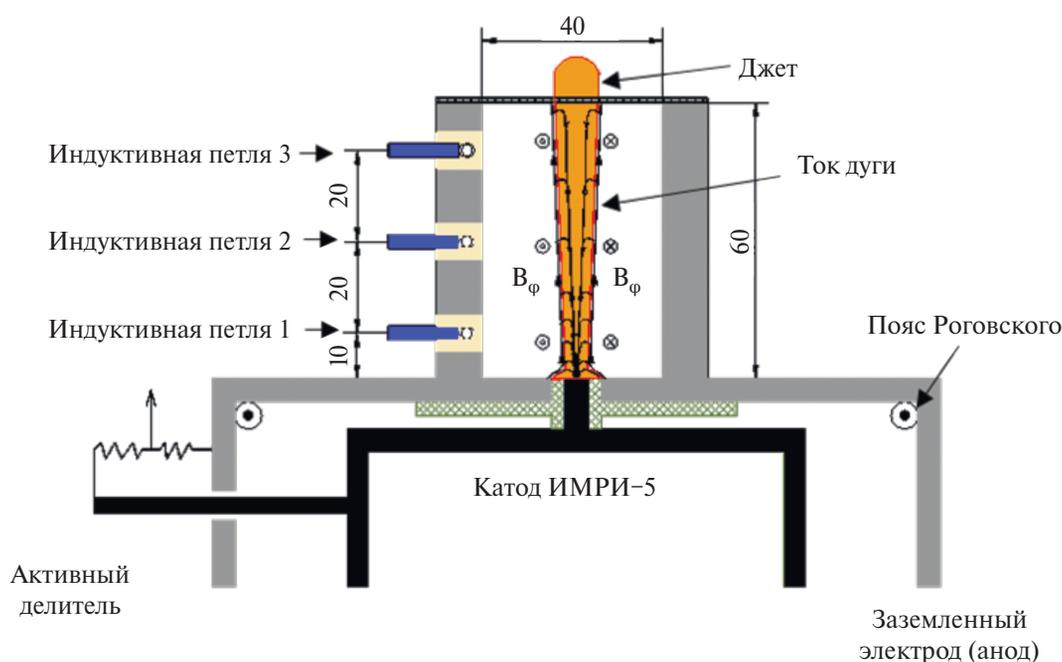


Рис. 3. Схема измерений распределения тока по высоте плазменной струи.

ванного магнитного поля в области расположения петли. Нескомпенсированное магнитное поле может появиться за счет конечной величины скорости диффузии магнитного поля внутри формируемой плазменной среды и во время быстрого роста тока может достигать заметной величины. После того, как плазма достигнет стенки коаксиального металлического цилиндра, можно считать, что петли по мере расширения плазмы погружаются внутрь плазменного обратного токопровода и их сигналы пропорциональны скорости нарастания тока генератора (с учетом скорости диффузии магнитного поля в данной среде). В данной работе влияние скорости диффузии магнитного поля в плазме на показания индуктивных петель не проводилось, поэтому значения регистрируемых ими токов можно считать несколько заниженными.

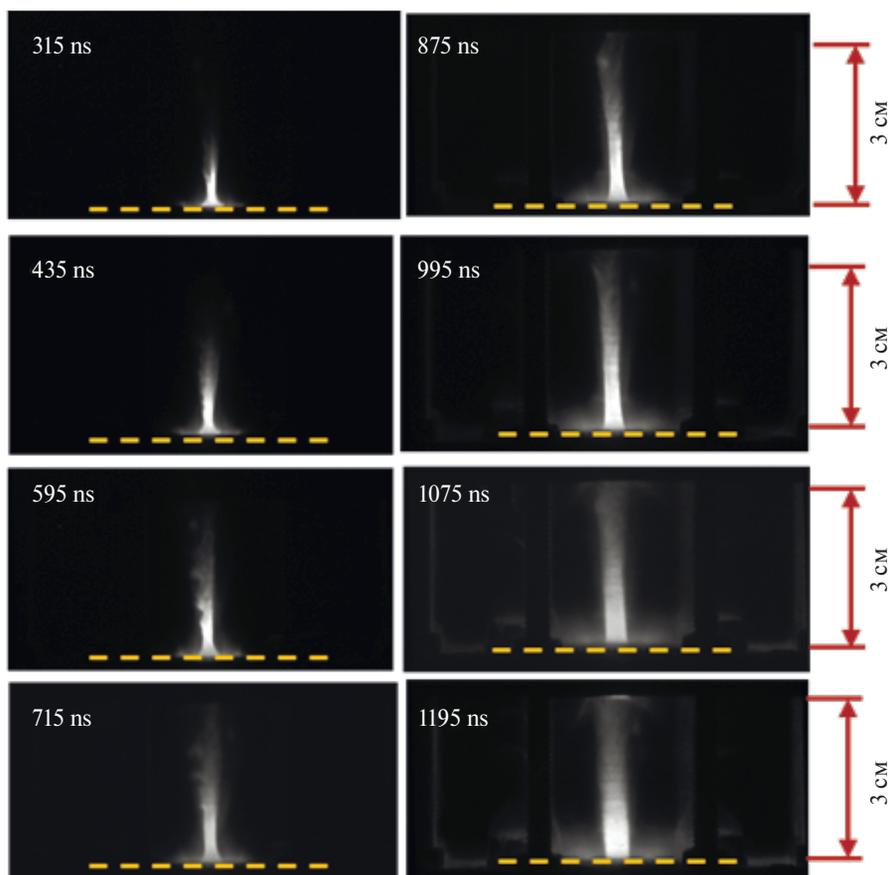
#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 4 показаны изображения алюминиевой плазменной струи, полученные в различные мо-

