

УДК 533.6.011:533.9:537.52

О некоторых особенностях визуализации процессов в протяженном дуговом разряде в свободной атмосфере воздуха

В. О. Герман, А. П. Глинов, А. П. Головин, П. В. Козлов, Г. А. Любимов

Проведено экспериментальное исследование процессов в низкотемпературной плазме протяженных квазистационарных дуговых разрядов в воздушной среде атмосферного давления между графитовыми электродами. Наряду с традиционной (шнуровой) формой разряда изучены и иные режимы протекания тока: диффузный (распределенный) и диффузно-шнуровой. Рассмотрены процессы контракции, расслоения и шунтирования. Обнаружены режимы колебаний тока, обусловленные взаимодействием катодной и анодной струй и возникновением потоков плазмы и твердых частиц с локально перегретой поверхности анода.

PACS: 52.80.Mg

Ключевые слова: электрическая дуга, скоростная регистрация изображений, видео- и инфракрасные диапазоны длин волн, плазмод, графитовая пыль, контракция, расслоение, шунтирование.

Введение

Традиционно (В. Петров — 1903 г., Дэви и Риттер — 1908 г.) [1] электрическая дуга исследовалась экспериментально в воздухе на графитовых (например угольных) электродах как наиболее дешевых и не загрязняющих разрядное пространство жидкой фазой, возникающей в опорных пятнах на металлических электродах. Классическое представление о такой дуге заключается в том, что ее токовый канал — узкий (шнуровой), по сравнению с межэлектродным расстоянием, и не очень сильно отклоняется от кривой кратчайшего расстояния между катодом и анодом [1, 2].

Однако, как отмечено и продемонстрировано в [3], токовый шнур может иметь весьма сложную форму, а его длина — многократно превосходить межэлектродное расстояние $l_{мэ}$. При превышении граничного тока из опорных пятен дуги на электродах возникают встречные потоки плазмы* — катодные и анодные струи (факелы), и картина

* Использование в нормальных условиях атмосферного давления в качестве электродов графита исключало присутствие жидкой фазы в опорных пятнах.

Герман Валентин Остапович, ведущий научный сотрудник.
Глинов Александр Петрович, ведущий научный сотрудник.
Головин Александр Петрович, старший научный сотрудник.
Козлов Павел Владимирович, научный сотрудник.
Любимов Григорий Александрович, главный научный сотрудник.

Институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова.
 Россия, 119192, Москва, Мичуринский пр-т, 1.
 Тел. 8 (495) 939-15-28. E-mail: krestytrouitsk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 июля 2012 г.

© Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А., 2012

разряда резко осложняется [3, 4]. Изучение влияния на форму токового канала материалов электродов, силы тока и состава атмосферы, электрофизических и спектральных характеристик таких разрядов проведено в [5—7].

В данной работе основной акцент сделан на проведении экспериментального исследования протяженного ($l_{мэ} \sim 30—50$ мм) электрического разряда квазистационарного тока до 300 А в воздушной среде атмосферного давления на графитовых электродах в целях уточнения картины его протекания и изучения различных неоднородностей пространственной структуры межэлектродной среды. Это может представлять интерес при практическом использовании дуговых разрядов, например, в плазмотронах и аппаратах электродуговой обработки материалов [3].

Основное внимание уделено визуализации процессов, связанных с протеканием тока, с помощью высокоскоростной (1200—60 000 кадр/с) аппаратуры с малыми временами экспозиции в видимом диапазоне длин волн $\lambda \sim 0,4—0,8$ мкм. Дополнительно были проведены съемки разряда и в широком инфракрасном диапазоне длин волн $\lambda \sim 0,9—4,8$ мкм. В результате, при совместном анализе изображений, полученных в различных диапазонах длин волн, и осциллограмм тока и напряжения была получена картина эволюции формы разряда, которая ранее не просматривалась, возможно, ввиду ее "засветки" излучением разрядной плазмы. В частности, обнаружены режимы, и обсуждаются физические механизмы отрыва плазменных вихрей и плазменных облаков от столба разряда. В единичных экспериментах было зафиксировано образование вблизи поверхности анода локальных замкнутых областей повышенной ярко-

сти ("плазмоидов"), перемещающихся от наиболее горячей части поверхности анода по столбу дуги и затем распадающихся. Рассмотрены возможные причины данного явления, связанные как со структурно-механическими особенностями материала анода, так и особенностями динамики формы и свечения токовых шнуров.

