

**Оптимизация струйных плазменных течений во внешнем магнитном поле**

А. П. Глинов, А. П. Головин, П. В. Козлов

*Проведены экспериментальные и теоретические исследования по иницированию и анализу устойчивости движения электрической дуги в каналах переменного поперечного сечения (плоских и осесимметричных) с металлическими и графитовыми электродами. Изучены возможности стабилизации движения дуг при наложении внешнего магнитного поля. Показано, что специальный выбор витков подмагничивания канала позволяет стабилизировать движение направленно перемещающейся дуги и даёт возможность увеличить скорость её перемещения. Более существенно повысить скорость плазменного сгустка можно, используя в конструкции генератора элементы канала капиллярного разряда, стабилизируемого магнитным полем токов, протекающих по аноду.*

*Ключевые слова:* электрическая дуга, скоростная видеорегистрация, магнитное поле, плазменный инжектор, плазменная струя, плазмотрон.

**Введение**

В области физико-химической гидродинамики и аэродинамики высокотемпературных струйных течений важно получение данных о параметрах плазменных струй и динамике их формы, об условиях устойчивости таких течений в плотных средах. Это важно для их использования в различных плазменных приложениях. Например, при подогреве газов – для аэродинамических исследований, при возбуждении газов для иницирования детонации и увеличения эффективности сжигания горючих смесей, в технологиях плавки, резки твердых тугоплавких материалов и нанесения покрытий на поверхности с помощью введения в струю порошков из необходимого материала.

Вопросам генерации и ускорения плазмы (в данном случае, проводящего газа) и формированию струйных магнитогидродинамических (МГД) течений посвящена масса работ, в частности, [1–4]. Стабилизация стационарных дуг в азимутальном магнитном поле изучалась в [5, 6].

Первые единичные результаты о принципиальной возможности стабилизации направленного движения дуги с помощью наложения внешнего магнитного поля приведены в [7]. Ряд плазменных технологий и методик оценивания результатов их применения изложен в [8–10]. Известны также аэродинамические исследования по лазерному иницированию детонационного горения [11]. По аналогии с [11] используется и альтернативное электроразрядное иницирование процессов горения и детонации [12–14].

Специфические струйные МГД-течения с нулевым расходом в вертикальном слое в поле силы тяжести рассмотрены в [15], где проведен в линейном приближении теоретический анализ их устойчивости. Модели бесконечно протяженных цилиндрических плазменных струй с поверхностными токами рассмотрены и изучены в [16, 17]. Сверхзвуковые струи достаточно полно рассмотрены в [18, 19]. Методы математического моделирования МГД-течений приведены в [20], а методики оценивания параметров плазменных струй изложены, например, в [21]. Влияние хорошо электропроводящего кожуха для стабилизации плазменного цилиндра (не струи) вихревыми токами изложено в [22]. Экспериментальные и (на основе упрощенных инженерных моделей) теоретические исследования стабильности катодной струи дуги атмосферного давления между графитовым катодом и стальным анодом под воздействием поперечного магнитного поля проведены в [23]. МГД-неустойчивость металлических кумулятивных струй (в виде развития перетяжек) была изучена экспериментально в [24].

Глинов Александр Петрович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Головин Александр Петрович, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Козлов Павел Владимирович, научный сотрудник. Институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Россия, 119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, 1. Тел. +7(495) 939-15-28. E-mail: krestytritsk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 августа 2017 г.

Особый интерес для многих приложений вызывает перспектива получения устойчивых МГД-течений в условиях воздушной атмосферы. Поэтому основная цель настоящей работы – получение экспериментальных данных о возможности стабилизации движущейся свободной дуги в плотной воздушной атмосфере как с помощью наложения внешнего магнитного поля, так и магнитного поля токов, протекающих по рельсам, при специальном выборе конструкции плазмотрона.

Актуальность подобных исследования обусловлена потребностью практического использования мощных плазменных струй в аэродинамических исследованиях (подогрев газа), при интенсификации инициирования детонации, для повышения эффективности сжигания топлива, нанесения покрытий. Данные о параметрах плазменных струй могут быть востребованы, в частности, в различных областях диагностики плазмы и плазменных технологий, а также особенно при разработке инжекторов плазмы большой мощности для возбуждения детонационного горения в плотных средах.