менты времени. На рис. 5 показаны такие же изображения, но уже водородной плазменной струи. Высота наблюдаемой области ограничена размерами окна вакуумной камеры и составляет 3 см. Время регистрации изображения показано на фотографиях и отсчитывается от начала протекания тока дуги.

На рис. 6 приведены экспериментальные значения тока дугового разряда, измеренные на разных высотах плазменной струи. На данном рисунке штриховыми линиями показаны данные для алюминиевого джета, а сплошными для водородного.

Как можно видеть из рис. 6, ток на разных высотах появляется в различное время и это дает нам информацию о скорости движения фронта плазменного джета. На рис. 7 приведены экспериментально измеренное время появления тока на разных высотах. Время появления тока на разных высотах определялось при значениях соответствующего сигнала равного 10% его амплитудного значения. Кружки – это время появления тока на



**Рис. 4.** Изображения алюминиевой плазменной струи, полученные при помощи 4-кадровой оптической камеры HFSC-Pro в различные моменты времени [19].

различных расстояниях от плазменной пушки; штриховые линии – это полином второго порядка; сплошная линия – это скорость распространения фронта плазмы джета.

Делая оценки скорости распространения фронта токнесущей плазмы, следует учитывать, что с такими скоростями движется только самая горячая, малоплотная часть плазмы. Основная

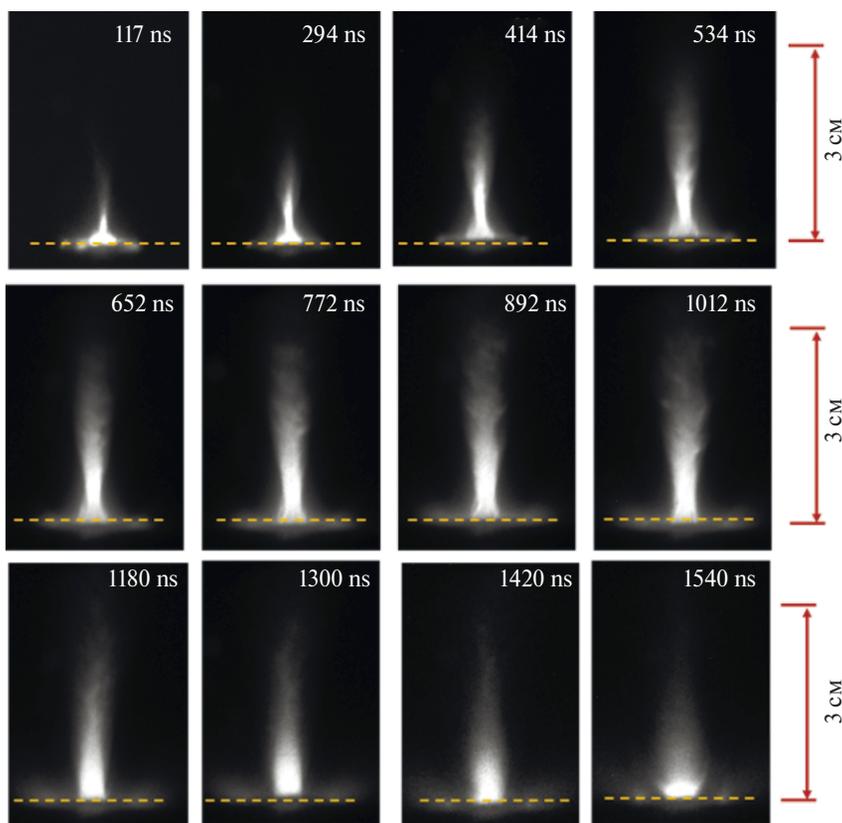


Рис. 5. Изображения водородной плазменной струи, полученные при помощи 4-кадровой оптической камеры HFSC-Pro в различные моменты времени.