Постановка задачи и схема проведения измерений

Эксперименты, связанные с электрическим разрядом, в свободной атмосфере наталкиваются на проблему инициации самого разряда (рис. 1). В проводившихся несколько лет назад экспериментах инициация разряда (при давлении межэлектродной среды $p = 0,1$ МПа) осуществлялась высоковольтным осциллятором без использования третьего электрода. Такой осциллятор (даже при умеренных токах $0,02—0,1$ кА) работал ненадежно при межэлектродных расстояниях $l_{мэ}$, превышающих критическую величину $l_{мэ0} = 15—18$ мм, так как требовались высокие (более 50 кВ) напряжения для реализации межэлектродного пробоя. Использование подобного осциллятора весьма затруднительно и при зондовой (в частности мультizonдовой [8]) диагностике ввиду сильных наводок. Увеличение межэлектродных расстояний потребовало применения раздвигающих устройств пневматического или электромагнитного типов. В результате, инициация разряда стала осуществляться смыканием электродов с последующим их раздвижением до выбранного межэлектродного промежутка $l_{мэ}$. Необходимое для этого время составляет $0,1—0,2$ с. Регулирование пускового тока осуществлялось путем изменения внешней нагрузки, характеризуемой балластным сопротивлением $R_{бал}$ и индуктивностью $L_{бал}$. Обычно время, необходимое для изменения суммарного внешнего сопротивления нагрузки от максимального до минимального значения, соответствовало окончанию перемещения электрода на заданное межэлектродное расстояние $l_{мэ}$. При такой схеме инициации разряда, указанных токах и длительности эксперимента 2—4 с электроды могут быть использованы (т. е. прослужить без видимых разрушений) в 4—5 экспериментах.

Общая схема проведения высокоскоростной регистрации изображений разряда в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн представлена на рис. 1.

Использовавшиеся в экспериментах графитовые электроды с открытой пористостью представляли собой промышленно изготовленные цилиндрические стержни $\varnothing 15 \times 100$ мм. Специально про-

веденный с помощью электронного микроскопа анализ показал, что их исходная микроструктура неоднородна и содержит зерна диаметром $\sim 1—10$ мкм. Химический состав рассмотренных образцов также зависит от места исследования выделенных зон в теле электрода, а весовой процент составляющих материал элементов колеблется в следующих пределах: С — 62,69–84,90; О — 22,54–10,87; Na — 2,39–0,17; Mg — 0,0–0,1; S — 3,93–1,02; Cl — 2,87–1,25; К — 0,08–0,1; Ca — 5,49–1,6. Перед экспериментами электроды подвергались отжигу (нагреву) на длину 15—20 мм от рабочей поверхности с последующей продувкой каждого (уже остывшего) электрода воздухом. Предполагалось, что такая операция позволит избавиться от газопылевых загрязнений на разрядной поверхности и в порах электродов. Для отслеживания влияния гравитационной конвекции на структуру разряда эксперименты были проведены как при горизонтальной, так и при вертикальной ориентации электродов.

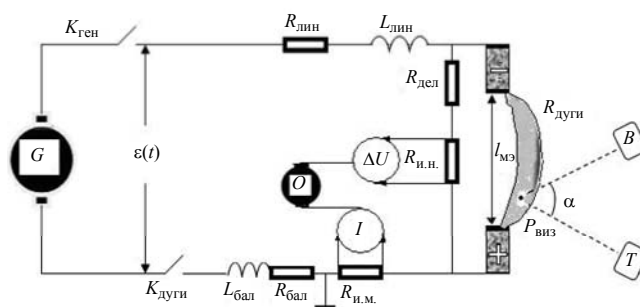


Рис. 1. Схема электропитания и измерений:

G – мотор-генератор; O – осциллограф; ε , I – ЭДС источника тока и разрядный ток; $L_{бал}$, $R_{бал}$ – индуктивность и сопротивление балластной нагрузки; $L_{линии}$, $R_{линии}$ – индуктивность и сопротивление подводящей линии; ΔU – падение напряжения на электродуговой нагрузке; $R_{и.т.}$, $R_{и.н.}$, $R_{дел}$, $R_{дуги}$ – сопротивления измерительных шунтов тока и напряжения, делителя напряжения, дуги; $K_{ген}$, $K_{дуги}$ – коммутаторы включения мотор-генератора и подачи напряжения в экспериментальный зал; $P_{виз}$ – точка визирования; α – угол смещения между линиями визирования видеокамеры (B) и тепловизора (T)

Ранее [5—7] с помощью высокоскоростной съемки были получены изображения разряда как в зонах, примыкающих к электродам, так и в достаточно протяженном межэлектродном промежутке. Как правило, при таких съемках, если и использовались, то только нейтральные светофильтры. Фактически информация поступала из видимого диапазона длин волн. Были отмечены характерные участки разряда, а именно: опорные пятна; той или иной длины плазменные струи (факелы), исходящие из этих пятен (в зависимости от условий протекания разряда), либо диффузная зона, в которой практически не наблюдается сгущения линий тока, либо область разряда с узким (шнуровым) токовым каналом.