### Постановка задачи

В НИИ механики МГУ (начиная с начала 60-х годов прошлого века) активно проводились работы по разработке электродуговых генераторов плазмы – плазмотронов [25, 26]. В данной работе приводятся результаты текущих экспериментальных исследований движущихся плазменных сгустков, формируемых как в рельсовых системах с переменным межрельсовым расстоянием, так и в

коаксиальном плазмотроне с элементами капиллярного разряда. Одной из областей приложения таких плазменных струй может быть электроразрядное инициирование детонации, например, посредством инъекции плазменных струй в детонационный резервуар.

Инициирование дуги в наших установках (подобно работам [7, 27]) осуществлялось взрывом проволочек [28]. При экспериментальном и теоретическом моделировании движущихся плазменных сгустков была использована обычная схема рельсотрона (рис. 1, верхняя схема). Опытный экземпляр коаксиального плазмотрона (рис. 1, нижняя схема) с элементами капиллярного разряда (причем с достаточно узким межэлектродным зазором) [8] был создан с учетом полученных результатов по рельсотрону и исследован отдельно.

Для оптимизации движения дуговой плазмы по рельсам накладывалось внешнее магнитное поле, создаваемое протекающим током по шинам, параллельным току дуги. Токи, протекающие в шинах рельсотрона и в витках подмагничивания, питались от разных источников и достигали уровня 500 А. В конструкции рассматриваемых устройств использовались медные и графитовые рельсы и шины. Межрельсовый зазор от зоны инициирования до зоны вылета дуги рос линейно от 4 до 7 мм. Проводились синхронное оцифровывание токов и напряжений в дугах, токов в витках подмагничивания канала ускорителя и высокоскоростная видеорегистрация (со частотой кадров 1200 к/с) процесса движения дуги и деформации её формы.

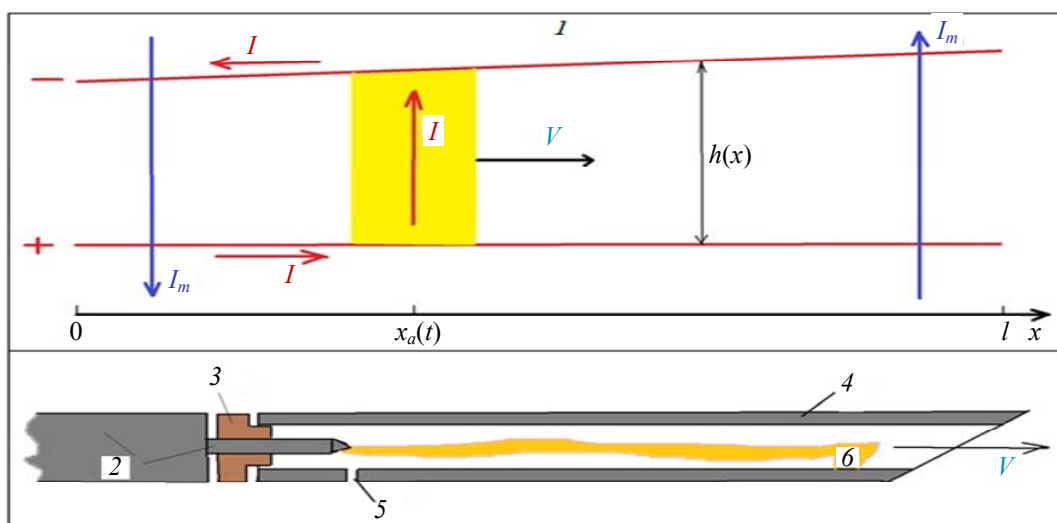


Рис. 1. Принципиальные схемы экспериментальных установок ускорения электродуговой плазмы. Верхняя схема: 1 – рельсотрон;  $I$  и  $I_m$  – токи в дуге, шинах (рельсах) и витках подмагничивания;  $h(x)$  – поперечный размер канала;  $x$ ,  $x_a$  и  $V$  – координата, перемещение и скорость дуги. Нижняя схема: коаксиальный плазмотрон (плазмотрон-инжектор); 2 – катод, 3 – изоляционная шайба, 4 – анод, 5 – отверстие для инициатора зажигания разряда и охлаждающего катод потока, 6 – дуговой канал;  $V$  – скорость перемещения дуги.

При испытаниях коаксиальной конструкции (с элементами капиллярного разряда в виде узкого межэлектродного зазора, повышающего плотность вводимой энергии) для повышения ресурса, прежде всего катода, осуществлялся его обдув воздушным потоком через отверстие 5 (рис. 1, нижняя схема).

Основные задачи исследования – получение данных об условиях стабильного направленного движения электрических дуг в свободной воздушной атмосфере и оценка возможности разработки инжекторов для «впрыскивания» плазменных струй в плотные среды.

### Движение дуги во внешнем магнитном поле

Принципиальная схема движения дуги в канале между направляющими рельсами представлена на верхней схеме рис. 1. Здесь  $I$  и  $I_m$  – токи, протекающие в дуге, шинах (рельсах) и витках подмагничивания;  $h(x)$  – поперечный размер канала;  $x$ ,  $x_a$  и  $V$  – координата, перемещение и скорость дуги соответственно.

Изучалось движение свободной дуги, не ограниченной боковыми изоляционными стенками (традиционными, например, для рельсотрона [8, 27]). Для управления процессом перемещения плазменного сгустка на канал нашего рельсотрона накладывалось внешнее магнитное поле, создаваемое токами  $I_m$ , протекающими в специально выбранных контурах. В простейшем случае достаточно одного указанного контура, приближенного к каналу перемещения дуги в двух местах: в стартовой зоне в месте инициирования дуги (обычно медными проволочками [8, 28] или тонкими, с диаметром порядка 500 мкм, графитовыми грифелями) и к выходной зоне. Направление токов выбиралось, чтобы облегчить с помощью внешнего магнитного поля старт и движение дуг.

В ходе работы предполагалось сопоставить экспериментальные результаты с расчетными данными. Для теоретического прогноза движения дуги применялась следующая нуль-мерная модель:

$$m \frac{dV}{dt} = F_{ed} - F_A - F_w + F_M - F_{er} \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = \gamma_{er} I, \quad \frac{dx_a}{dt} = V \quad (2)$$

$$F_{ed} = L' \frac{I^2}{2}, \quad F_A = \rho_0 C_x S \frac{V^2}{2}, \quad F_w = 2\tau_w S_c,$$

$$\tau_w = \rho_a C_f \frac{V^2}{2}, \quad F_M = \mu_0 \frac{I \times I_m}{2\pi} h(x) \left[ \frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} \right],$$

$$F_{er} = -V \frac{dm}{dt}.$$

Здесь в уравнениях (1) и (2) и в последующих соотношениях введены следующие обозначения:  $m$ ,  $V$  – масса и скорость дугового столба (плазменного поршня);  $L'$  – погонная индуктивность рельсовой пары [29];  $C_x$ ,  $C_f$  – коэффициенты аэродинамического сопротивления и вязкого трения [30, 31];  $F_{ed}$ ,  $F_A$ ,  $F_w$ ,  $F_M$  [32],  $F_{er}$  – силы электродинамического ускорения, аэродинамического сопротивления, вязкого трения, взаимодействия контуров токов и эрозионного торможения соответственно;  $\tau_w$  – напряжение трения,  $\gamma_{er}$  – коэффициент токовой эрозии электродов;  $\rho_0$ ,  $\rho_a$  – плотность окружающего воздуха и дуговой плазмы;  $r_{1,2}$  – расстояния между дугой и точками приближения контуров подмагничивания к каналу.

Эксперименты без наложения внешнего магнитного поля показали, что на круглых или плоских шинах движение свободной дуги нестабильно: токовый канал может уходить в бока от направления рельсов (рис. 2, фрагмент 1), замедлен старт дуги, значительна эрозия с анода (рис. 2, фрагмент 5). Последний факт особенно неприятен, т. к. эрозия электродов могла приводить к образованию т. н. вторичных электрических дуг в канале между рельсами с тыльной стороны головной дуги. Похожие периодические режимы образования и движения токовых слоев отмечались ранее и в теоретической работе [33], в которой изучались неустойчивости МГД-течений низкотемпературной плазмы в соплах.

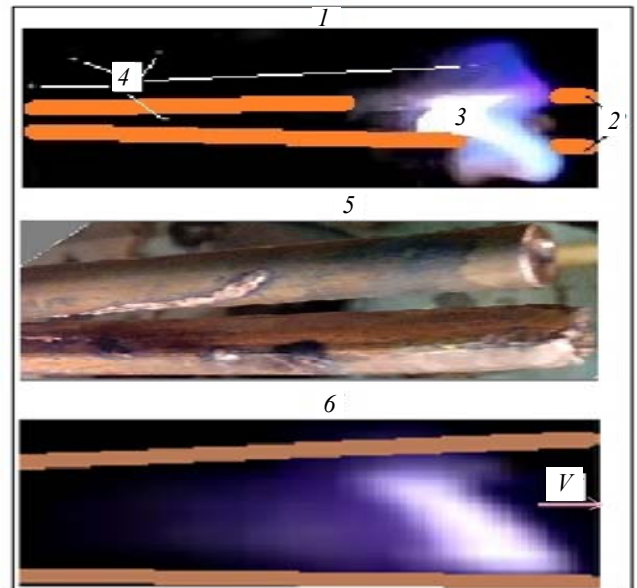


Рис. 2. Движение дуги в рельсотроне. Фрагмент 1 – видеокادر дуги в установке без подмагничивания: элементы 2 – рельсы, 3 – плазма дуги, 4 – летящие частицы от инициатора разряда и брызги расплава электродов. Фрагмент 5 – характерные следы эрозии на поверхности медных электродов без подмагничивания ( $I_m = 0$ ). Фрагмент 6 – видеокادر стабильного движения дуги при включении витков подмагничивания и замены на графитовый медного анода.

В то же время рис. 2 (см. фрагмент б) показывает, что возможна эффективная стабилизация направленно движущейся дуги внешним магнитным полем. При этом замена материала анода (со сплава на медной основе на графит) позволяет существенно (на два порядка) увеличить скорость перемещения дуги.

Результаты расчетов по теоретической модели на основе уравнений (1) и (2) без учета эффектов эрозии (формально,  $\gamma_{er} = 0$ ) и их сопоставление с экспериментальными данными приведены на рис. 3.

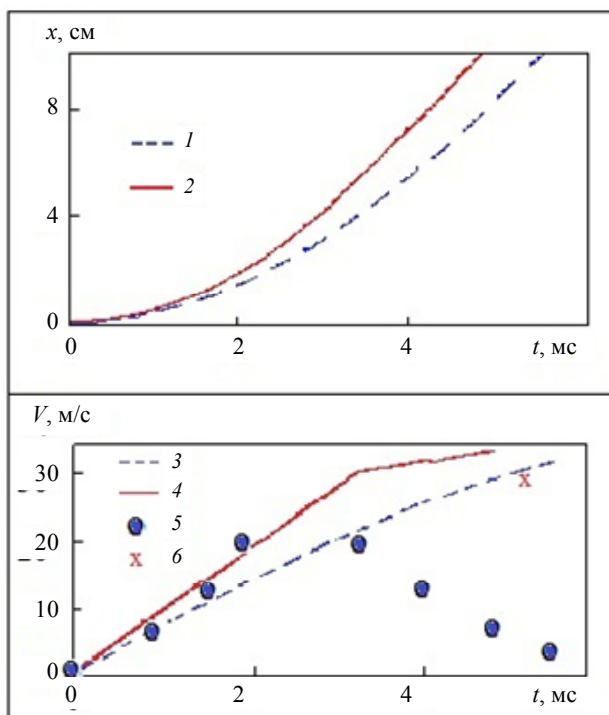


Рис. 3. Траектория (1, 2) и скорость (3–6) движения плазменного поршня: данные 1, 3, 5 – без подмагничивания, данные 2, 4, 6 – с подмагничиванием канала; 1–4 – расчет; 5, 6 – эксперимент; точность данных расчетов  $\pm 0,1\%$ , экспериментов  $\pm 5\%$ .

Отметим, что в расчетах эрозией электродов пренебрегалось. Поэтому, когда она становится существенной ( $t \geq 3$  мс, рис. 3), результаты экспериментов (данные 5) и вычислений (данные 3) по скорости могут отличаться в несколько раз. Важно отметить, что совпадение результатов неплохое, когда применяются эрозионностойкие материалы для электродов и осуществляется стабилизация движения дугового столба внешним магнитным полем (см. рис. 3, расчётная кривая 4 и экспериментальная точка б).

Сделаем ещё замечание. У точки б, отмеченной красным крестиком на рис. 3, самое лучшее (10–15 %) совпадение с расчетом (сплошная красная кривая 4). Сильно отличаются от расчета только самые правые из точек 5, поскольку численное моделирование проведено здесь без учета эрозии электродов, которая с течением времени, естественно, возникала (см. рис. 2, фрагмент 5).

### Некоторые результаты генерации плазменных струй

Для конструкции электродов опытного образца инжектора (см. рис. 1, нижняя схема) использовались графитовые материалы с открытой пористостью типа ЗОПГ. Такой выбор электродных материалов был обусловлен их высокой термоэрозионной стойкостью. Одним из возможных механизмов устойчивости пористого электрода к термоударам и перегреву может быть выброс паров наполнителей электродных материалов из тела электрода, что вызывает понижение в нем давления и температуры. Образующееся при этом свободное пространство пор таких электродов может выступать как демпфер термических напряжений.

Проведено около 20 пусков генератора плазменной струи в воздушной среде. Результаты экспериментов приведены на рис. 4.

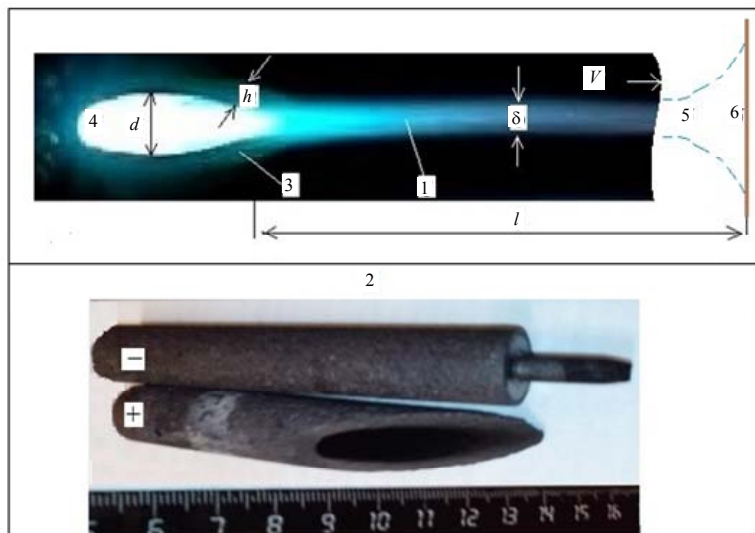


Рис. 4. Опытный коаксиальный плазматрон. Плазменная струя (1) в воздушной среде атмосферного давления и типичные электроды (2): 3 – анодная стенка, 4 – косое выходное сечение канала генератора плазмы, 5 – условная область взаимодействия струи с преградой (6);  $d = 8$  мм – диаметр выходного сопла,  $h = 4$  мм – толщина анодной стенки канала;  $\delta = 3-5$  мм,  $l = 70$  мм,  $V = 200$  м/с – диаметр, длина и скорость плазменной струи.

Показано, что скорость и температуру плазменной струи можно существенно повысить, используя в конструкции генератора элементы канала капиллярного разряда, стабилизируемого магнитным полем токов, протекающих по аноду (см. рис. 1, нижняя схема).

Дозвуковая плазменная струя в воздушной среде атмосферного давления, создаваемая в опытном образце импульсного инжектора плазмы, имеет следующие параметры: диаметр выходного сопла –  $d = 8$  мм; толщина анодной стенки канала – до 4 мм; диаметр и длина струи –  $\delta \approx 3\text{--}5$  мм,  $l \approx 70$  мм; оценка температуры по аналогичным образцам дуговой плазмы – 5–12 кК; скорость потока плазмы  $V$ , оцененная по скорости частиц-маркеров – порядка 200 м/с (ошибка  $\pm 15\%$ ); отношение длины плазменной струи к её диаметру – более 17; КПД генератора плазмы  $\approx 30\%$ ; вложенная в струю импульсная мощность  $W \approx 0,3\text{--}24$  кВт; напряжение горения 30–60 В, плазменный ток 10–400 А (ошибка  $\pm 3\%$ ).

Конкретные результаты взаимодействия плазменных струй с преградами могут составить отдельный предмет для дальнейших исследований и в настоящей работе не приводятся.

### Заключение

Проведен анализ устойчивости направленно движущихся электрических дуг. Эксперименты без наложения внешнего магнитного поля показали, что на круглых или плоских металлических шинах движение свободной дуги нестабильно: замедлен старт дуги, значительна эрозия с анода, токовый канал может уходить в бока от направления рельсов.

Показано, что возможна стабилизация направленно движущейся дуги внешним магнитным полем и заменой анодной металлической шины на графитовую. Это позволяет существенно (на два порядка) увеличить скорость перемещения плазменных сгустков как за счет уменьшения эрозии материала анода, так и за счет стабилизации прямолинейного движения дуги.

Показано, что скорость и температуру плазменной струи можно существенно повысить, используя в конструкции генератора элементы канала капиллярного разряда, стабилизируемого магнитным полем токов, протекающих по аноду.

Одной из областей приложения таких плазменных струй может быть электроразрядное иницирование детонации, например, посредством инъекции плазменных струй в детонационный резервуар.

Авторы признательны В. О. Герману, внесшему ранее существенный вклад в развитие технологий разработки компактных сильноточных плазмотронов с повышенным ресурсом электродов [34], за внимание и интерес к проведенной работе.

Работа выполнена в Институте механики МГУ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Исакаев Э. Х., Чиннов В. Ф., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х., Саргсян М. А., Коновалов П. В. / Сб. тезисов докладов XLII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 9–13 февраля 2015 г. С. 311. – М.: Плазмаиофан, 2015.
2. Жуков М. Ф., Урюков Б. А., Энгельшт В. С. Теория термической электродуговой плазмы. Ч. 1, 2. – М.: Наука, 1987.
3. Жуков М. Ф. Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1977.
4. Глебов А. И., Рутберг Ф. Г. Мощные генераторы плазмы. – М.: Наука, 1985.
5. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 35.
6. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 498.
7. Глинов А. П., Герман В. О., Головин А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А. / Сб. трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: 2015. С. 950–952. (Казань, 20–24 августа 2015 г.). – Казань: Изд-во. Казанского федерального университета.
8. Лебедев А. Д., Урюков Б. А. Импульсные ускорители плазмы высокого давления. – Новосибирск: СО АН СССР. Ин-т теплофизики. 1990.
9. Кранц Э. Генераторы плазменных струй для диагностических и спектроскопических целей. В сб. «Экспериментальные исследования плазмотронов». С. 119–142. – Новосибирск. 1977.
10. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Анищенко Л. М. Высокотемпературные технологические процессы: Теплофизические основы. – М.: Наука, 1985.
11. Павлов В. А., Туник Ю. В. Известия РАН, МЖГ. 2012. № 5. С. 87.
12. Филимонова Е. А., Бочаров А. Н., Битюрин В. А. / XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 9–13 февраля 2015 г. Сб. тезисов докладов. С. 316. – М.: Плазмаиофан, 2015.
13. Шибков В. М., Шибкова Л. В., Копыл П. В., Сурконт О. С. / XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 9–13 февраля 2015 г. Сб. тезисов докладов. С. 352. – М.: Плазмаиофан. 2015.
14. Алексеев А. И., Ваулин Д. Н., Исаев А. П., Черников В. А. / XLII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 9–13 февраля 2015 г. Сб. тезисов докладов. С. 357. – М.: Плазмаиофан. 2015.
15. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Непомнящий А. А. Устойчивость конвективных течений. – М.: Наука, 1989.
16. Губарев Ю. Г. // ПМТФ. 2004. Т. 45. № 2. С. 111.
17. Губарев Ю. Г. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 28.
18. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. Газодинамика процессов истечения. – Новосибирск: Наука, 1984.
19. Глазнев В. Н., Запрягаев В. И., Усков В. Н., Терехова Н. М., Ерофеев В. К., Григорьев В. В., Кожемякин А. О., Котенок В. А., Омельченко А. В. Струйные и нестационарные



течения в газовой динамике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

20. Брушлинский К. В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. – М.: БИНОМ, 2011.

21. Намитоков К. К., Пахомов П. Л., Харин С. Н. Математическое моделирование в газоразрядной плазме. – Алмата: Наука, 1988.

