

УДК 533.0.011:537.4

© 2007 г. В.О. ГЕРМАН, П.В. КОЗЛОВ, Г.А. ЛЮБИМОВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ ОБДУВА

Приведены результаты экспериментального исследования формы дугового разряда, горящего между двумя электродами в воздухе при атмосферном давлении, отсутствии обдува и токах меньше 100 А. Характерное расстояние между электродами ~3 см. В некоторых экспериментах для решения специальных задач расстояние между электродами варьировалось. Исследовано влияние материала электродов на форму разряда.

Установлено, что материал электрода не изменяет качественной формы разряда, но может приводить к существенному изменению распределения параметров в разрядном промежутке.

Работа представляет собой продолжение исследований, описанных в [1].

*Ключевые слова:* дуговой разряд, дуга, атмосферная дуга, устойчивость дуги, электроды, материал электродов.

В последние годы вновь возник интерес к свойствам различных электрических разрядов, горящих в потоке газа. Этот интерес “подогревается” стремлением решить конкретную техническую проблему – создать устройство, с помощью которого можно подводить энергию в некоторой точке потока впереди летящего с большой скоростью тела с тем, чтобы существенно изменить картину обтекания тела и уменьшить его сопротивление.

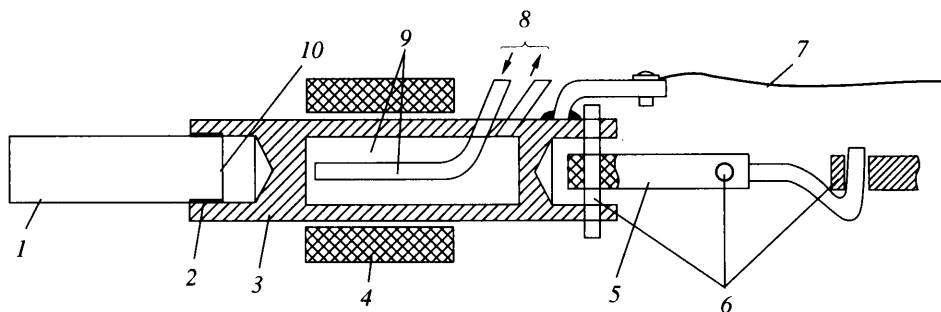
Один из гипотетически возможных путей подвода энергии к потоку – использование электрического разряда. Реализация этого пути требует знания свойств разряда в потоке, в частности условий горения такого разряда. Знакомство с литературой показало, что существующие представления о форме и условиях существования разряда в потоке в широком диапазоне скоростей недостаточны и требуют дополнительных физических исследований.

В связи с этим были выполнены экспериментальные исследования дугового разряда с током меньше 100 А, горящего в потоке воздуха, азота и аргона при скоростях потока 0–20 м/с и электродных промежутках 5–20 мм [1]. Основной результат этих исследований состоит в том, что в изученных условиях при разряде в воздухе канал разряда представляет собой узкие приэлектродные области с достаточно высокой температурой газа (светимостью) и плотностью тока, которые разделены пространством с существенно более низкой температурой (светимостью) и плотностью тока.

В связи с такой формой данный разряд назван диффузно-дуговым. Этим названием рассматриваемый разряд отделяется от обычного дугового разряда, в котором электроды связываются единым дуговым шнуром с высокими температурой и плотностью тока. Такую форму имел разряд тех же параметров в аргоне.

Обсуждение результатов исследований [1] поставило вопрос о том, не зависит ли форма рассматриваемого разряда от материала используемых электродов. Ответ на этот вопрос содержится в настоящем исследовании.

**1. Оборудование и организация эксперимента.** В качестве электродов использовались цилиндрические стержни из силицированного графита, меди и лантанированного



Фиг. 1. Конструктивная схема подвижного электрода: 1 – сменный электрод; 2 – зона заземления электрода; 3 – токопровод; 4 – керамический изолятор, направляющая; 5 – высоковольтный изолятор; 6 – шарниры; 7 – гибкий токопровод; 8 – охлаждающая жидкость; 9 – каналы охлаждения; 10 – тыльная зона электрода

вольфрама. Выбранная геометрия электродов позволила проводить эксперименты как с одинаковыми электродами, так и с парами электродов из различных материалов.

Относительно короткие (1–30 мм) стержни-электроды 1 (фиг. 1) монтировались в цилиндрических удлиненных (до 200 мм) токоподводах 3, что, с одной стороны, уменьшало влияние ориентации внешней электрической цепи, а с другой – упрощало конструктивную схему взаимного аксиального перемещения электродов в цилиндрических направляющих втулках-изоляторах 4. Противоположный электроду конец цилиндрического токоподвода гибкой шиной 7 присоединялся к внешней электрической цепи.

С целью изучения поведения разряда в свободном пространстве без обдува при увеличенных (до 100 мм) межэлектродных промежутках использовались исполнительные механизмы, позволяющие изменять этот промежуток после включения регистрирующей аппаратуры и появления тока в разрядном промежутке. В качестве раздвижных устройств были выбраны электромагнитный (ход 20–30 мм) и пневматический (ход до 120 мм) исполнительные механизмы. Время, необходимое на перемещение электрода с помощью таких механизмов, не превышало 0,1 с.