Глубже проникнуть в понимание процессов, происходящих в рассматриваемом разряде, могут неразрушающие его структуру другие оптические методы. В частности, с этой целью, например, съемки разряда были проведены и в инфракрасных диапазонах длин волн. Совместный просмотр видео- и инфракрасных изображений и анализ осциллограмм тока и напряжения позволил получить как общую картину разряда, так и зафиксировать изображение его внутренней структуры, в обычных условиях подвергнутой "засветке" излучением плазмы.

Экспериментальные результаты

Наличие мощного светового потока от разряда (подобно применению фотовспышки при фотографировании недостаточно освещенных объектов) значительно облегчает задачу детализации картины протекания тока. Регистрирующая аппаратура достаточно надежно фиксирует развитие разрядного процесса и требует работы при максимально закрытых диафрагмах, да еще и с использованием плотных нейтральных фильтров.

Анализ данных, полученных в проведенных в последнее время экспериментах, позволил уточнить картину протекания тока в разрядном воздушном промежутке между графитовыми электродами. В полном соответствии с традиционными представлениями [1, 2] в достаточно широких временных интервалах (~ 20 мс) разряд может быть стабилен и имеет шнуровую форму (рис. 2). При этом на осциллограмме тока 1 квазистационарный участок 2 соответствует слабо изменяющейся последовательности кадров инфракрасной 3 и видеосъемки 4. Отличие изображений на кадрах 3 и 4 обусловлено разными ракурсами ($\alpha \neq 0$), частотами регистрации $f_{\text{рег}}$ и размерами кадров. Здесь опорное анодное пятно дуги находится не на торцевой поверхности электрода, а несколько сбоку (кадры 4). Именно из-за этого прилегающая к аноду часть токового шнура на кадрах 3 не просматривается.

Более полная картина пространственного изображения разряда была получена при использовании зеркала (как правило, с наружным отражающим слоем), установленного под некоторым углом так, чтобы соответствующие оси визирования были ориентированы в одну точку $P_{\text{виз}}$, что позволяло синхронно наблюдать разряд в двух плоскостях, а углы обзора перекрывали разные участки матрицы. В частности, в [9] предложен алгоритм, и продемонстрирована расчетная программа воссоздания 3D-изображения сильноточного, протяженного нестационарного плазменного образования (канала светимости дугового разряда) по синхронно зарегистрированным двум его проекциям (фронтальной и горизонтальной). Определение границ канала светимости разряда при этом в [9] было осложнено присутствием областей с резким перепадом яркости (наличие ярких и тусклых локальных структур). В [9] такие резкие неоднородности по светимости канала разряда интерпретировались исключительно как шумы (обусловленные либо шумами в матрице видеокамеры, либо наличием частичек разрушающихся электродов) и отфильтровывались.

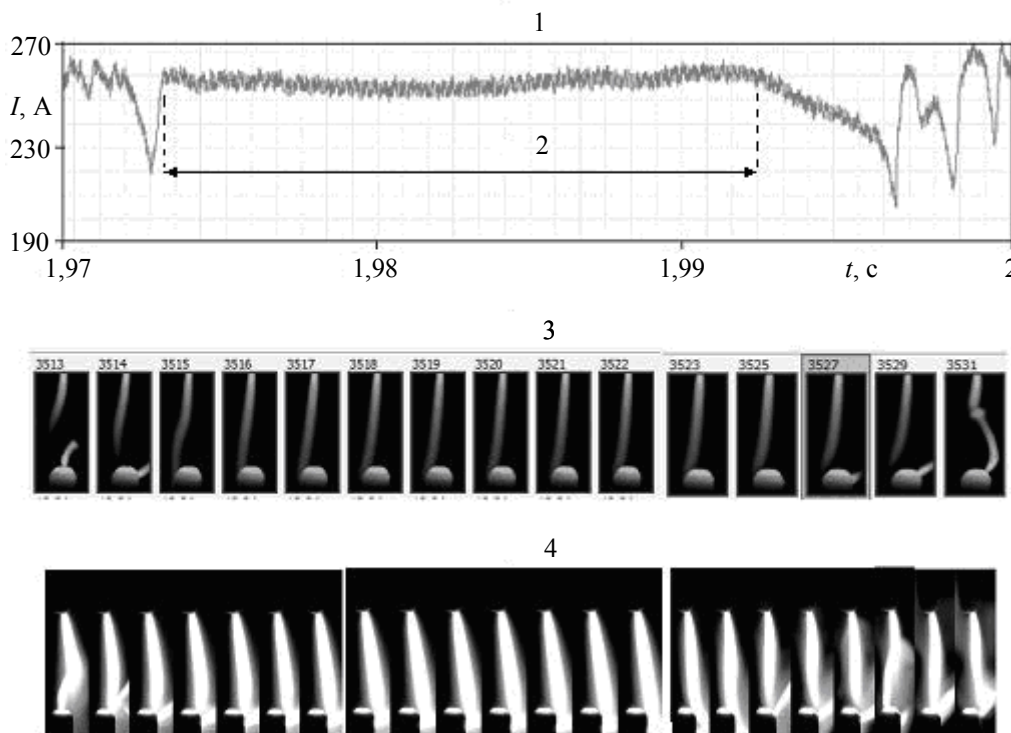


Рис. 2. Стационарный разряд:

1 – осциллограмма тока в окрестности интервала квазистационарности 2; 3 – пронумерованные кадры съемки в инфракрасном спектре, скорость регистрации $f_{\text{рег}} = 500$ кадр/с; 4 – видеок кадры, $f_{\text{рег}} = 1200$ кадр/с; угол смещения между осями визирования регистраторов изображений $\alpha = 30^\circ$. Анод расположен снизу

В данной работе указанные неоднородности в структуре канала светимости разряда были приняты во внимание (рис. 3). Здесь видеокдры 1—3 показывают в последовательные моменты времени выброс с поверхности анода* потоков газа, плазмы и, может быть, твердых пылевых частиц с последующим формированием замкнутых ярких (желтых при цветном изображении) структур, окаймленных менее яркой (красной) тонкой оболочкой (как бы "плазмоидов"). Однако это могут быть вовсе и не "плазмоиды", а эффекты двумерного восприятия (например, шнуры резко уходят в направлении перпендикулярно плоскости рисунка). Изотермы яркости 4 плазменных неоднородностей на кадре 3 показывают, что их внутреннее ядро довольно однородно.

Отметим, что наблюдаемые выбросы плазмы с анода могут приводить к "закорачиванию" прианодного слоя и, как следствие, к уменьшению падения напряжения между электродами. Характерная вольт-амперная характеристика (ВАХ), соответствующая подобным процессам 4, показывает, что скачок напряжения $\delta U \sim 10$ В (5), что близко к анодному падению потенциала для графита ~ 11 В [2]. Второй скачок напряжения 6 меньше, так как очередной процесс замыкания прианодного слоя еще не завершен.

Кадры 7—10 изображений прианодной области разряда (правда, с вертикально ориентированными электродами) в инфракрасном диапазоне длин волн (см. рис. 3) также демонстрируют наличие единичных локализованных яркосветящихся (жел-

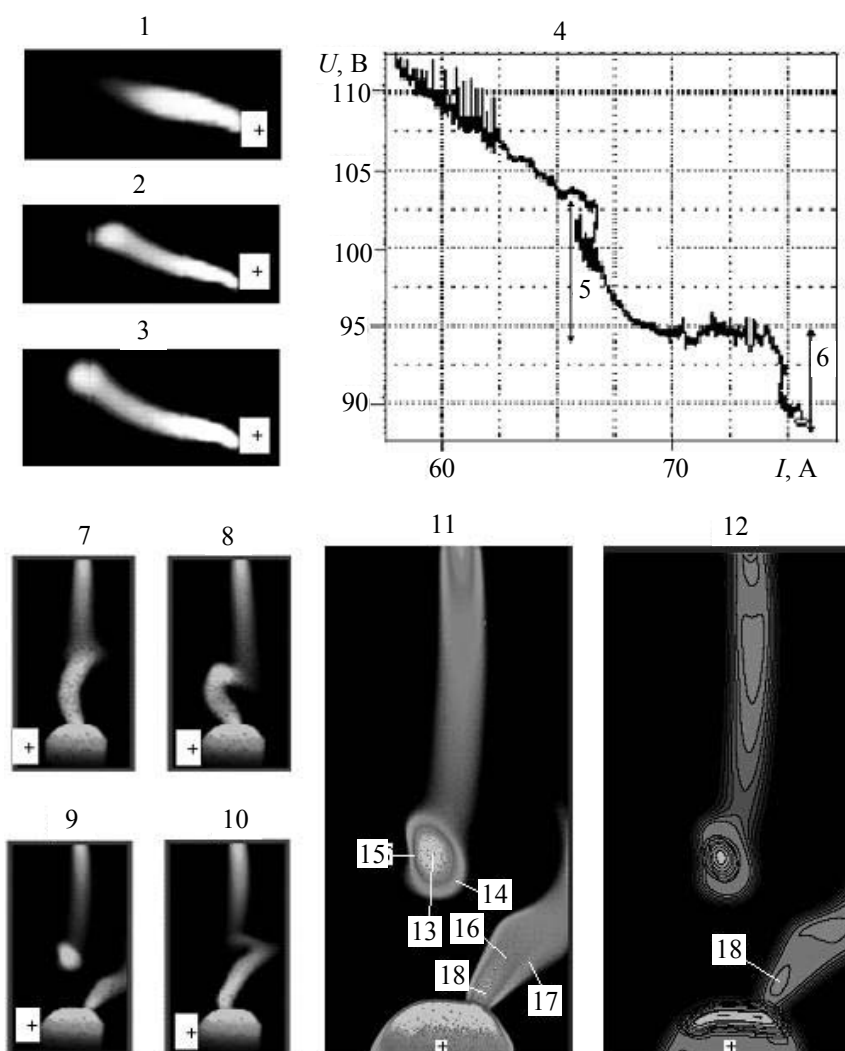


Рис. 3. Образование локальных неоднородностей структуры разряда:

$l_{мэ} = 40$ мм, 1–3 – последовательные видеокдры при $I = 150$ А, $f_{пер} = 25\ 000$ кадр/с; 4 – ВАХ и скачки напряжения 5, 6 при выбросе с анода новых факелов; 7–10 – последовательные кадры съемки в инфракрасном диапазоне длин волн, $f_{пер} = 500$ кадр/с, $I \sim 270$ А; 11, 12 – кадр 9 крупным планом и его изолинии яркости; 13 – горячее ядро; 14 – менее нагретая периферийная зона; 15 – "прохладная" область плазменной неоднородности (изгиба шнура); 16–18 – структура анодной струи (ядро, периферия, область максимальной светимости)

* Электроды ориентированы горизонтально.

тых) областей. Иногда 9 они похожи на "плазмойды". Дополнительно на этих кадрах видны многочисленные более мелкие структуры, обусловленные несовершенством аппаратуры. Они, вообще говоря, не соответствуют микрочастицам, принесенным с анода струями типа 1—3. Наличие же графитовых частиц (или пыли) в воздушных дугах на угольных электродах — факт очевидный. В частности, при указанных токах эрозия электродов может достигать до $\sim 10^{-5}$ г/Кл [10]. Дополнительно известно, что в спектре излучения таких дуг доминируют линии С и полосы CN [7, 10]. Структура локальных плазменных неоднородностей 9 (резко изгибной области шнура и анодной струи) и изолинии яркости отражены на кадрах 11, 12. Видна узкая зона пониженной температуры 15. Вероятно, она обусловлена формированием вихревого движения, возникающего при взаимодействии катодной и анодной струй.

Можно предположить, что рассмотренные выбросы струй с анода могут служить одной из причин нарушения стабильности разряда (крайние кадры рис. 2). Это сопровождается существенными колебаниями разрядного тока (до 70 А). Потеря стабильности разряда демонстрирует большое многообразие возможных его форм (рис. 4). В частности, известно, что "лобовое" столкновение катодных и анодных струй может расширить токовый канал и сформировать диффузную область разряда [3, 5]. В данных экспериментах диффузно-шнуровой раз-

ряд (с наличием токового шнура у катода) представлен на кадре 1. Следующий кадр 2 демонстрирует результат контракции тока в этом разряде, что отражено и на осциллограммах 3, показывающих рост напряжения на разрядном промежутке и уменьшение силы тока. Процессы формирования и угасания параллельного токового канала представлены на кадрах 4—6. Наконец, следует отметить влияние процессов шунтирования на формирование замкнутых плазменных структур серповидной формы 7, 8. Представляется, что небольшой начальный изгиб токового шнура приводит к появлению пондеромоторной силы, подобной силе электромагнитного ускорения в рельсовых ускорителях (рельсотронах), приводящей к дальнейшему растягиванию петли тока и росту падения напряжения, что и облегчает процесс зажигания шунтирующей дуги и отсечения серповидного плазменного облака.

В проведенной серии экспериментов (18 пусков) обнаружен режим колебаний в вертикальном направлении токового шнура при горизонтальной ориентации электродов (рис. 5, видеокادر 1). Изначально (при инициировании дуги и умеренных токах до ~ 10 А) всплытие токового шнура обеспечивается, прежде всего, силой Архимеда $F_{\text{Арх}} = (\rho_{\text{дуги}} - \rho_0)g\Omega_{\text{дуги}}$, $\rho_{\text{дуги}} \ll \rho_0$. Здесь $\rho_{\text{дуги}}$, ρ_0 — плотности шнура и окружающего воздуха; $\Omega_{\text{дуги}}$ — объем токового шнура; g — ускорение свободного падения на поверхности Земли.