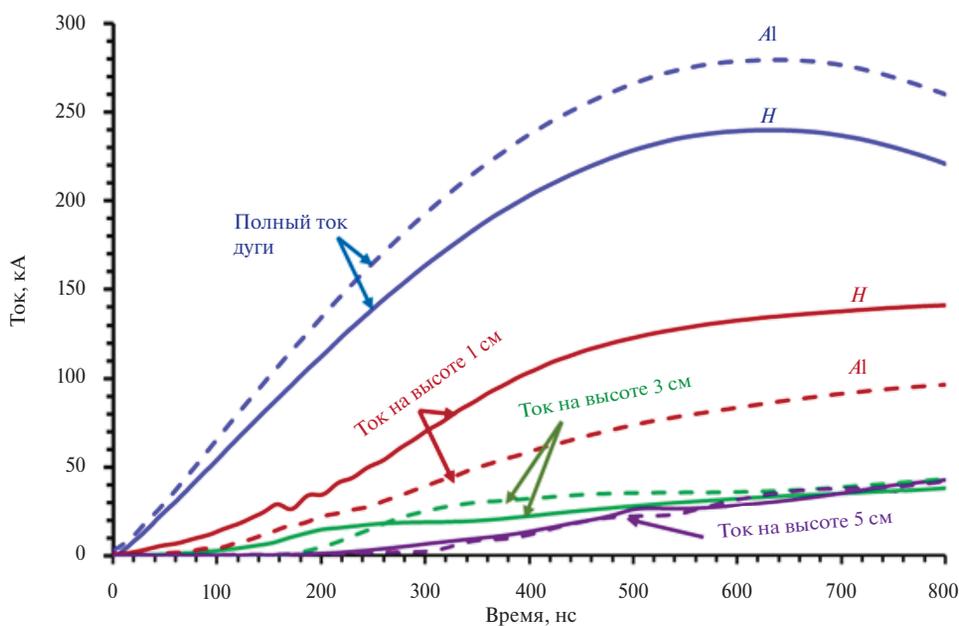


Рис. 6. Зависимость тока дуги от времени на разных высотах.

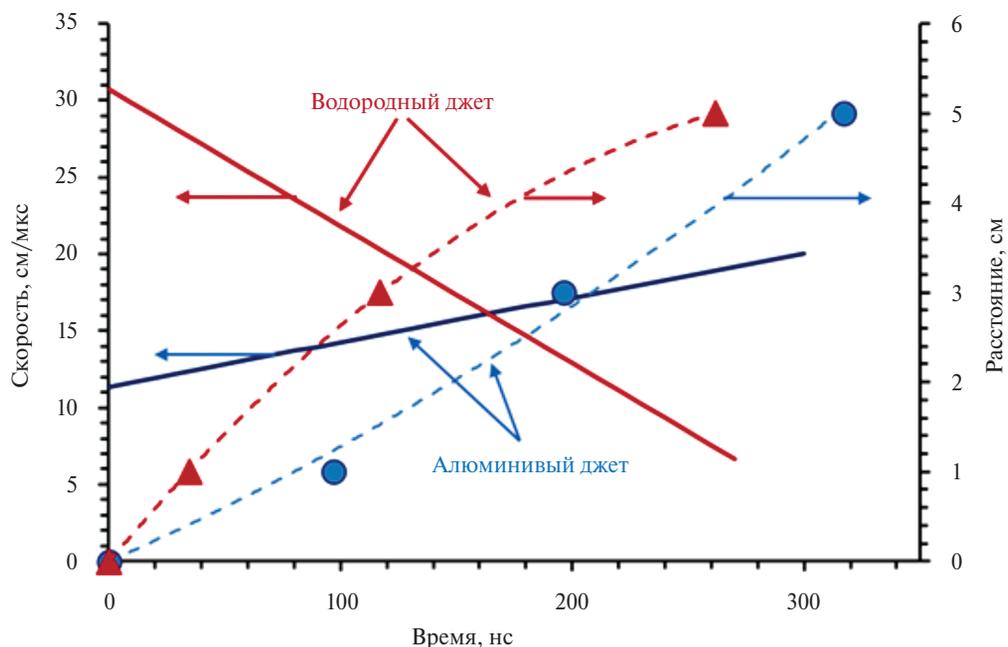


Рис. 7. Время появления тока на разных высотах.