Исследования описанных “традиционных” систем электродов (см. фиг. 1) проводились в свободной воздушной атмосфере.

Кроме описанных “традиционных” электродных систем были исследованы вольфрамовые катоды с подачей паров калия к их поверхности. Такие катоды имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными электродами [2]. Структура приэлектродной области вблизи таких электродов и физические механизмы обмена током на их поверхности отличаются от таковых для традиционных электродов.

В описываемых опытах использовался вольфрамовый электрод, соединенный с молибденовым токопроводом, в котором размещалась пористая вставка. Через эту вставку к поверхности электрода подавалось легкоионизируемое вещество, содержащее калий. Эти опыты проводились в среде аргона чтобы избежать “отравления” калия, высадившегося на поверхность вольфрама. Исследуемые электроды через уплотнения вводились в камеру (~5 л) из изоляционного материала, наполненную аргоном. Наблюдение и регистрация процессов в межэлектродном промежутке при этом проводились через специальные окна.

С целью более детальной регистрации развития и существования пространственного разряда между достаточно удаленными друг от друга электродами проводилась синхронизированная регистрация поведения разряда в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. С помощью видеосистем Мосат 4000, а также цифрового фотоаппарата, снабженного объективом с центральным затвором. Регистрация светимости плазмы разряда

проводилась в видимой области спектра, что определялось областью спектральной чувствительности матрицы видеокамеры и областью спектральной прозрачности объектива фотоаппарата.

Возможности системы регистрации таковы, что видеосистемы Мосам 4000 (одна или обе) и цифровой запоминающий осциллограф АСК-3107 с полосой пропускания 100 МГц начинают вести регистрацию процесса еще до появления силового разряда между электродами. Запуск системы регистрации осуществляется по световому импульсу, возникающему при пробое межэлектродного промежутка от осциллятора. Это позволяет наблюдать на видеограмме и осциллограммах как зарождение силового разряда между электродами (при зоре 2–4 мм), так и его развитие при увеличении межэлектродного расстояния.

Скоростная видеокамера Мосам-4000 позволяет проводить съемку со скоростями 50–4000 к/с и минимальной длительностью экспозиции  $2.06 \cdot 10^{-6}$  с. Приемником света является КМОП-матрица МТ9М413, числом пикселей  $1280 \times 1024$  и размером одного активного пикселя  $12 \times 12$  мкм. Во время скоростной видеосъемки данные пишутся в непрерывном режиме в кольцевой буфер памяти устройства захвата кадров, а после получения сигнала синхронизации стартует алгоритм (например, заранее установленный уровень освещенности в выбранной области кадра), определяющий начало и конец данных для сохранения на жестком диске компьютера. Регистрируемое изображение сохраняется в виде последовательности файлов в BMP формате (256 градаций серого).

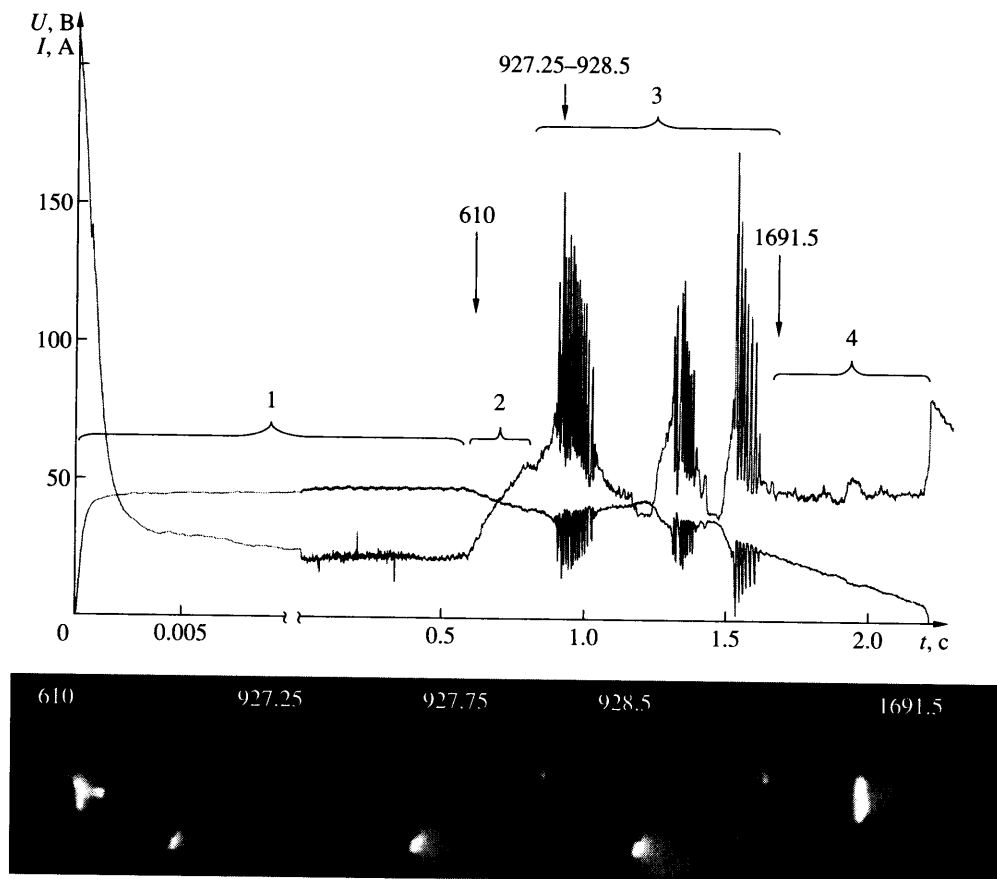
**2. Результаты экспериментов и их обсуждение.** В описываемой серии экспериментов разряд инициировался при малых межэлектродных промежутках  $h_0 \sim 5$  мм. После этого электроды раздвигались и за время  $t_{**} \sim 0.3$  с межэлектродный промежуток достигал величины  $h \sim 3$  см. Благодаря недостаточной жесткости электродной системы часто в результате раздвижения электродов теряется соосность электродов, и они сдвигаются друг относительно друга в боковом направлении на 2–3 мм. Возможно, что в системе электродов при раздвижении возникают вибрации. Во всяком случае очень часто после раздвижки электродов возникают неустойчивые режимы разряда, и только после этого разряд переходит в стационарный режим. Для иллюстрации этого явления приведем фиг. 2, на которой представлены развертки тока и напряжения и соответствующие некоторым моментам времени кадры, представляющие форму разряда, горящего в воздухе между двумя электродами из силицированного графита. На стационарном участке (см. кадр 1691.5) форма разряда практически совпадает с формой разряда, описанной в [1].