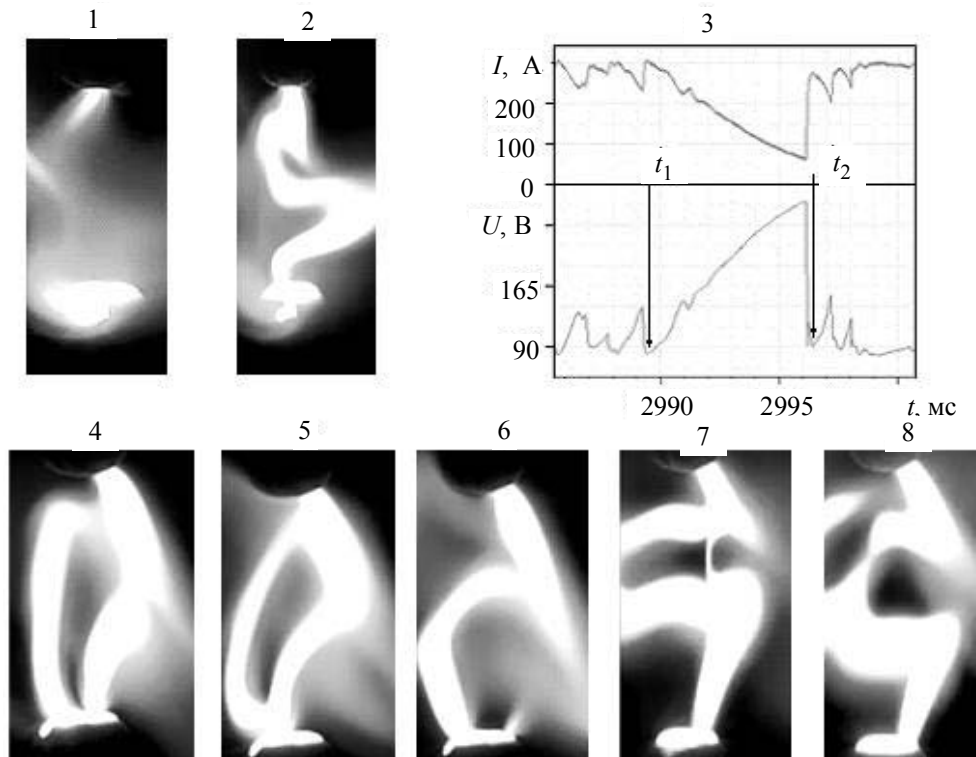


Рис. 4. Изменение формы токового канала разряда при вертикально направленных электродах:

1, 2 и 3 — последовательные видеокдры и осциллограммы тока и напряжения при переходе от диффузно-шнурового разряда к разряду контрагированному; t_1 , t_2 — моменты времени, соответствующие кадрам 1, 2; 4—6 — последовательные кадры образования и угасания параллельного шнура; 7, 8 — образование и развитие шунтирующей дуги; $f_{\text{пер}} = 1200$ кадр/с. Анод расположен снизу

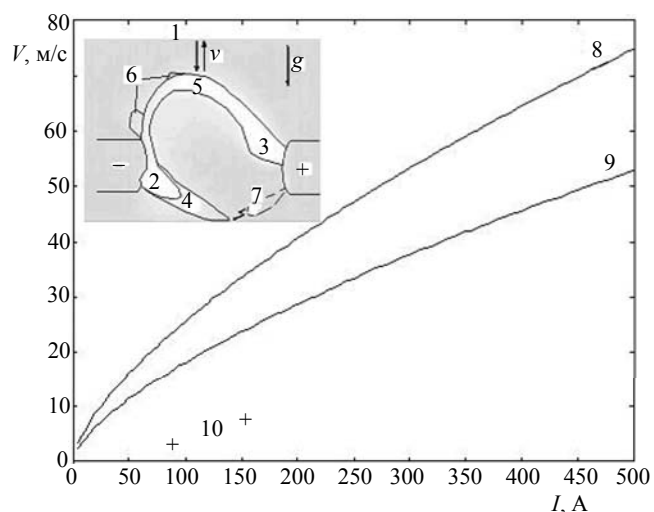


Рис. 5. Колебание столба разряда в вертикальном направлении при горизонтально ориентированных электродах:
 1 — видеокадр разряда с оконтуренными линиями его структуры; g — ускорение силы тяжести; 2, 3 — ядра катодного и анодного факелов; 4 — периферийная зона катодного потока плазмы; 5 — токовый шнур; 6 — зарождающиеся плазменные вихри; 7 — грядущий выброс факела с анода; 8, 9 — расчетные (радиус шнура $r_{\text{шн}} = 2,5$ и 5 мм) и экспериментальные 10 скорости V шнура; $l_{\text{мз}} = 40$ мм, $I = 150$ А; $f_{\text{рег}} = 25\ 000$ кадр/с

В установившемся разряде ($I \sim 100\text{--}200$ А) пондеромоторные силы $F_{\text{понд}}$ превышают, по оценкам, на три порядка силы Архимеда. Величина силы $F_{\text{понд}}$ может быть оценена по формуле ускоряющей силы в рельсотроне, для которого токоведущими линиями являются электроды разряда $F_{\text{понд}} = L'I^2 / 2$. Здесь L' — погонная индуктивность воображаемой рельсовой системы, направленной вертикально вверх от электродов [11].