22. Ладиков-Роев Ю. П., Черемных О. К. Математические модели сплошных сред. – Киев: Наукова Думка, 2010.

23. Max Karasik. Driven Motion and Instability of an Atmospheric Pressure Arc. PhD Dissertation. Princeton, 2000.

24. Бабкин А. В., Кружков В. А., Ладов С. В., Маринин В. М., Федоров С. В. Поведение металлических кумулятивных струй под действием импульса тока. В сб. «Мегагаусная и мегаамперная импульсная технология и применения». С. 992. – Саров: ВНИИЭФ, 1977.

25. Герман В. О., Кукота Ю. П., Любимов Г. А. Генерация потоков электродуговой плазмы. – Новосибирск: Наука, 1987.

26. Герман В. О., Успенский В. С. // ПМТФ. 1990. № 5. С. 6.

27. Глинов А. П., Дёгтев Ю. Г., Кондратенко А. К., Полтанов А. Е., Рындин В. Н., Симонова Г. И. // Прикладная физика. 2002. № 5. С. 59.

28. Бурцев Н. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

29. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчёт индуктивностей. Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.

30. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

31. Горнер С. Ф. Динамическое сопротивление жидкости (частное сообщение в сборнике: Дж. Дейли, Д. Харлеман «Механика жидкости» – М.: Энергия, 1971).

32. Там Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

33. Бармин А. А., Глинов А. П., Куликовский А. Г. // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1985. № 4. С. 138.

34. Кукота Ю. П., Герман В. О. Полые проницаемые электроды. – Киев: Реклама, 1989.

PACS: 52.80.Mg

## Investigation of jet plasma fluxions in an exterior magnetic field

A. P. Glinov, A. P. Golovin, and P. V. Kozlov

Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University  
1 Michurinskiy av., Moscow, 119192, Russia  
E-mail: krestytroitsk@mail.ru

Received August 30, 2017

*Consideration is given to the analysis of dynamic stability of an electrical arc in an magnetic field. The experimental and theoretical examinations are conducted in channels of a variable traversal section (flat and rotationally symmetric) with metal and graphite electrodes. Possibilities of the arc motion stabilization are studied at superimposition of an exterior magnetic field. It is shown that the special select of coils of a biasing of the channel allows making a stable motion of a directly travelled arc and gives the chance to increment velocity of its travel. To raise a plasma velocity more essentially it is necessary to use a construction of the generator devices with the cappillary discharge stabilised by a magnetic field of currents proceeding on the anode.*

**Keywords:** electrical arc, high-speed video registration, magnetic field, plasma injector, plasma stream, plasma generator.

### REFERENCES

1. E. H. Isakaev, V. F. Chinnov, A. S. Tjuftjaev, et al., in *Proc. XLII International Zvenigorodsky conference on a plasma physics and thermonuclear researches, February, 9-13th, 2015*. (Moscow, Plasmaiofan, 2015). P. 311.
2. M. F. Zhukov, B. A. Urjukov, V. S. Engelsht, et al., *Theory of thermal electroarc plasma*. (M: Nauka, 1987). Part 1, 2 [in Russian].
3. M. F. Zhukov, *The theory of an electrical arc in the conditions of the forced heat exchange*. (Novosibirsk: Nauka, 1977) [in Russian].
4. A. I. Glebov and F. G. Rutberg, *Powerful plasma generators*. (M: Nauka, 1985) [in Russian].
5. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al., *Prikl. Fiz.* No. 4, 35 (2014).
6. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (5), 498 (2014).