На участке неустойчивого разряда (кадры 927.5–928.5 на фиг. 2) форма разряда меняется с высокой частотой и для нее характерны пробои низкотемпературных (темных) областей.

Для того чтобы оценить влияние материала электродов на форму разряда, приведем фиг. 3–5. На этих фигурах приведены отрезки кинограмм разряда, снятые на участках стационарного горения разряда, причем анод (правый электрод на видеокадрах фиг. 2–4 и левый на фиг. 5) для всех этих опытов был изготовлен из силицированного графита, а катод из лантанированного вольфрама (фиг. 3), меди (фиг. 4) и вольфрама, к поверхности которого подавалось легкоионизируемое вещество (фиг. 5). В последнем случае опыты проводились в атмосфере аргона.

Подчеркнем, что фигуры 2–5 относятся к опытам, в которых ось, соединяющая электроды, расположена вертикально (изображения разряда, представленные на этих фигурах, повернуты на  $90^\circ$  по часовой стрелке).

Сравнение катодных областей разряда, изображенных на фиг. 2–5, показывает, что с качественной точки зрения материал электрода слабо влияет на форму разряда. Однако попадание в межэлектродный промежуток паров легкоионизируемого вещества (в данном случае калия) приводит к существенному увеличению яркой зоны вблизи катода (ср. фиг. 5 с фиг. 2–4). Это обстоятельство говорит о том, что на форму ярких приэлектрод-

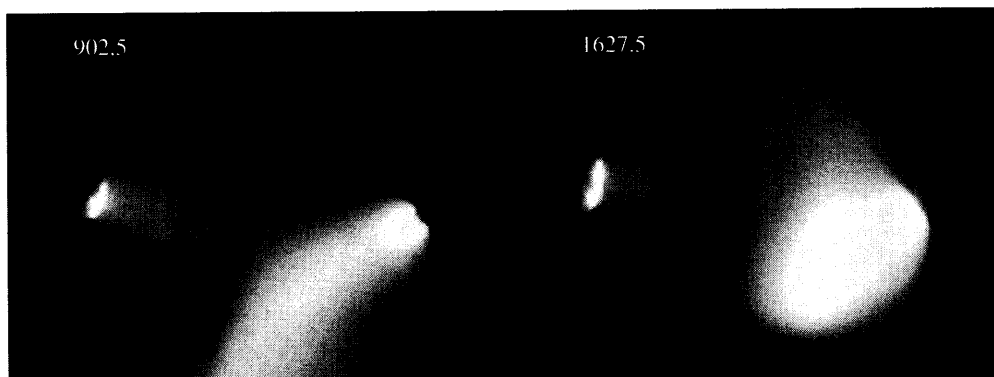
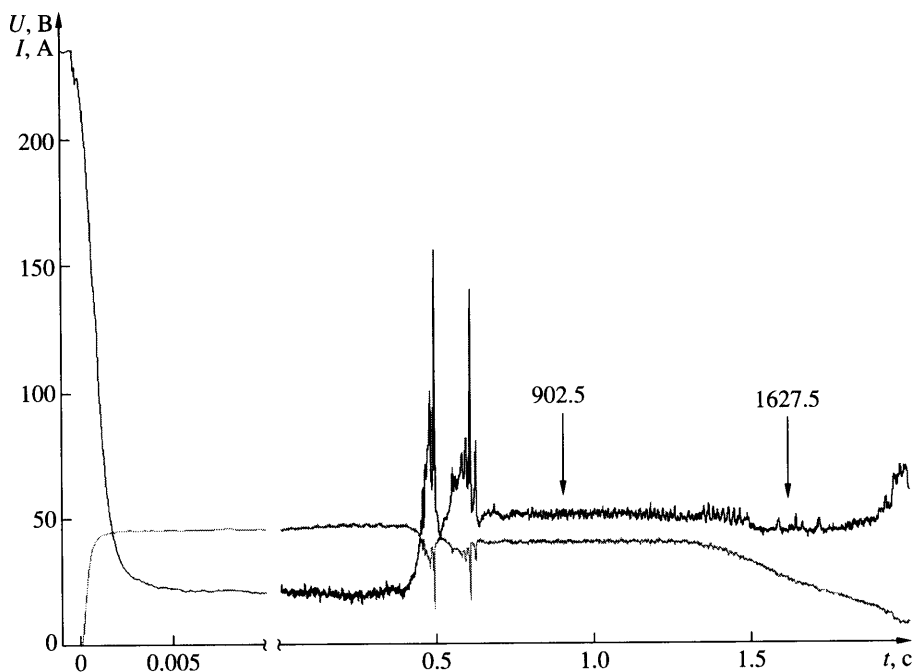