При достаточно протяженных сильноточных разрядах силами сопротивления движения дуги в пограничном слое электродов можно пренебречь

по сравнению с силами аэродинамического сопротивления $F_{\text{сопр}} = \rho_0 C_x S V^2 / 2$. Здесь V — скорость перемещения шнура в вертикальном направлении; S — эффективная площадь лобной части шнура в проекции на горизонтальную плоскость; $C_x = C_x(V)$ — коэффициент сопротивления при обтекании шнура-цилиндра [12]. Силой инерции шнура пренебрежем (ввиду малости его массы и квазистационарности разряда, подобно ситуации в многовитковых дуговых ускорителях [13]). По оценкам, с изменением радиуса токового шнура $r_{\text{шн}}$ скорость его перемещения $V \sim r_{\text{шн}}^{-1/2}$.

Расчитанные (см. рис. 5) из баланса сил $F_{\text{сопр}} = F_{\text{понд}}$ скорости шнура (кривые 8 и 9 для разных радиусов шнура — 2,5 и 5 мм) по порядку величины соответствуют экспериментальным точкам 10. По мере движения шнура 5 вверх происходит его удлинение, при этом электрическое сопротивление дуги увеличивается, а ток и температура уменьшаются. На верхних частях шнура начинают выпучиваться под действием сил Архимеда плазменные облака 6, уже не удерживаемые (из-за спада тока) пондеромоторными силами. По мере продвижения дуги вверх катодная струя 2 и ее периферийная зона 4 постепенно продвигаются к аноду. В результате, его ближайшая от катодного факела поверхность нагревается. Наконец, наступает момент, когда происходит выброс новой анодной струи 7 и по кривой 2—4—7 формируется новый (нижний) токовый канал, а старый (верхний) обесточивается. При этом плазменные облака 6 окончательно локализируются и могут переходить в плазменные вихри. Далее процесс повторяется. Параметры некоторых зарегистрированных плазменных образований представлены ниже:

№	Название плазменного объекта	Размер, мм	Скорость*, м/с	Время жизни, мкс	Период образования, мс	$l_{\text{мз}}$, мм / I , А
1	Анодные струи	Диаметр/длина 5±2/20—30	40 ± 53	450±50	1,0 ± 0,1	25 / 75
2	Прианодные плазмоды	Диаметр 4±1	30±5	800—900	0,46 ± 0,02	40 / 70 ± 20
3	Катодные плазмоды	Диаметр 5±1	1	8000 ± 2000	300	40 / 70 ± 20
4	Серповидные плазмоды	Длина 15—20	10	2000	2,0±1,0	40 / 250±50

* Подразумевается скорость перемещения фронта струи. Скорости же частиц плазмы в струе существенно выше $\sim 10^2\text{--}10^4$ м/с [3, 4].

Сходные рассмотренным выше режимам (см. рис. 5) режимы колебаний шнура наблюдаются также, если катодный факел стабилизируется в течение достаточно длительного времени в направлении немного выше анода. Тогда пондеромоторные силы продавливают шнур не вверх, а вдоль верхней части анодной поверхности. В некоторый момент, по мере ее нагрева излучением из близко расположенного шнура, происходит зарождение нового анодного факела, и токовый канал перемещается на новое место.

Следует отметить, что скорости всплытия возникающих плазменных вихрей типа б на рис. 5 могут быть оценены из баланса сил Архимеда и сил аэродинамического сопротивления. При диаметре облака-вихря $d_{\text{обл}} \sim 1$ см получим $V_{\text{обл}} \sim 4,5$ м/с. С изменением размера облака $d_{\text{обл}}$ справедливо соотношение $V_{\text{обл}} \sim (d_{\text{обл}})^{1/2}$. По экспериментальным данным, полученным в вертикальном разряде, скорость плазменного облака, всплывающего от верхнего электрода (катода), $V_{\text{обл}} \approx 5$ м/с.

Обсуждение результатов

Графит при смене агрегатного состояния в нормальных условиях ($p \sim 0,1$ МПа) не дает жидкой фазы. Возможно, наблюдающиеся анодные струи — это вынос твердых частиц из опорного пятна или ближайших пор электрода, изготовленного прессованием и спеканием порошкообразного графита (в отличие от более чистого графитового материала ЗОПГ) с примесями Са и Mg. Эти струи могут быть связаны также с выносом газообразных химических соединений углерода (типа CO, CO₂, C₂, CN). Реакция окисления частиц углерода, возможно, могла начаться при повышении температуры и давления уже в теле электрода с адсорбированным и накопленным в порах воздухом. При этом скорости истечения газа из электрода через его "лобовую" и боковую поверхности разные из-за разных гидравлических сопротивлений проводящих трактов внутри электрода. Прояснить этот вопрос может спектрографический анализ среды у опорных пятен. Если на спектрограммах будут обнаружены Са или Mg, то это будет означать, что не все примеси были удалены при отжиге электродов и они могли перейти в соединения типа СаО и MgO.

Режимы разряда с возникновением в межэлектродном пространстве короткоживущих яркосветящихся образований можно трактовать как аномальные ввиду их довольно редкого проявления (десятки—сотни из сотен тысяч рассмотренных кадров изображений).

С другой стороны, наблюдаемый на некоторых видеокдрах выброс и всплытие облаков сажи из анодного пятна можно трактовать как некий процесс горения графита. Представляется, что те струи, которые видны при регистрации изображений разрядного промежутка, — это отражение движения твердых микрочастиц с постепенным их окислением (горением). При этом направление вектора скорости этих частиц может не совпадать с направлением линий электрического тока*.

По мере сгорания углерода образовавшиеся газы (CO, CO₂, CN) подвергаются диссоциации, продукты которой начинают ионизоваться и участвовать в переносе тока. На некоторых расстояниях от электрода могут начаться обратные процессы рекомбинации (например, при выходе этих частиц в периферийные относительно холодные зоны разряда). Тогда возможно получение твердых кластеров частиц углерода, уже "видимых" тепловизором**. Для прояснения ситуации необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования, т. е. наряду с регистрацией изображений в рассмотренных диапазонах длин волн целесообразно иметь и синхронизированные спектральные и зондовые измерения.

Заключение

На основе проведенных экспериментальных исследований с помощью высокоскоростной регистрации процессов с высокой степенью разрешения (1200—60 000 кадр/с) в видимом и (500 кадр/с) в инфракрасных диапазонах длин волн при токах до ~ 300 А обнаружены режимы отрыва плазменных вихрей от столба дугового электрического разряда в свободной атмосфере воздуха.

Зафиксировано образование вблизи поверхности анода локальных замкнутых областей повышенной яркости ("плазмоидов"), перемещающихся от анода по столбу разряда с постепенным их рассасыванием в межэлектродном промежутке.

Получены количественные данные о режимах протекания тока с отрывом плазменных облаков от дугового столба и режимов разряда с формированием локальных прианодных газопылевых и газоплазменных неоднородностей структуры разряда. Оценены их скорости перемещения и размеры. Для горизонтального дугового разряда исследованы режимы колебаний токового шнура в вертикальном направлении.

* Наш электрод имеет хаотичную пористость, так как изготовлен из микрочастиц произвольной формы методом прессования. Возможно, эти частицы в местах контакта друг с другом не спеклись, а просто "зацепились".

** Данные рассуждения можно рассматривать как рабочую гипотезу.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института прикладной механики РАН:

А. Ф. Колесникову — за предоставленное для проведения эксперимента тепловизионное оборудование и А. Н. Гордееву — за участие в эксперименте и за консультации по использованию прикладных программ, сотруднице химфака МГУ Е. Д. Киреевой — за расшифровку структурного и химического состава образцов графитовых электродов.

Мы признательны господам М. А. Мищуку и А. В. Левенкову за консультации и техническое содействие в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961.

2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.

3. Брон О. Б., Сушков Л. К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. — Л.: Энергия, 1975.

4. Любимов Г. А. // Докл. АН СССР. 1975. Т. 225. № 5. С. 1045.

5. Герман О. В., Глинов А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А. // Изв. РАН. МЖГ. 2011. № 6. С. 136.

6. Герман О. В., Еришов А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А., Сурконт О. С. // Там же. 2009. № 1. С. 142.

7. Герман О. В., Глинов А. П., Козлов П. В., Любимов Г. А. // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 2. С. 1.

8. Герман О. В., Еришов А. П., Козлов П. В., Копыль П. В., Любимов Г. А., Сурконт О. С. // Там же. 2009. Т. 47. № 4. С. 506.

9. Копыль П. В. / Тр. X конференции-конкурса молодых ученых НИИ механики МГУ, 11—14 октября 2009 г. С. 195.

10. Гордеев В. Ф., Пустогаров А. В. Термоэмиссионные дуговые катоды. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

11. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.

12. Горнер С. Ф. Динамическое сопротивление жидкости/ Механика жидкости // Под ред. Дж. Дейли и Д. Харлеман. — М.: Энергия, 1971.

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

Some visualisation features of processes in stretched ARC discharge in the free air atmosphere

V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, P. V. Kozlov, G. A. Lyubimov
Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University
1 Michurinsky av., Moscow, 119192, Russia
E-mail: krestytroitsk@mail.ru

The experimental research of processes in the low-temperature plasma of quasi-stationary arc discharges in an air environment at the one bar pressure between graphitized electrodes is conducted. Along with conventional (arc-shape) form of the discharge, it was studied also other regimes of a current passing: diffuse (proportioned) and diffuse-pinched. Processes of a contraction, foliation and a shunting are considered. Modes of the current fluctuations, caused by interaction of cathode and anode streams, and occurrence of plasma jets and firm particles with locally hot anode surfaces are found out.

PACS: 52.80.Mg

Keywords: electric arc, high speed shooting, video- and infra-red bands of wave lengths, plasma structure, gas-dust clouds, contraction, foliation, shunting.

Bibliography — 13 references.

Received July 20, 2012