часть плазменного джета движется гораздо медленнее. Для определения скорости распространения основной массы плазмы джета вдоль его оси по направлению от плазменной пушки использовался оптический хронограф с щелевой разверткой ФЭР-7, при этом щель хронографа располагалась вдоль оси распространения плазменной струи. Развертка хронографа составляла 250 нс/см. В данном случае тангенс угла наклона изображения распространяющейся плазмы относительно временной оси соответствует ее скорости, которая равна около 9 см/мкс. Данные, полученные о движении основной части водородного плазменного джета приведены на рис. 8. Для алюминиевой плазменной струи таких измерений не проводилось.

Для того чтобы убедиться, что основным веществом водородной плазменной струи является именно водород, в части экспериментов регистрировался видимый спектр собственного свечения плазмы с разрешением по времени. Для регистрации видимого спектра плазменной струи был использован спектрометр с щелевой разверткой Hamamatsu Streak Camera C10910. Щель спектрометра располагалась поперек плазменной струи на расстоянии 0.5 см от торца плазменной пушки. Полученный спектр с временным разрешением изображен на рис. 9а. На рис. 9б приведена пропись интенсивности

спектральных линий в зависимости от длины волны. Спектр с временным разрешением регистрировался только для водородного джета.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из фотографий, приведенных на рис. 4 и 5, видно, что алюминиевый джет заметно более ровный, менее расходящийся и меньше подвержен развитию гидродинамических неустойчивостей по сравнению с водородным джетом. Если в алюминиевой плазме неустойчивости наблюдаются до 700-й наносекунды, а затем поток стабилизируется, то в водородной плазме неустойчивости наблюдаются на протяжении всего периода наблюдения и приводят к разделению плазменного потока на отдельные сгустки. Необходимо отметить, что именно такая картина наблюдается при формировании водородных плазменных джетов в космосе [1] (рис. 10).

Несмотря на то, что изображения приведенные на рис. 4 и 5 ограничены по высоте из-за малой апертуры вакуумных оптических окон, можно утверждать, что малая расходимость плазменной струи сохраняется как минимум до высоты 6 см, поскольку после срабатывания плазменной пушки, в верхней сетке плазма выжигала отверстие диаметром около 5 мм (см. рис. 3).

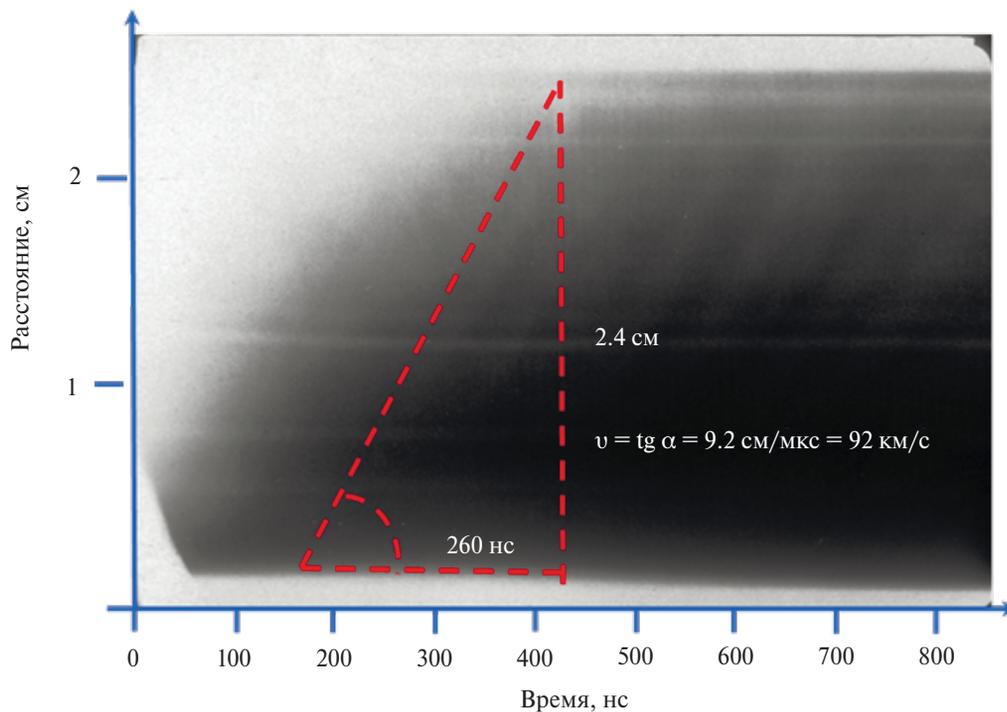


Рис. 8. Определение скорости распространения основной, плотной части водородной струи.

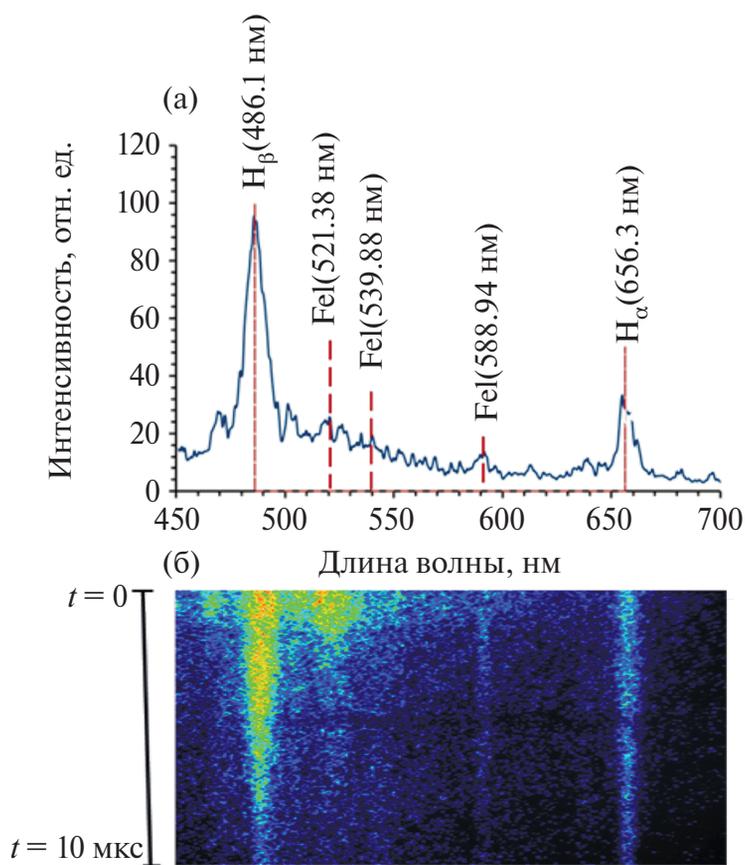


Рис. 9. Оптический спектр собственного свечения водородной плазменной струи.

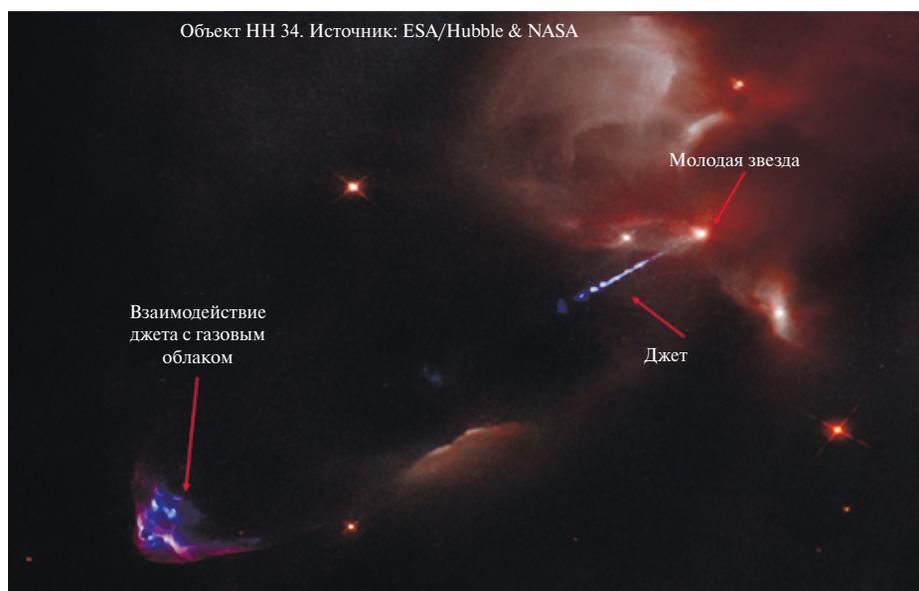


Рис. 10. Формирование водородного джета в космосе.

Из данных, приведенных на рис. 6 видно, что ток протекает по всей высоте плазменного столба. Величина тока уменьшается с высотой, т. е. по мере увеличения высоты столба плазмы часть тока постоянно ответвляется и протекает внутри плазменного столба к катоду. Видно, что на максимуме тока дугового разряда на высоте 1 см от пушки протекает примерно половина тока дуги, а на высоте в 3 и 5 см примерно 10% от полного тока, что составляет около 30 кА, что по всей видимости вполне достаточно для удержания плазмы от радиального разлета. Также видно, что ток на разных высотах начинает протекать в разное время что дает нам информацию о скорости движения фронта плазменного джета. Из рис. 7 видно, что фронт токонесущей плазмы распространяется с различной скоростью для алюминиевой и водородной плазмы. Водородная плазма имеет существенно большую начальную скорость (около 30 см/мкс) по сравнению с алюминиевой плазмой (около 10 см/мкс), однако ее скорость падает с высотой (до 5 см/мкс на высоте 5 см), в то время как скорость алюминиевой плазмы возрастает (до 20 см/мкс на высоте 5 см). Данный факт говорит о существенно разных условиях протекания тока в этих плазменных образованиях. Для объяснения данного факта необходимо проведение детального моделирования процессов, происходящих в таких системах.

Как уже говорилось выше, скорости, получаемые при помощи измерений магнитными зондами, характеризуют движение не основной массы

плазмы (которую мы видим на фотографиях), а лишь малой, самой горячей ее части, имеющей наибольшую проводимость. Как видно из рис. 8 основная часть плазменного джета движется медленнее и для водородной плазмы составляет около 9 см/мкс.

Состав алюминиевой плазменной струи обсуждался в работах [19–28], в которых радиографическим методом и при помощи времяпролетного масс-спектрометра показали, что основным материалом, поставляемым плазменной пушкой с легкоплавкими электродами, является материал электродов. Для того чтобы убедиться в том, что основным материалом водородной плазменной струи является именно водород, в части экспериментов регистрировался оптический спектр с временным разрешением.

Как видно из полученного спектра (см. рис. 9), основными линиями спектра являются линии водорода  $H_{\alpha}$  (656 нм) и  $H_{\beta}$  (486.1 нм) с небольшими примесями железа. Наличие слабых интенсивных линий железа можно объяснить близким расположением щели спектрометра к плазменной пушке, и видимо небольшая часть испаренного металла успевает долететь до места регистрации спектра, однако по мере удаления количество примесей должно уменьшаться за счет того, что элементы с большей массой движутся гораздо медленнее водорода.

По полученным спектрам излучения плазмы можно произвести оценку параметров плазмы

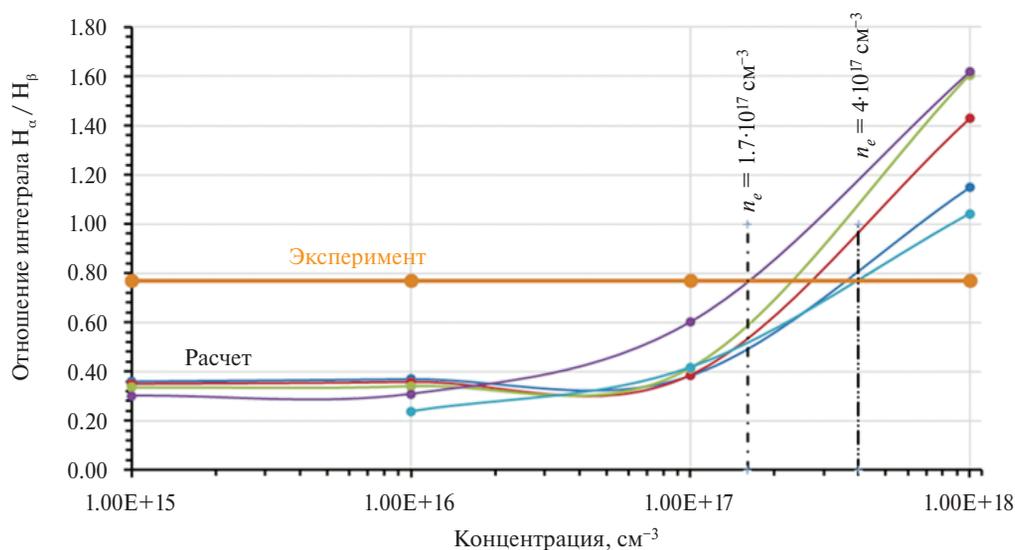


Рис. 11. Сравнение теоретического и экспериментально найденного отношения интенсивностей линий водорода.

с помощью ударной излучательной модели [31]. На рис. 11 приведены отношения интенсивностей линий водорода, полученных из экспериментального спектра и такие же соотношения, полученные из расчета по ударной излучательной модели для разных концентраций плазмы и ее температуры. Расчетные температурные кривые приведены для  $Te = 1, 2, 3, 4$  и  $5$  эВ. При проведении данных теоретических оценок, выбор диапазона температуры плазмы обусловлен типичными значениями горения дугового разряда в вакууме [30]. Из полученных данных можно заключить, что концентрация плазмы лежит в пределах  $(2-4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Разумеется, данные оценки являются достаточно грубыми, поскольку сделаны при допущении, что плазма дающая основной вклад в интенсивность используемых в расчете линий находится в термодинамическом равновесии. Однако, принимая в расчет то, что периферийная плазма, которая может существенно отличаться по температуре от плазмы в плотном центральном столбе за счет своей низкой плотности имеет низкую светимость и дает минимальное искажение соотношений интенсивности наблюдаемых линий.

### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований был разработан новый способ формирования как металлической, так и водородной плазменной струи. При помощи электрических зондовых измерений была произведена оценка скорости распространения фронта плазменного джета в различные мо-

менты времени и на расстоянии от 1 до 5 см от плазменной пушки. Фронт токонесущей плазмы распространяется с различной скоростью для алюминиевой и водородной плазмы. Водородная плазма имеет существенно большую начальную скорость (около 30 см/мкс) по сравнению с алюминиевой плазмой (около 10 см/мкс), однако ее скорость падает с высотой (до 5 см/мкс на высоте 5 см), в то время как скорость алюминиевой плазмы возрастает (до 20 см/мкс на высоте 5 см). Оптический хронограф показал, что скорость движения основной массы водородной плазменной струи составляет около 9 см/мкс. При помощи спектральной диагностики было доказано, что водородный плазменный джет действительно состоит в основном из водорода. Полученные спектральные данные в сочетании с оптическими и электрическими измерениями позволят провести в дальнейшем моделирование процесса формирования таких плазменных структур.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 20-19-00364.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reipurth Bo, Heathcote S., Morse J., Hartigan P., Bally J. // *Astron. J.* 2002. V. 123. P. 362. Doi: 10.1086/324738.
2. Урвачев Е.М., Лосева Т.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. // *Физика плазмы.* 2023. Т. 49. С. 1118. Doi: 10.31857/S0367292123601145.
3. Lebedev S.V., Frank A., Ryutov D.D. // *Rev. Modern Phys.* 2019. V. 91. P. 025002. Doi: 10.1103/RevModPhys.91.025002.

4. Александров В.В., Баско М.М., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Фролов И.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. С. 613.  
Doi: 10.31857/S0367292121070039.
5. Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Смирнов В.П., Александров В.В., Олейник Г.М., Орешкин В.И., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Грибов А.Н., Самохин А.А., Сасоров П.В., Митрофанов К.Н., Медовицков С.Ф., Хищенко К.В., Рупасов А.А., Болховитинов Е.А. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 11.
6. Cherdizov R.K., Fursov F.I., Kokshenev V.A., Kurmaev N.E., Labetsky A.Yu., Ratakhin N.A., Shishlov A.V., Cikhardt J., Cikhardtova B., Klir D., Kravarik J., Kubes P., Rezac K., Dudkin G.N., Garapatsky A.A., Padalko V.N., Varlachev V.A. // J. Phys.: Conf. Series. 2017. V. 830. P. 012017.  
Doi: 10.1088/1742-6596/830/1/012017.
7. Kalinin Yu.G. // Plasma Phys. Repts. 2003. V. 29. P. 571.  
Doi: 10.1134/1.1592556.
8. Haines M.G., Lebedev S.V., Chittenden J.P., Beg F.N., Bland S.N., Dangor A.E. // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. P. 1672.  
Doi: 10.1063/1.874047.
9. Shishlov A.V., Baksht R.B., Chaikovskiy S.A., Fedunin A.V., Fursov F.I., Kovalchuk B.M., Kokshenev V.A., Kurmaev N.E., Labetsky A.Yu., Oreshkin V.I., Rousskikh A.G., Zhidkova N.A., Lassalle F., Bayol F., Mangement C. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2007. V. 35. P. 592.  
Doi: 10.1109/TPS.2007.896776.
10. Coleman P.L., Apruzese J.P., Velikovich A.L., Thornhill J., Davis J., Coverdale C.A., Levine J.S., Failor B., Sze H., Banister J. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2007. V. 35. P. 31.  
Doi: 10.1109/TPS.2006.889273.
11. Giuliani J.L., Commisso R.J. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2015. V. 43. P. 2385.  
Doi: 10.1109/TPS.2015.2451157.
12. Gardiner T.A., Frank A., Blackman E.G., Lebedev S.V., Chittenden J.P., Ampleford D., Bland S.N., Ciardi A., Sherlock M., Haines M.G. // Astrophys. Space Sci. 2003. V. 287. P. 69.  
Doi: 10.1023/B:ASTR.0000006202.93195.e3.
13. Suzuki-Vidal F., Lebedev S.V., Ciardi A., Bland S.N., Chittenden J.P., Hall G.N., Harvey-Thompson A., Marocchino A., Ning C., Stehle C., Frank A., Blackman E.G., Bott S.C., Ray T. // Astrophys. Space Sci. 2009. V. 322. P. 1.  
Doi: 10.1007/s10509-009-9981-1.
14. Gourdain P.A., Blesener I.C., Greenly J.B., Hamter D.A., Knapp P.F., Kusse B.R., Schrafel P.C. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 012706.  
Doi: 10.1063/1.3292653.
15. Митрофанов К.Н., Ананьев С.С., Войтенко Д.А., Крауз В.И., Астапенко Г.И., Марколия А.И., Мятон В.В. // Астрономич. ж. 2017. Т. 94. С. 762.  
Doi: 10.7868/S0004629917080084.
16. Полухин С.Н., Никулин В.Я., Силин П.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 328.  
Doi: 10.31857/S0367292122040114.
17. Бескин В.С., Крауз В.И., Ламзин С.А. // УФН. 2023. Т. 193. С. 327.  
Doi: 10.3367/UFN.2021.12.039130.
18. Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Урвачев Е.М. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 956.  
Doi: 10.31857/S0367292122600583.
19. Rousskikh A.G., Artyomov A.P., Zhigalin A.S., Fedunin A.V., Oreshkin V.I. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2018. V. 46. P. 3487.  
Doi: 10.1109/TPS.2018.2849205.
20. Rousskikh A.G., Zhigalin A.S., Oreshkin V.I., Chaikovskiy S.A., Labetskaya N.A., Baksht R.B. // Physics of Plasmas. 2011. V. 18. P. 092707.  
Doi: 10.1063/1.3640535.
21. Русских А.Г., Бакуит Р.Б., Жигалин А.С., Орешкин В.И., Чайковский С.А., Лабетская Н.А. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 651.
22. Baksht R.B., Rousskikh A.G., Zhigalin A.S., Oreshkin V.I. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 182.  
Doi: 10.1109/TPS.2012.2230453.
23. Русских А.Г., Жигалин А.С., Бакуит Р.Б., Лабетская Н.А., Чайковский С.А., Лазарь А.П. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. С. 255.
24. Русских А.Г., Жигалин А.С., Орешкин В.И., Чайковский С.А., Бакуит Р.Б., Земсков Ю.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. С. 234.
25. Русских А.Г., Жигалин А.С., Орешкин В.И. // ЖТФ. 2016. Т. 86. С.37.
26. Artyomov A.P., Rousskikh A.G., Fedunin A.V., Chaikovskiy S.A., Zhigalin A.S., Oreshkin V.I. // IOP Conf. Series: J. Phys. 2017. V. 1830. P. 0012038.  
Doi: 10.1088/1742-6596/830/1/012038.
27. Русских А.Г., Федюнин А.В., Артёмов А.П., Жигалин А.С., Орешкин В.И. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2018. Т. 61. С. 57.
28. Rousskikh A.G., Fedyunin A.V., Artyomov A.P., Zhigalin A.S., Oreshkin V.I. // Current Appl. Phys. 2019. V. 19. P. 704.  
Doi: 10.1016/j.cap.2019.03.015.
29. Rousskikh A.G., Oreshkin V.I., Labetsky A.Yu., Chaikovskiy S.A., Shishlov A.V. // Technical Phys. 2007. V. 52. P. 571.  
Doi: 10.1134/S1063784207050064.
30. Anders A., Yushkov G.Y. // J. Appl. Phys. 2002. V.91. P. 4824.  
Doi: 10.1063/1.1459619.
31. Oreshkin V.I., Oreshkin E.V., Shmelev D.L. // Phys. Plasmas. 2023. V. 30. P. 113301.  
Doi: 10.1063/5.0160649.

## FORMATION OF DIRECTED PLASMA JETS DURING THE COMBUSTION OF A HIGH-CURRENT VACUUM-ARC DISCHARGE

A. G. Roussikh<sup>a,\*</sup>, A. S. Zhigalin<sup>a</sup>, V. I. Oreshkin<sup>a</sup>, N. A. Labetskaya<sup>a</sup>, and A. M. Kuzminykh<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055 Russia*

*\*e-mail: russ@ovpe2.hcei.tsc.ru*

The paper describes a method for generating aluminum and hydrogen plasma jets. It illustrates the formation mechanism of extended plasma structures produced during the combustion of a high-current vacuum-arc discharge. The current-carrying plasma front is shown to propagate at different velocities for aluminum plasma and hydrogen plasma. The hydrogen plasma has a substantially higher initial velocity (about 30 cm/ $\mu$ s) compared to the aluminum plasma (about 10 cm/ $\mu$ s). It is shown that the bulk velocity of the hydrogen plasma jet is about 9 cm/ $\mu$ s. It was proven by means of spectral diagnostics that the hydrogen plasma jet is indeed composed mainly of hydrogen.

*Keywords:* plasma jets, high-current vacuum-arc discharge