Фиг. 2. Кадры видеogramмы и осциллограммы тока и напряжения разряда в воздухе между вертикально расположенными угольными электродами. На осциллограмме отмечены моменты времени, соответствующие приводимым кадрам видеogramмы. Области разряда: 1 – с коротким межэлектродным промежутком; 2 – раздвижения электродов; 3 – неустойчивого горения разряда при максимальном межэлектродном промежутке; 4 – стационарного разряда

ных областей дуги в большей степени, чем материал электродов, оказывает влияние состав атмосферы, в которой горит разряд, в частности величина потенциала возбуждения и ионизации молекул атмосферного газа.

Анализ видеogramм фиг. 2–5 показывает, что светящиеся приэлектродные области разряда находятся в непрерывном движении, так что форма (картина) разряда не является, строго говоря, стационарной. Возможно именно с этим связаны небольшие колебания на осциллограммах тока и напряжения, наблюдаемые на стационарных участках разряда.

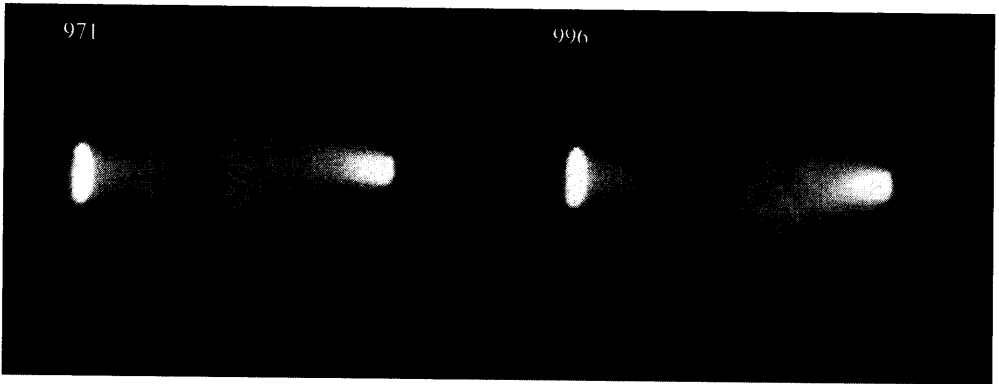
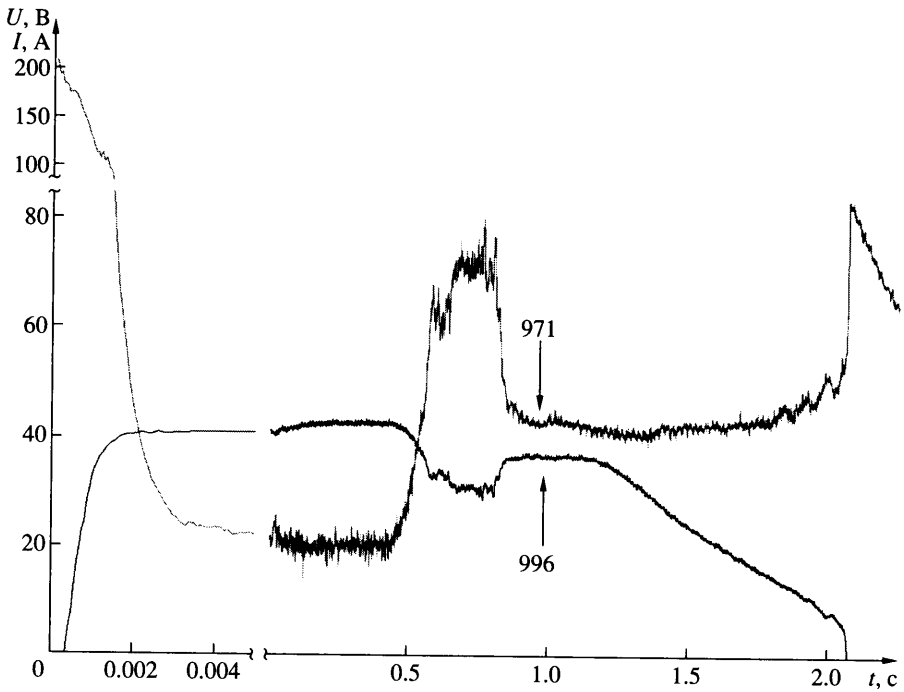
Яркие области разряда (“хвосты”) перемещаются в пространстве, “опираясь” на катодные и анодные пятна, которые, в свою очередь, движутся по поверхности электрода, причем оси “хвостов”, как правило, не перпендикулярны поверхности электрода. Это может быть связано как с отставанием скорости прогрева и остывания газа, так и с влиянием конвективных движений газа в межэлектродном промежутке.



Фиг. 3. Кадры видеозаписи и осциллограммы тока и напряжения разряда между вертикально расположенными угольным анодом (на видеозаписи справа) и катодом из лантанированного вольфрама. Обозначения те же, что на фиг. 2

Для того чтобы представить себе пространственную яркостную структуру разряда, были выполнены опыты по синхронной регистрации формы разряда в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Видеозаписи двух таких экспериментов приведены на фиг. 6 (вертикальное расположение оси электродов) и на фиг. 7 (горизонтальное расположение оси электродов).

Пересветка пикселей (темные точки в электродных областях) на фиг. 6 и 7 при съемке анфас показывает дислокацию и размер наиболее ярких областей разряда — катодных пятен. Сравнение рядов видеозаписей на этих фигурах убеждает в том, что яркостная картина дуги в обоих случаях имеет пространственный характер. Однако колебания формы разряда в случае горизонтально расположенных электродов гораздо меньше, чем в случае вертикально расположенных электродов. При горизонтальном располо-

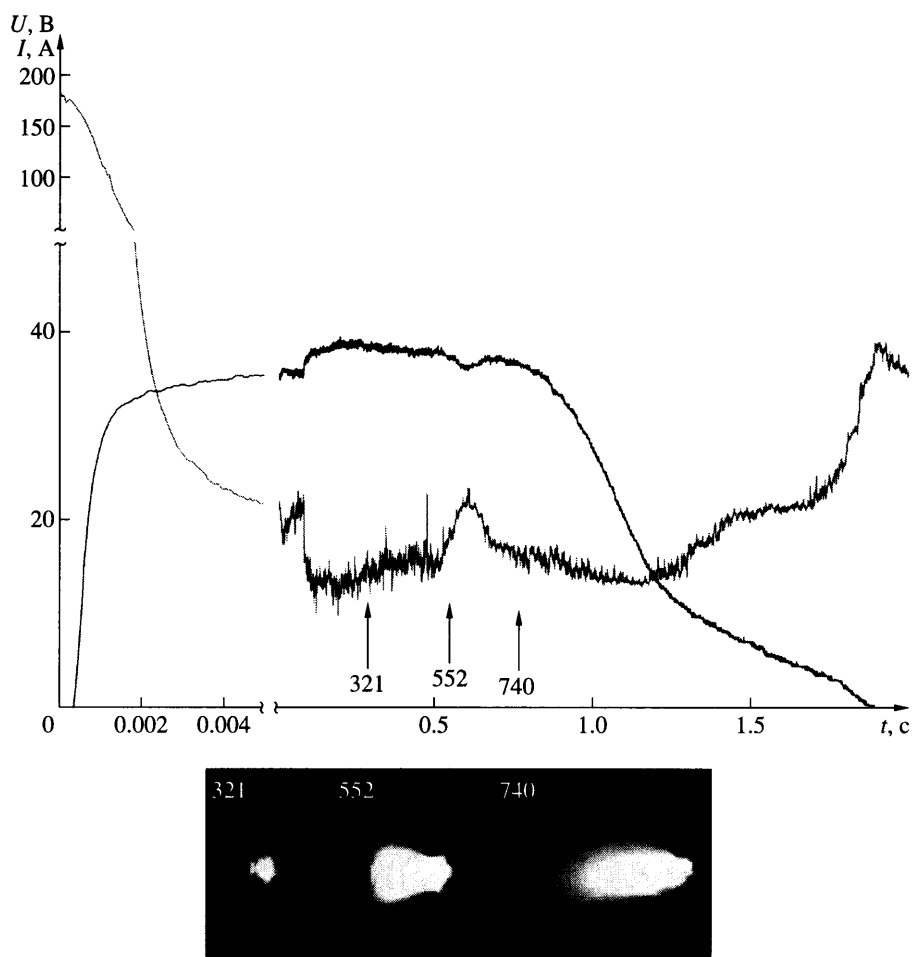


Фиг. 4. Кадры видеозаписи и оциллограммы тока и напряжения разряда в воздухе между вертикально расположенными угольным анодом (справа) и медным катодом (слева). Обозначения те же, что на фиг. 2

жении электродов разряд всегда располагается выше их оси, что, по-видимому, связано с влиянием конвекции.

Для большей наглядности на фиг.8 приведено аксонометрическое изображение разряда между горизонтально расположенными электродами, построенное с помощью кадров видеозаписи фиг. 7.

В [1] при трактовке результатов анализа яркостной структуры разряда предполагалось, что более яркие области межэлектродного промежутка соответствуют областям с более высокой плотностью тока. Кроме того, авторы опирались на представление о том, что в дуговом разряде в газе при атмосферном давлении ток между электродами протекает по тонкому дуговому шнуру, плотность тока и температура в котором очень

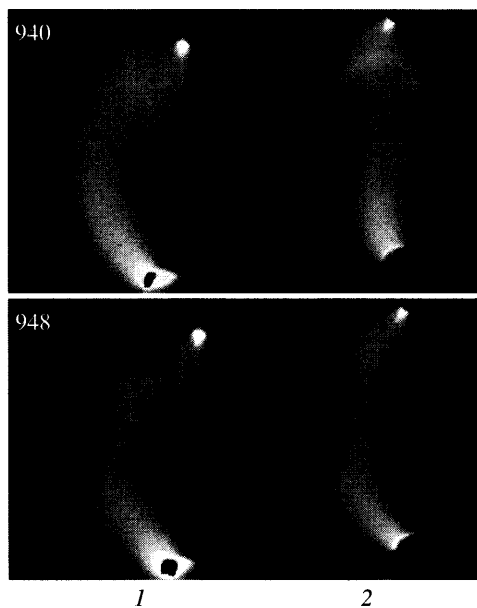
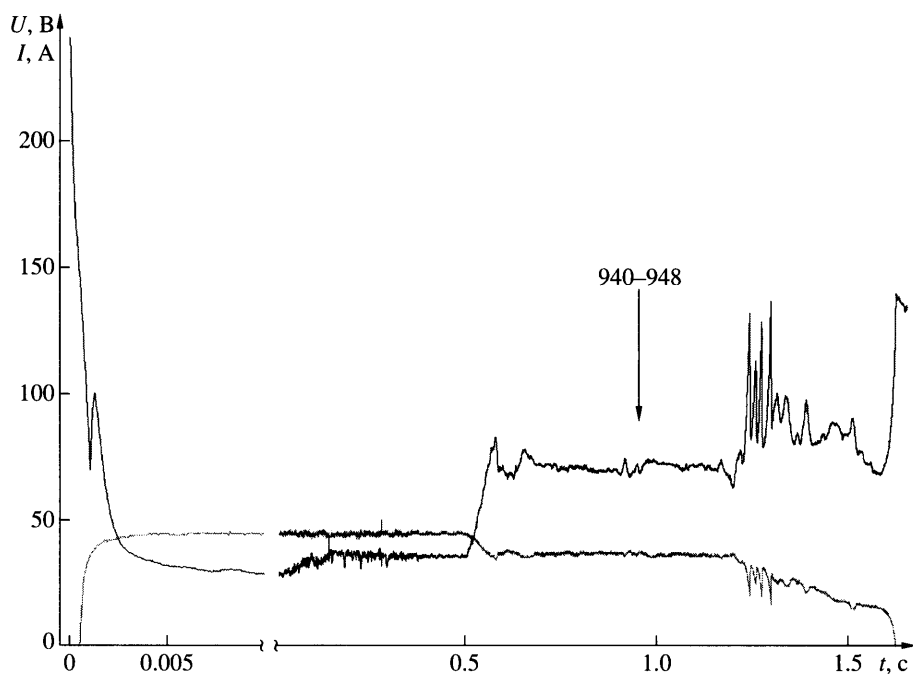


Фиг. 5. Кадры видеопленки и осциллограммы тока и напряжения разряда в аргоне между вертикально расположенными угольным анодом (слева) и вольфрамовым катодом, к поверхности которого подавалось легкоионизирующее вещество. Кадры соответствуют участкам: 321 – короткой дуги, 552 – раздвиганию электродов, 740 – стационарного разряда. Обозначения те же, что на фиг. 2

высоки, и, следовательно, шнур на видеопленках должен представляться узкой яркой областью, соединяющей электроды.

В рамках этих представлений форма разряда, аналогичная изображенной на фиг. 2, называлась в [1] диффузно-дуговой, так как единая узкая ярко светящаяся область, соединяющая электроды, отсутствует, хотя вблизи электродов существуют зоны, по форме похожие на части шнура разряда.

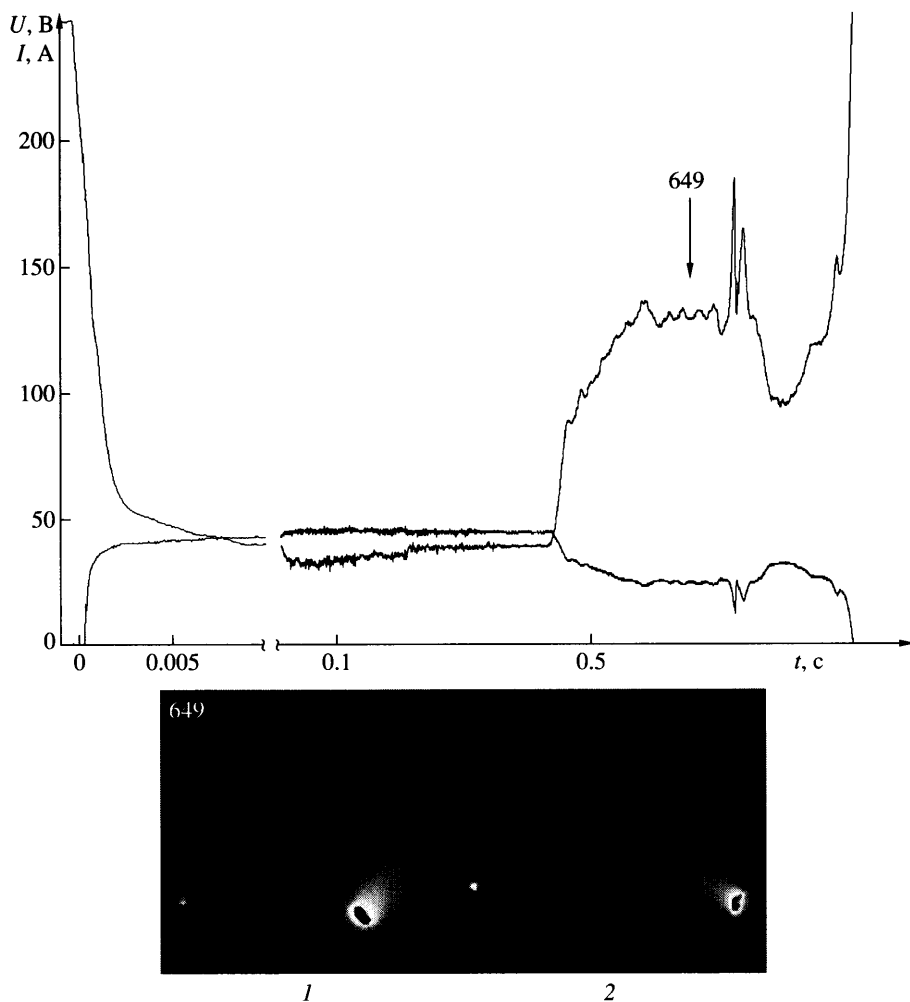
Таким образом, можно утверждать, что в условиях экспериментов, результаты которых представлены в данной работе и работе [1], отсутствует шнур дугового разряда, понимаемый как единая узкая область протекания тока высокой плотности, соединяющая электроды, в пределах которой распределение параметров газа близко к однородному. Рассматриваемые эксперименты соответствуют стационарным атмосферным дугам при токах, меньших 100 А и расстояниям между электродами порядка 3 см.



Фиг. 6. Последовательность кадров видеозаписи и оциллограммы тока и напряжения для разряда в воздухе между вертикально расположенными угольными электродами. Кадры 1, 2 – съемка камерами 1, 2. Обозначения те же, что на фиг. 2

В монографии [3] вводится понятие “короткой дуги”. Это понятие определено нечетко. Исходя из описания “короткой дуги” [3], можно принять, что исследованные в данной работе и в [1] дуги относятся именно к этому классу. Не исключено, конечно, что в



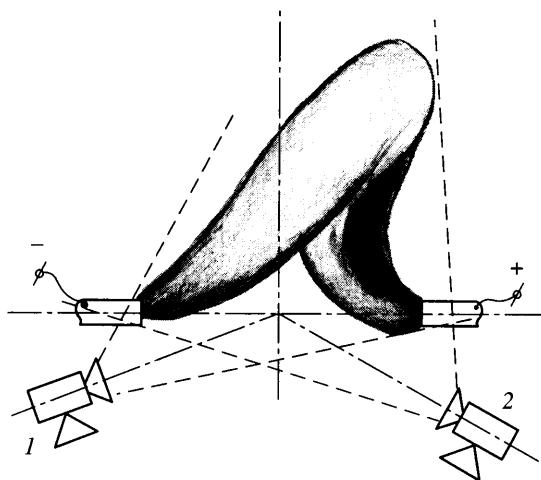


Фиг. 7. Кадры видеogramм и осциллограммы тока и напряжения для разряда в воздухе между горизонтально расположенными угольными электродами. Кадры 1, 2 – съемка камерами 1, 2. Обозначения те же, что на фиг. 2

данной работе исследован только некоторый подкласс таких дуг. Исследованная с высоким временным разрешением яркостная картина рассматриваемой дуги позволяет сделать некоторые физические выводы.

Разряд инициировался пробоем от высоковольтного источника начального межэлектродного промежутка ( $h \sim 2-4$  мм). За счет мощности, выделенной при пробое, газ в межэлектродном промежутке ионизируется и образуется узкий канал разряда, по которому протекает начальный ток  $\sim 50$  А. За счет излучения из области начального разряда прогревается значительная область газового промежутка (порядка расстояния между электродами), ионизация в которой достаточна для протекания тока, а температура приэлектродных областей определяется условиями на поверхности электродов.

При раздвигании электродов яркостная структура вблизи электродов не изменяется и, следовательно, не изменяются существенно параметры ярких приэлектродных областей разряда. Газ в этих областях нагревается только за счет протекающего тока, по-



Фиг. 8. Аксонометрическое изображение разряда между горизонтально расположенными электродами

этому плотности тока здесь должны быть велики, а размер этих областей – мал. В то же время между анодной и катодной яркими областями возникает пространство меньшей яркости, причем его яркость убывает с удалением от электрода. Этот факт, по-видимому, свидетельствует о том, что яркие приэлектродные области являются основными источниками разогрева газа вдали от электродов за счет излучения. Разогрев газа за счет протекающего в нем тока в этих областях невелик в связи с их большим размером и, следовательно, относительно низкой плотностью тока.

То, что нагрев и ионизация газа в пространстве между приэлектродными областями связаны в основном с излучением из этих областей, подтверждается также существованием двух областей пониженной яркости – “хвостов”, каждая из которых связана либо с катодной, либо с анодной приэлектродной областью и перемещается в пространстве вместе с приэлектродными областями. Динамика “хвостов” зависит от характера перемещения приэлектродных областей и от конвективных течений в межэлектродном промежутке.

Описанная физическая картина разряда может реализовываться до тех пор, пока ток, напряжение и величина межэлектродного промежутка таковы, что излучение из приэлектродных областей обеспечивает степень ионизации в межэлектродном промежутке, достаточную для диффузного протекания тока между приэлектродными областями.

При достаточном разведении электродов падения напряжения на области диффузного протекания тока может стать недостаточно для протекания тока заданной величины. При условиях, близких к этим критическим условиям, раздвигание электродов будет приводить к падению тока разряда и росту амплитуды пульсаций напряжения, которые отражают пульсации сопротивления промежутка, связанные с нестационарным поведением “хвостов” приэлектродных областей. В этих условиях при благоприятном стечении обстоятельств может произойти пробой диффузной области и образование узкого канала разряда, который отождествляется с дуговым шнуром атмосферной дуги. В противном случае произойдет погасание разряда. В описанных в данной работе опытах максимального расстояния между электродами ( $h \sim 3$  см) было, по-видимому, недостаточно для развития шнура дуги.

В ставшей недавно доступной работе [4] исследовано поведение дуги между угольным катодом и расплавом металла при токах 50–250 А.

Обнаружено, что при токах разряда больших 100 А форма разряда качественно близка к наблюдавшейся в описанных выше экспериментах (см. п. 2 данной работы). В [4] нестационарное поведение канала разряда связывается с большими пульсациями тока и напряжения и трактуется как неустойчивость разряда в области токов больших 100 А. Проанализированы возможные физические механизмы, вызывающие неустойчивость разряда. К сожалению, в [4] отсутствуют иллюстрации формы разряда при токах меньших 100 А. Согласно интегральным графикам работы [4] разряд при токах меньших 100 А должен быть устойчив (колебания тока и напряжения малы). Этот вывод согласуется с описанными выше результатами. Однако из [4] нельзя заключить, является ли единый дуговой канал характерной формой устойчивой дуги при токах меньших 100 А. Результаты, описанные выше, свидетельствуют о том, что это, по-видимому, не так, и что в устойчивом в смысле [4] режиме разряда единый канал дуги отсутствует. Вопрос о том, какие физические механизмы ответственны за пульсации параметров дуги и формы разряда при токах меньших 100 А, остается открытым.

**Заключение.** В результате проведенных экспериментов проанализирована форма (яркостная структура) необдуваемого дугового разряда в воздухе при токе меньше 100 А и зависимость ее от материала электродов.

Установлено, что форма разряда в качественном отношении слабо зависит от материала электродов. Существенное изменение формы разряда отмечено только в тех опытах, в которых использовался катод с подачей к поверхности электрода легкоионизирующей добавки.

Установлено, что пространственная форма разряда имеет нестационарный характер, причем светящиеся области вблизи электродов – “хвосты” – перемещаются вместе с яркими приэлектродными областями (пятнами).

Форма разряда при горизонтальном расположении электродов гораздо менее изменчива, чем при вертикальном.

Во всем диапазоне исследованных параметров, условий эксперимента и материалов электродов единого однородного дугового шнура между электродами не обнаружено. Возможно, что условия возникновения дугового шнура связаны с увеличением тока разряда и расстояния между электродами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герман В.О., Козлов П.В., Любимов Г.А. Экспериментальное исследование взаимодействия электрической дуги с потоком газа // Изв. РАН. МЖГ. 2005. № 4. С. 269–179.
2. Герман В.О., Кукота Ю.П., Любимов Г.А. Стабилизация диффузной привязки разряда на охлаждаемых электродах с транспирационным вводом активирующих присадок // Генерация потоков электродуговой плазмы. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1987. С. 271–287.
3. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 370 с.
4. Karasik M. Driven Motion and Instability of an Atmospheric Pressure Arc // Ph.D. Thesis, Princeton University (January 2000), available as PPPL#3398 (1999) at [http://www.pppl.gov/pub\\_report](http://www.pppl.gov/pub_report).