7. A. P. Glinov., V. O. German, A. P. Golovin, et al., in *Proc. XI the All-Russia congress on fundamental problems of a theoretical and applied mechanics* (Kazan, August 20–24, 2015). P. 950.
8. A. D. Lebedev and B. A. Uryukov, *Pulse accelerators of plasma* (Novosibirsk, SO AN SSSR. Institut Teplofiziki. 1990) [in Russian].
9. E. Krantz, *Generatory of plasma streams for the diagnostic and spectroscopic purposes*. In *Book: Experimental researches of plasma generators*. P. 119 (Novosibirsk, 1977) [in Russian].
10. N. N. Rykalin, A. A. Uglov, and L. M. Anishchenko, *High-temperature technological processes* (Moscow, Nauka, 1985) [in Russian].
11. V. A. Pavlov and Yu. V. Tunik, *Izvestia RAS. MZhG*, No. 5, 87 (2012).
12. E. A. Filimonova, A. N. Bocharov, and V. A. Bitjurin, in *Proc. XLII International Zvenigorodsky conference on a plasma physics and thermonuclear researches, February 9–13, 2015* (Moscow, Plasmaiofan, 2015) P. 316.
13. V. M. Shibkov, L. V. Shibkova, P. V. Kopyl, and O. S. Surkont, in *Proc. XLII International Zvenigorodsky conference on a plasma physics and thermonuclear researches, February 9–13, 2015* (Moscow, Plasmaiofan, 2015). P. 352.
14. A. I. Alekseev, D. N. Vaulin, A. P. Isaev, and V. A. Tchernikov, in *Proc. XLII International Zvenigorodsky conference on a plasma physics and thermonuclear researches, February 9–13, 2015* (Moscow, Plasmaiofan, 2015). P. 357.
15. G. Z. Gershuni, E. M. Zhuhovitsky, and A. A. Nepomnyaschy, *Stability of convective fluxions*. (Moscow, Nauka, 1989) [in Russian].
16. J. G. Gubarev, *PMTF* **45** (2), 111 (2004).
17. J. G. Gubarev, *Tech. Phys.* **81** (3), 28 (2011).
18. V. G. Dulov and G. A. Lukjanov, *A gasdynamics of processes of the effluxion*. (Novosibirsk: Nauka, 1984) [in Russian].
19. V. N. Glaznev, V. I. Zaprjagaev, V. N. Uskov, V. M. Terehova, et al., *Jet and nonsteady fluxions in gas dynamics*. (Novosibirsk, RAS, 2000) [in Russian].
20. K. V. Brushlinsky, *The mathematical and computing problems of a magnetic gasdynamics*. (Moscow, BIN, 2011) [in Russian].
21. K. K. Namitokov, P. L. Pahomov, and S. N. Kharin, *The mathematical modelling in gas-discharge plasma* (Alma-Ata, Nauka, 1988) [in Russian].
22. J. P. Ladikov-Roev and O. K. Cheremnyh, *Mathematical models of continuous mediums*. (Kiev, Naukova Dumka, 2010) [in Russian].
23. Max Karasik, *Driven Motion and Instability of an Atmospheric Pressure Arc*. (PhD Dissertation. Princeton, 2000).
24. A. V. Babkin, V. A. Kruzchkov, S. V. Ladov, et al., *Behaviour of metal cumulative streams under the influence of a current impulse* in *Book: Mega pulsing technology and applications*. (Sarov, VNIIEF, 1977). P. 992 [in Russian].
25. V. O. German, J. P. Kukota, and G. A. Ljubimov, *Generation of streams of the electroarc plasma*. (Novosibirsk, Nauka, 1987) [in Russian].
26. V. O. German and V. S. Uspensky, *PMTF* No. 5, 6 (1990).
27. A. P. Glinov, J. G. Dyogtev, A. K. Kondratenko, et al., *Prikladnaia Fizika*, No. 5, 59 (2002)
28. N. A. Burtsev, H. B. Kalinin, and A. V. Luchinsky. *Electrical explosion of conductors and its application in electrophysical installations* (Moscow, Energoatomizdat, 1990) [in Russian].
29. P. L. Kalantarov and L. A. Tsejtlin, *Calculation of inductances. A reference book*. (Leningrad, Energoatomizdat, 1986) [in Russian].
30. S. S. Kutateladze, *Heat transfer and magnetohydrodynamic resistance. A handbook*. (Moscow, Energoatomizdat, 1990) [in Russian].
31. S. F. Gorner, *Dynamic resistance of a fluid (The private conferring in J. Deyli, D. Harleman: Mechanics of a fluid)*.
32. R. Tam and J. Tarr, *Magnetic systems of MGD-generators and thermonuclear installations*. (Moscow, Energoatomizdat, 1985) [in Russian].
33. A. A. Barmin, A. P. Glinov, and A. G. Kulikovskiy, *Izv. AN USSR. MZhG*, No. 4, 138 (1985).
34. Yu. P. Kukota and V. O. German, *Hollow permeable electrodes* (Kiyev, Reklama, 1989) [in Russian].