

04;12

Исследование влияния катодной и анодной струй на свойства сильноточной электрической дуги

© А.А. Богомаз, А.В. Будин, В.А. Коликов, М.Э. Пинчук, А.А. Позубенков, Ф.Г. Рутберг

Институт проблем электрофизики РАН,
191065 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: rutberg@iperas.spb.su

(Поступило в Редакцию 8 мая 2001 г.)

Исследовался ряд явлений, связанных с образованием электродных струй в разрядах с силой тока $10^5 - 10^6$ А, при скорости его нарастания 10^{10} А/с в водороде и воздухе при начальном давлении 0.1–4.0 МПа и длине разрядного промежутка 5–40 мм. После вторичного пробоя струи наблюдаются сквозь полупрозрачный канал разряда, расширяющийся со скоростью $4 - 7 \cdot 10^2$ м/с. При взаимодействии струй с окружающим газом и противоположным электродом теневым методом обнаружено образование ударных волн. Давление плазмы паров металла вблизи торца вольфрамового катода через $70 \mu\text{s}$ после инициирования разряда составило 177 МПа. Величина яркостной температуры при этом $59 \cdot 10^3$ К, средний заряд ионов $\bar{m} = 3.1$, а концентрация паров металла $n = 5.3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. У торца анода через $90 \mu\text{s}$ $\bar{m} = 2.6$, $n = 7.4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. На основании опытных данных обсуждаются возможные причины anomalно высоких падений напряжения вблизи электродов, суммарная величина которых составляет ~ 1 кВ.

Введение

В ряде мощных электрофизических устройств, таких как электроразрядные ускорители, коммутаторы тока, импульсные генераторы высокоэнтальпийной плазмы, используется электрическая дуга силой тока ≥ 1 МА. При этом в канале дуги развивается мощность $10^8 - 10^{10}$ Вт, значительная часть которой приходится на электроды. Это в свою очередь приводит к образованию электродных струй. Катодные и анодные струи, образующиеся при горении дуг с силой тока до нескольких десятков килоампер, известны давно [1,2] и довольно подробно исследованы. Определены скорости катодной и анодной струй температура и концентрация заряженных частиц у основания струй, расход электрода и т.д. