

УДК 533.6.011.35:537.527

© 2005 г. В. О. GERMAN, П. В. КОЗЛОВ, Г. А. ЛЮБИМОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ С ПОТОКОМ ГАЗА

Сообщаются результаты исследования формы, обдуваемой потоком воздуха, азота и аргона, электрической дуги с током, меньшим 100 А, со скоростью обдувающего дугу потока от нуля до 20 м/с, при расстоянии между электродами, меньшем 20 мм. Изучена качественная зависимость формы дуги от сорта газа, скорости обдува и расстояния между электродами. Показано, что обдуваемая дуга, горящая в канале с изоляционными стенками, гораздо более устойчива, чем дуга тех же параметров, горящая в открытом пространстве.

Ключевые слова: обдуваемая электрическая дуга, диффузный разряд, атмосферное давление, дозвуковой поток.

Исследование электрической дуги, обдуваемой потоком газа, представляет интерес для выяснения физических процессов, определяющих протекание тока в сложных условиях. Полученные при этом данные могут оказать существенную помощь при решении ряда технических задач. Например, при проектировании плазматронов, выключателей больших токов и др. В последние годы оживился интерес к свойствам дуг в связи с возможным использованием дугового разряда для подвода энергии к потоку газа перед летящим телом с целью снижения его сопротивления [1–3].

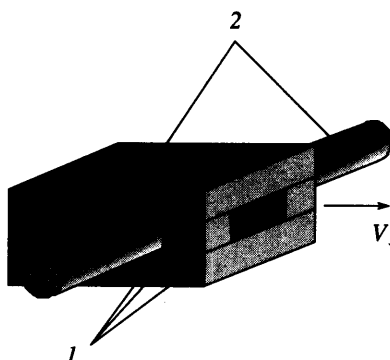
Несмотря на то что обдуваемые электрические дуги исследуются много десятилетий, полной ясности в вопросе взаимодействия дуги с потоком и в характере протекания тока в дуге в зависимости от ее параметров и окружающей среды до сих пор нет. В частности, экспериментальные данные, относящиеся к дугам, горящим в атмосфере воздуха при низком давлении (~100 ммНг) и больших числах Маха обдувающего дугу потока [4–6], показывают, что картина протекания тока может иметь неожиданный и экзотический характер.

В настоящей работе излагаются результаты экспериментального исследования формы дугового разряда при атмосферном давлении в атмосфере воздуха, азота и аргона, обдуваемого потоком того же газа при скоростях обдува до 20 м/с и токах дуги до 100 А.

1. Экспериментальное оборудование и методы измерений. Для того чтобы обеспечить относительно равномерный и удобно регулируемый обдув дуги, стабилизацию дуги на поверхности электродов, стандартизацию условий прогрева газа в обдуваемом потоке за счет излучения и теплопроводности от дуги и т.д., исследовалась дуга, горящая между электродами, помещенными в прямоугольный канал с изоляционными стенками (фиг. 1).

Основная часть экспериментов была проведена с каналами, изоляционные стенки которых изготовлены из карбонитрида и алюмонитрида бора, а электроды – из силицированного графита.

В ряде экспериментов для наблюдения картины разряда внутри канала использованы каналы с “окнами”. Размер окна поперек потока определялся межэлектродным промежутком, а вдоль потока захватывал область на 1–2 мм выше по потоку от края электрода, всю разрядную поверхность электрода и участок проточной части канала



Фиг. 1. Схема канала с электродами: 1 – изоляционные стенки, 2 – электроды

за электродом вниз по потоку. Из конструктивных соображений у среза канала в межэлектродной стенке была необходима прочностная перемычка протяженностью 2–3 мм вдоль потока. Все окно герметично перекрывалось сменным кварцевым стеклом.

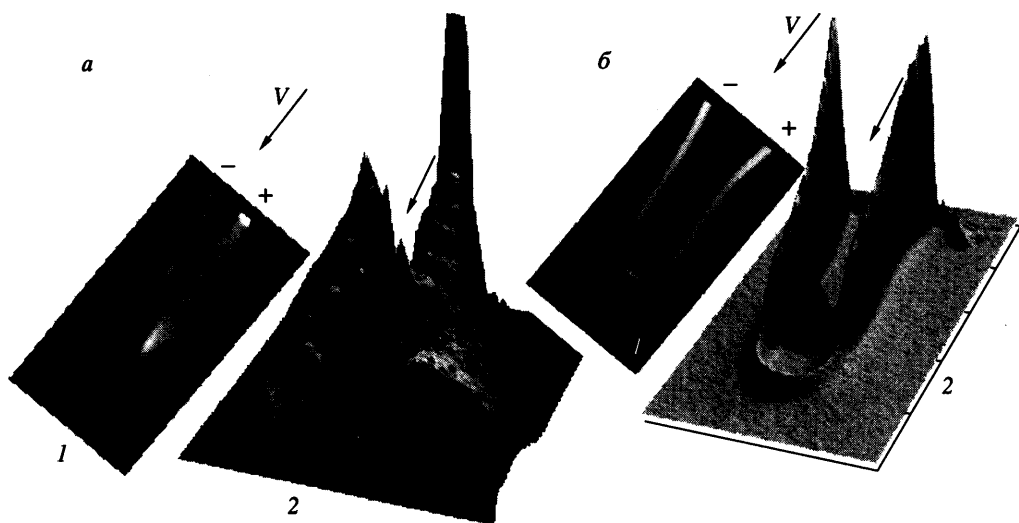
Питание дуги осуществлялось генератором постоянного напряжения ($U < 800$ В) через систему реостатов. Инициация дугового разряда осуществлялась с помощью высоковольтного блока ($U \sim 35\text{--}40$ кВ) после подачи на межэлектродный промежуток “дежурного” напряжения генератора. Время установления дуги после пробоя межэлектродного промежутка составляло $\sim 10^{-3}$ с.

Регистрация тока и напряжения проводилась цифровым запоминающим осциллографом АСК-3107 с полосой пропускания 100 МГц. В большинстве проведенных экспериментов время выборки составляло 10 мкс, это позволяло регистрировать ток и напряжение в течение 2.62 с.

Регистрация поведения разряда при изменении его параметров и картины протекания тока в дуге основана на регистрации светимости газа в различных областях дуги с помощью скоростной видеокамеры Мосат 4000. Максимальная скорость съемки составляет 4000 кадров в секунду, а минимальная длительность экспозиции – $2.06 \cdot 10^{-6}$ с. Запуск камеры можно проводить либо импульсом от внешнего источника, либо от заранее установленного уровня света в выбранной области кадра с возможностью записи кадров до момента начала процесса.

Для регистрации и первичной обработки полученных изображений использовано программное обеспечение, поставляемое с камерой Мосат 4000. Графики интенсивности светимости потока в любом из его сечений и “объемное” изображение светимости потока обработаны с помощью программного пакета “Surfer”.

2. Обсуждение результатов экспериментов. Эксперименты проводились в следующем режиме. В канале выбранной геометрии (заданы размеры электродов, расстояние между ними и расстояния электродной пары от входа и выхода канала) устанавливался определенный расход обдувающего дугу газа и подавалось напряжение холостого хода генератора ($U_{xx} = 400\text{--}600$ В для опытов на воздухе и азоте или 160–240 В для опытов на аргоне) на электродную пару при внешних нагрузочных сопротивлениях $R = 1\text{--}20$ Ом. После этого включался высоковольтный осциллятор, который ионизовал промежуток между электродами, что приводило к пробое межэлектродного промежутка и возникновению тока разряда. За время $t_1 < 10^{-3}$ с ток выходил на стационарное значение, зависящее от сопротивления внешней цепи и напряжения холостого хода генератора. Для оценок, по-видимому, можно принять, что время перехода разряда из одного режима в другой при изменении параметров цепи также имеет порядок t_1 .



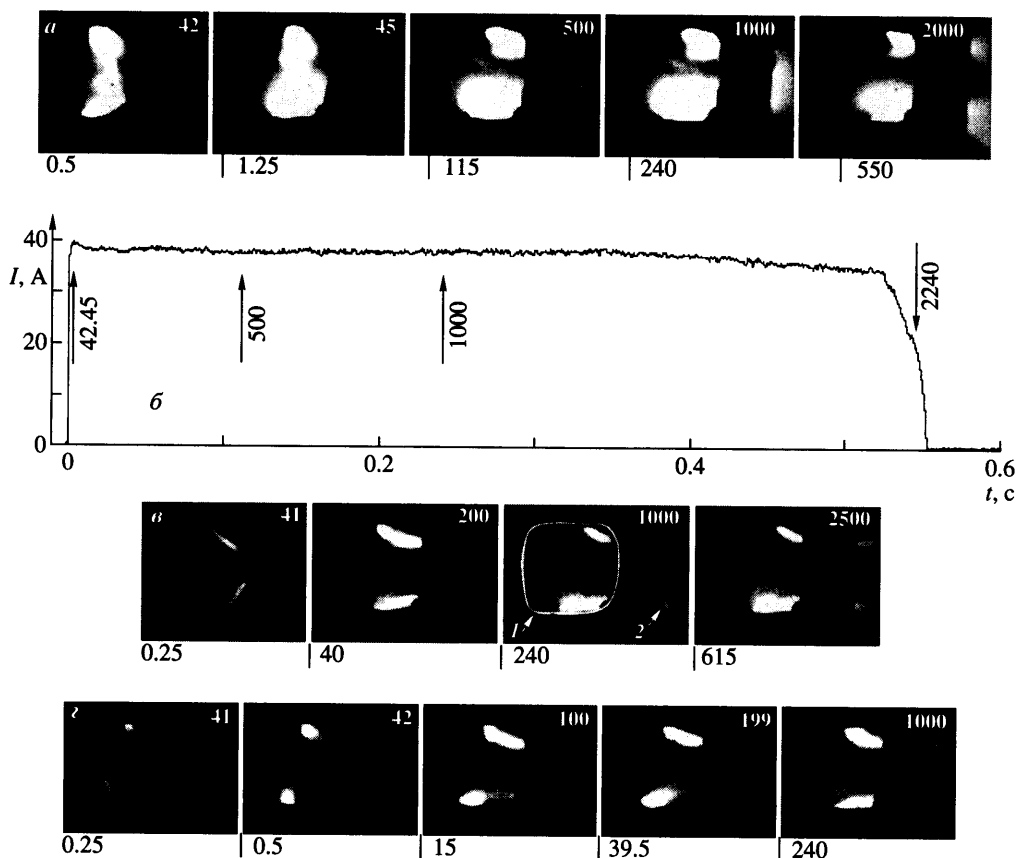
Фиг. 2. Картины разряда, обдуваемого воздухом при $I \sim 70$ А, $V = 3.5$ м/с (а) и аргоном при $I \sim 20$ А, $V = 5.2$ м/с (б): 1 – видеограмма свечения разряда, 2 – объемное изображение светимости разряда

При неизменном токе делалось несколько видеозаписей картины разряда и измерений его параметров. После этого, изменяя напряжения холостого хода генератора плавно уменьшался ток разряда. Характерное время этих изменений $t_2 \sim 0.2\text{--}0.5$ с. В течение периода спада тока также проводились видеозапись и измерения параметров разряда.

При обработке использованы только те эксперименты, в которых ток разряда $I > 10$ А и скорость снижения тока $dl/dt < 100$ А/с. При этом характерное время изменения тока на величину ~ 1 А будет $t_3 > 10^{-2}$ с. Отсюда следует, что в течение времени $t_3 < 10^{-2}$ с ток дуги изменяется на величину, меньшую, чем 1 А. Такое изменение тока в рассматриваемых дугах ($I \sim 10\text{--}100$ А), по-видимому, слабо влияет на остальные параметры дуги, поэтому на временном интервале $t < 10^{-2}$ с параметры исследуемой дуги будут близки к параметрам стационарной дуги при токе разряда, равному току в начале рассматриваемого временного интервала. Так как при фиксации картины разряда камерой Мосам 4000 (4000 кадров/с) время между двумя кадрами $2.5 \cdot 10^{-4}$ с, то при принятых условиях одной и той же величины тока разряда соответствует порядка ста последовательных кадров видеозаписи.

Можно предположить, что интенсивность светимости газа связана с его температурой. Тогда более яркие области на видеограммах соответствуют областям с более высокой температурой газа, а следовательно, и с более высокой его электропроводностью. Таким образом, видеограмма представляет собой в определенном смысле картину распределения плотностей тока в газе, поэтому при обсуждении результатов, связанных с анализом картины разряда, кадры видеозаписи будут трактоваться на языке распределения тока (имея в виду, конечно, что электрическое поле в разряде также распределено неоднородным образом). По “объемному” изображению светимости потока газа можно судить о возможном распределении тока в разряде. На фиг. 2 представлен пример такого представления изображений.

При запуске видеокамеры от заранее установленного уровня света в выбранной области кадра с возможностью как записи кадров до момента начала процесса, так и запуска внешних устройств синхроимпульсом с камеры, удалось привязать отдельные кадры видеограммы к соответствующим им точкам (зонам) на осциллограммах тока и



Фиг. 3. Влияние скорости обдува воздухом V на развитие разряда внутри канала; ток разряда $I \approx 37$ А, расстояние между электродами $h = 8$ мм, $V = 5.4; 9.4; 12.7$ м/с ($a, в, г$). Числа на кадрах – их номер; числа под кадром – время кадра в мс, отсчитываемое от начала видеополосы, 1 – окно, 2 – срез канала, $б$ – осциллограмма тока I для случая a . Стрелками отмечено время кадра данного номера

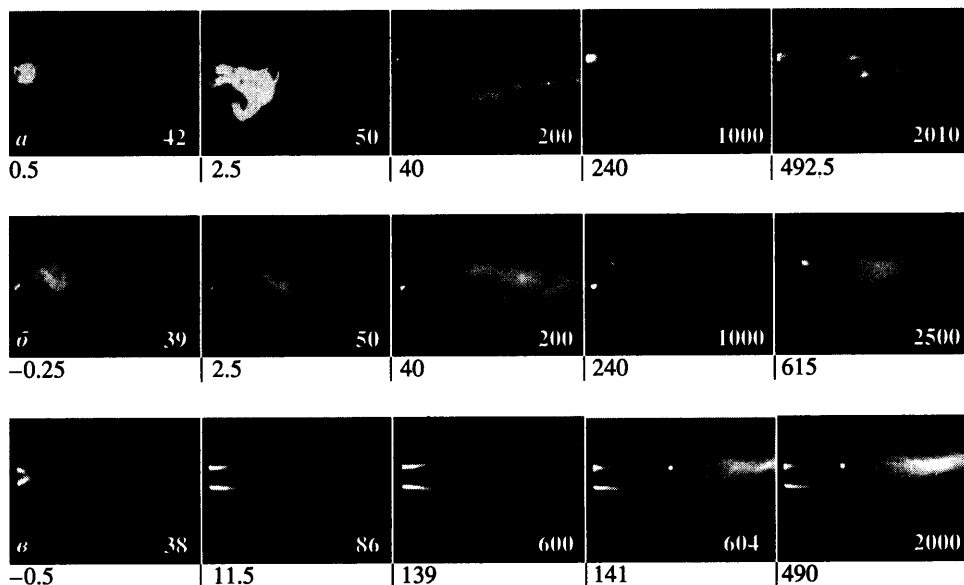
напряжения. В качестве запускающего был использован световой импульс, возникающий при пробое межэлектродного промежутка высоковольтным осциллятором.

Описанная методика проведения эксперимента позволяет в каждом эксперименте получать зависимости исследуемых параметров от тока дуги, сводя к минимуму влияние случайных факторов, связанных с неидентичностью конструкции канала и неточностью в задании скорости обдува.

Опишем полученные данные отдельно для экспериментов с обдувом различными газами.

В случае воздуха при пробое межэлектродного промежутка высоковольтным осциллятором случайным образом возникает искровой разряд вдоль одной из межэлектродных изоляционных стенок. В результате в межэлектродном промежутке возникает светящееся облако ионизованного газа. Это облако перемещается в межэлектродном промежутке, постепенно заполняя его.

Форма этого облака и его яркостная структура зависят от скорости потока и от случайных факторов, связанных с пробоем межэлектродного промежутка. Картина раз-



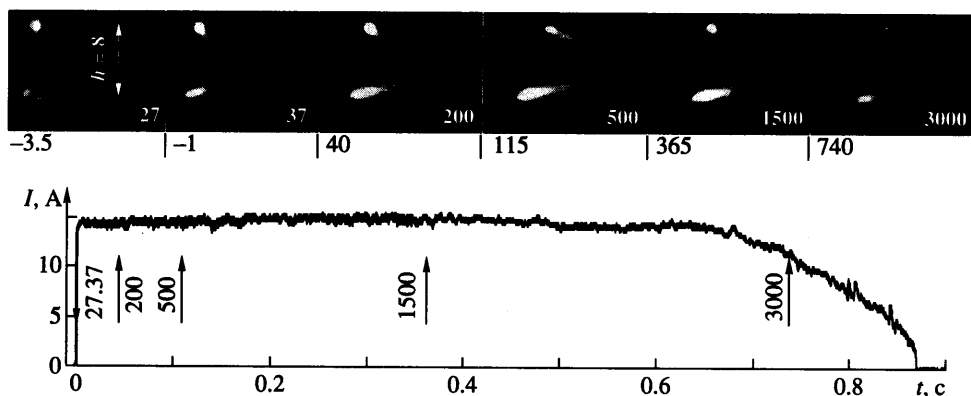
Фиг. 4. Влияние величины тока на картину развития обдуваемого воздухом разряда вне канала: $I = 30$ А, $V = 5$ м/с, $h = 12$ мм (а), $I = 45$ А, $V = 10$ м/с, $h = 12$ мм (б), $I = 70$ А, $V = 12$ м/с, $h = 8$ мм (в). Численные обозначения те же, что на фиг. 3

ряда устанавливается за время $\sim 10^{-3}$ с. Эти особенности развития разряда иллюстрируются начальными кадрами (41–45) видеogramм (фиг. 3.).

По мере развития разряда в процессе выхода на стационарный режим вблизи электродов образуются ярко светящиеся области, вытянутые вдоль потока (элементы дуговых шнуров), заметно изменяется светимость токопроводящей области разряда, а под действием газодинамических и электромагнитных сил происходит ее искривление. Наконец, наступает момент, когда разряд выходит за пределы среза канала (кадры 1000 на фиг. 3а, в, г). При этом вид и поведение анодного и катодного опорных пятен различны. Анодное пятно более яркое, занимает на разрядной поверхности большую площадь и расположено, как правило, в центре электрода. Катодное пятно менее яркое и располагается в “тене” зоне – на границе между нижним по потоку краем электрода и изолятором, а иногда и “прячется” в зазор между ними.

Картина разряда вне канала представлена на фиг. 4.

В процессе формирования стационарного разряда ($t > (1-2) \cdot 10^{-3}$ с), устанавливается картина разряда, качественно не зависящая от величины тока. При этом от опорных пятен отходят шнуры разряда (яркие узкие области), которые почти прижаты к изоляционным вставкам на электродных стенках канала. В зависимости от величины тока, скорости обдуваемого газа и межэлектродного промежутка эти шнуры имеют разную протяженность (фиг. 4, б и в). Иногда протяженность этих горизонтальных шнуров разряда за срезом значительно (в 2–3 раза) превышает размер межэлектродного промежутка, а поперечное сечение каждого из них у среза составляет 1–1.5 мм. Как правило, анодный ствол имеет более высокую интенсивность свечения и большую длину (фиг. 4). Эти яркие конусовидные шнуры “погружены” в менее яркую оболочку, которая представляет собой область нагретого шнурами обдуваемого газа. Нагретые вблизи катодного и анодного шнура области смыкаются на некотором расстоянии от среза канала, образуя единый нагретый “шлейф”. У самого среза канала четко просматривается совершенно темная (зарегистрированная интенсивность све-



Фиг. 5. Развитие разряда в аргоне внутри канала $I \sim 15$ А, $h = 8$ мм, $V = 3.57$ м/с. Численные обозначения те же, что на фиг. 3

чения на два порядка ниже интенсивности свечения ствола) клиновидная зона, простирающаяся иногда на два-три калибра канала (фиг. 4). Вершина этого “клина” располагается в зоне смешения “оболочек” шнуров. Описанная картина поведения сильноточного разряда вне канала дает основания предположить, что в нагретом горизонтальными шнурами облаке (шлейфе) созданы условия для протекания тока, плотность которого намного ниже, чем в шнурах. Эта картина разряда качественно отличается от той, которую принято отождествлять с дуговым разрядом, характеризующимся наличием между электродами яркого и тонкого дугового шнура. Описанная форма разряда аналогична той, которая наблюдалась ранее в других условиях [4–6], поэтому, следуя авторам этих работ, назовем наблюдаемый разряд диффузно-дуговым.

Наблюдавшаяся диффузионно-дуговая форма разряда весьма устойчива в исследованном диапазоне параметров. Среди полутора сотен длительных экспериментов только в двух случаях удалось зафиксировать шунтирование шлейфа разряда (кадр 604 на фиг. 4, в). Однако после шунтирования форма разряда быстро восстанавливалась. Замкнутый дуговой шнур удалось наблюдать только 1 раз при уменьшении тока вблизи точки погасания разряда.

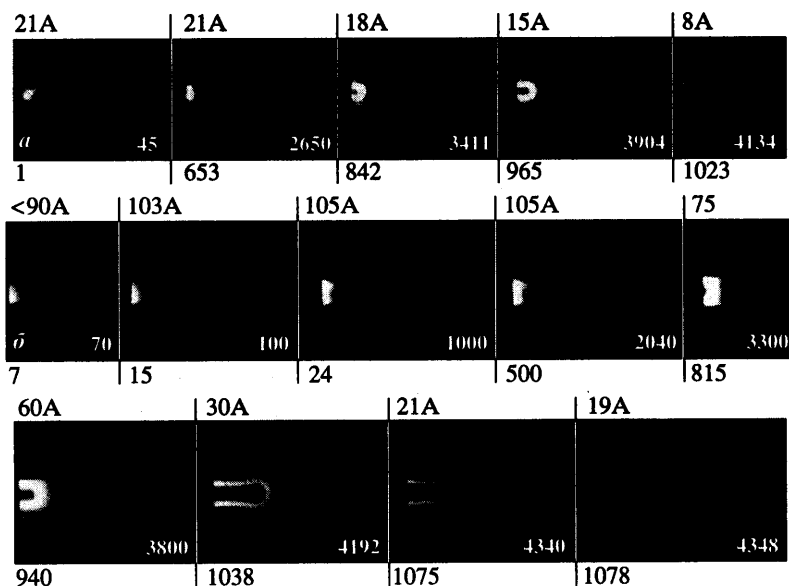
Опыт показал, что качественная картина разряда не изменяется при изменении межэлектродного расстояния, тока дуги и скорости обдува (фиг. 4а–в). Однако при увеличении тока растут шлейф дуги, протяженность приэлектродных шнуров и яркость шлейфа.

Наблюдаемая картина разряда связана с тем, что в момент пробоя и развития разряда газ в межэлектродной зоне разряда разогревается и ионизируется. При этом газ расширяется и ускоряется. Измеренная скорость частиц в струе, истекающей из канала, вблизи среза сопла составляет величину порядка 20 м/с (при скорости на входе в канал ~ 5 м/с). Эта скорость, по-видимому, близка к скорости газа в рассматриваемой точке пространства. Таким образом, ускорение газа в зоне разряда незначительно и, следовательно, подводимая к разряду мощность идет в основном на подогрев и ионизацию обтекающего газа.

Характер горения разряда в азоте несильно отличается в качественном отношении от горения в воздухе.

Картина разряда в аргоне качественно отличается от картин разряда в воздухе и азоте. Прежде всего при развитии разряда в канале всегда возникает ярко светящийся шнур, соединяющий катод и анод (фиг. 5, кадр 27).

На стационарном режиме дуговой шнур (ярко светящийся токовый канал) наблюдался во всем исследованном диапазоне токов ($I \sim 10$ –100 А), межэлектродных рас-



Фиг. 6. Видеограммы разряда в аргоне вне канала: $h = 8$ мм, $V = 5.3$ м/с (а), $h = 18$ мм, $V = 1.6$ м/с (б). Цифры над кадрами обозначают ток, соответствующий данному кадру. Обозначения те же, что на фиг. 3

стояний ($h \sim 8$ – 18 мм) и скоростей обдува дуги ($V \sim 1.6$ – 6.8 м/с). Форма этого шнура всегда имела вид петли, направленной в сторону выхода из канала. Величина петли (ее протяженность) и интенсивность ее свечения зависят от тока дуги, скорости обдува и межэлектродного расстояния. Дуговой шнур окружен нагретым и слабо светящимся газом, который сносится обдуваемым потоком и виден на видеограммах в виде “шлейфа” дугового канала. Таким образом, в аргоне не удалось получить диффузионно-дуговой режим разряда в том виде, как он выглядит в воздухе и азоте.

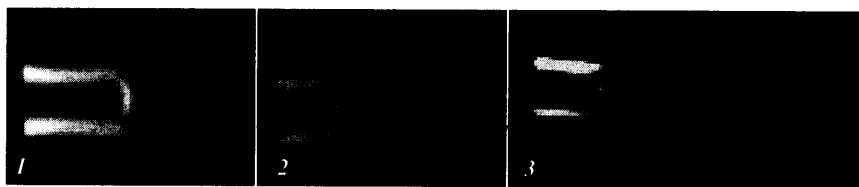
В качестве иллюстрации описанной картины разряда приведем фиг. 6, на которой представлены кадры видеограмм двух разрядов, снятые вне канала. На первых кадрах (45, 70) видно, что во время развития разряда внутри канала ($t < 10^{-3}$ с) на его срезе наблюдается только небольшое светящееся облако нагретого газа – шлейф дуги. Картина разряда вне канала зависит от тока разряда, межэлектродного промежутка и скорости обдува дуги. При больших токах разряда дуговой разряд горит внутри канала – на срезе канала наблюдается только светящийся шлейф (кадры 653, 2650 фиг. 6, а и кадры 100, 1000, 2040 на фиг. 6, б). При более низких токах ($I < 18$ А для условий фиг. 6, а и $I < 70$ А для условий фиг. 6, б) дуга прогибается настолько, что ее конец (замыкающая часть) выходит за срез канала, т.е. в этих условиях прогиб дуги становится больше 5 мм (расстояния от электродов до среза канала). Ток разряда I_* , при котором дуга выходит за срез канала, зависит от межэлектродного расстояния

$$h, \text{ мм} = 8 \ 14 \ 18$$

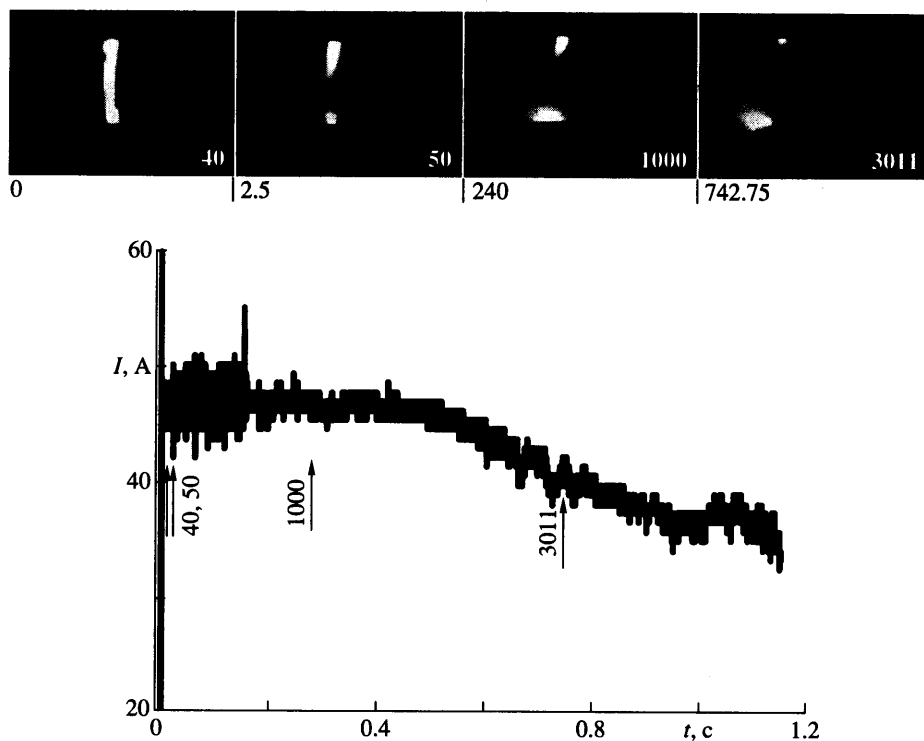
$$I_*, \text{ А} = 18 \ 25 \ 70$$

Величина I_* зависит, по-видимому, и от скорости обдува дуги, но выявить эту зависимость не удалось в связи с ограниченным числом экспериментов.

При погасании разряда происходит уменьшение интенсивности свечения и разрыв дугового канала в его конце (кадр 4348 видеограммы фиг. 6, б). В опытах на аргоне



Фиг. 7. Примеры шунтирования дуги в аргоне: $I = 30$ А (кадр 1), 100 А (кадр 2), 20 А (кадр 3)

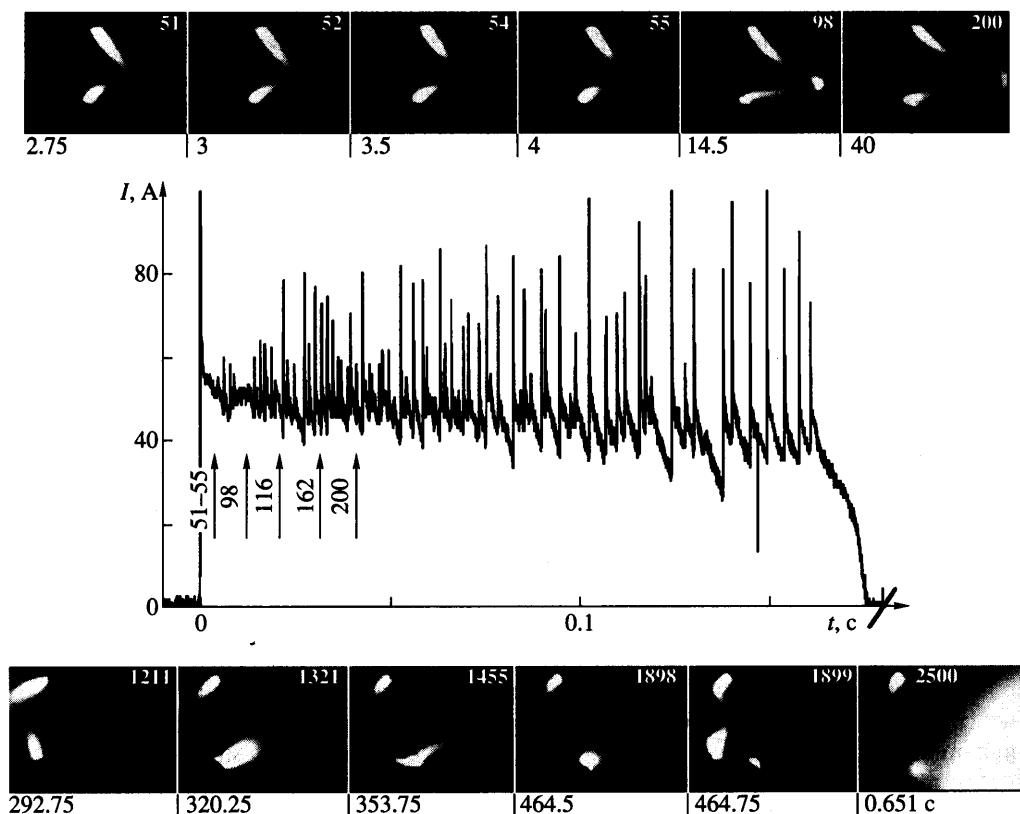


Фиг. 8. Разряд между электродами в свободном пространстве без обдува ($V = 0$ м/с). Численные обозначения те же, что для фиг. 3

довольно часто наблюдается шунтирование дуги в основном при малых токах разряда, когда дуга сильно вытянута (фиг. 7).

Для выяснения характера влияния стенок канала на форму горения дуги были проведены опыты с дугой, горящей в свободной атмосфере. Характерные видеogramмы этих опытов представлены на фиг. 8, 9.

При отсутствии обдува (фиг. 8) дуга в свободном пространстве горит устойчиво, осцилляции тока после выхода на режим практически отсутствуют, характерной особенностью этого разряда является отсутствие сплошного дугового шнура, соединяющего электроды. Форма разряда представляется двумя ярко светящимися областями вблизи электродов и гораздо менее светящейся областью между ними. Естественно предположить, что температура газа, а следовательно, его электропровод-



Фиг. 9. Обдуваемый разряд между электродами в свободном пространстве ($V \neq 0$ м/с). Численные обозначения те же, что для фиг. 3

ность и плотность тока в слабо светящейся области, существенно ниже, чем в ярко светящихся областях вблизи электродов.

Таким образом, в свободной атмосферной дуге при токах $I < 100$ А единый дуговой шнур между электродами отсутствует и в этом смысле этот разряд естественно назвать диффузно-дуговым. Существование изученной в данном исследовании, а также в иных условиях в [4–6], диффузно-дуговой формы разряда ставит вопрос о том, какие условия выделяют эту форму разряда по отношению к типичному дуговому разряду в воздухе, характеризующемуся дуговым шнуром, соединяющим электроды. Весьма вероятно, что решающую роль в этом играют расстояние между электродами, их размер и внешние условия (наличие ограничивающих область разряда стенок, устройство внешней электрической цепи и т.д.), так как эти параметры влияют на структуру области ионизации газа в окрестности разряда.

Обдуваемый дуговой разряд в открытом пространстве крайне неустойчив (фиг. 9). Его форма непрерывно меняется, стационарная форма разряда отсутствует. На осциллограмме тока видны высокочастотные пульсации большой амплитуды (ср. с осциллограммой на фиг. 8). В некоторые моменты времени между электродами наблюдаются дуговые шнуры экзотической формы, в другие моменты форма разряда аналогична диффузно-дуговой.

Сравнение видеogramм фиг. 9 и 4 убеждает в том, что стенки канала, в котором организуется разряд, оказывают в исследованных условиях существенное стабили-

зирующее влияние на разряд. Это влияние связано, по-видимому, с тем, что в канале обдувающий дугу поток имеет более регулярную газодинамическую структуру, так как в нем отсутствуют возмущения, связанные с взаимодействием обдувающей струи газа с элементами крепления электродов в опытах в открытом пространстве. Кроме того, стенки канала препятствуют выходу излучения из приразрядной области и тем самым способствуют ионизации газа в набегающем на дугу потоке.

В проведенном исследовании не удалось определить предельные скорости обдувающего потока, при которых разряд заданного тока “обрывается”, и зависимость этих скоростей от условий разряда. Тем не менее интуитивные представления и общие соображения заставляют думать, что в исследованном диапазоне токов предельные скорости будут не очень велики.

Описанные выше результаты позволяют сделать вывод о том, что подвод энергии к потоку газа нецелесообразно проводить с помощью открытой системы электродов. Эффективность такого подвода энергии будет невелика из-за неустойчивости горения обдуваемой дуги в открытом пространстве, небольших значений предельных скоростей обдува, сопротивления подводящих систем удержания электродов и подачи тока к ним. Возможный путь использования рассматриваемого разряда для целей локального подвода энергии к потоку состоит в использовании проточного канала, в который с помощью воздухозаборника отбирается необходимая трубка тока. Газ, забранный в воздухозаборник, должен быть заторможен в диффузоре до скоростей ниже предельных для разряда заданной мощности. После подвода мощности к потоку газ должен быть ускорен в сопловом участке канала до скоростей внешнего потока. Подбирая величину подведенной мощности и профиль проточной части канала, можно, по-видимому, добиться, чтобы поток на выходе из канала обладал заданными параметрами и сопротивление всего устройства вместе с крепежными системами стало минимальным.

При разработке подобных устройств необходимо иметь в виду, что электроды, работающие в дуговом режиме, быстро эродируют под воздействием катодных и анодных пятен, поэтому при создании рассматриваемых систем с большим ресурсом работы необходимо будет разрабатывать специальные электродные блоки. В качестве одного из возможных путей решения электродной проблемы можно рекомендовать использование долгоживущих электродов, описанных в [7].

Заключение. Качественный вид разряда, горящего между двумя электродами в газе при комнатной температуре и атмосферном давлении, зависит от сорта газа, скорости обдува разряда, а также от “внешних” условий. В данной работе исследованы два типа внешних условий – разряд в свободном пространстве и разряд в пространстве, ограниченном стенками канала.

Независимо от скорости обдува разряда возможны две качественно различающиеся формы разряда. Разряд в виде яркого шнура между электродами, который принято называть дуговым, реализуется в аргоне. При разряде в воздухе и азоте единый дуговой шнур между электродами не образуется – вблизи электродов образуются элементы шнура, которые разделены областью низкого свечения и, следовательно, более низкой температуры. Естественнo предположить, что в этой области плотности тока существенно ниже, чем в элементах шнура вблизи электродов. Эта форма разряда названа по аналогии с [4–6] диффузно-дуговой. Обдув разряда приводит к вытягиванию его вдоль потока, но не меняет качественной картины разряда.

Установлено, что обдуваемый разряд в свободном пространстве крайне неустойчив: наблюдаются существенные высокочастотные пульсации тока и напряжения; отсутствует стационарная форма разряда, она претерпевает существенные высокочастотные изменения. Обдуваемый разряд, горящий в канале, устойчив. Таким образом, стенки канала стабилизируют разряд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chernyi G.G.* Some recent results in aerodynamic applications of flows with localized energy addition // AIAA Paper. № 99-4819, 19 p.
2. *Георгиевский П.Ю., Левин В.А.* Сверхзвуковое обтекание тел при наличии внешних источников тепловыделения // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 8. С. 684–687.
3. *Левин В.А., Громов В.Г., Афонина Н.Е.* Численное исследование влияния локального энергоподвода на аэродинамическое сопротивление и теплообмен сферического затупления в сверхзвуковом потоке воздуха // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 5. С. 171–179.
4. *Алферов В.И., Бушмин А.С.* Электрический разряд в сверхзвуковом потоке воздуха // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. Вып. 6. С. 1775–1779.
5. *Алферов В.И., Бушмин А.С., Калачев Б.В.* Экспериментальное исследование свойств электрического разряда в потоке воздуха // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. Вып. 5. С. 1281–1287.
6. *Алферов В.И.* Исследование структуры электрического разряда большой мощности в высокоскоростном потоке воздуха // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 6. С. 163–175.
7. *Герман В.О., Куkota 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.

Москва

Поступила в редакцию
10.III.2005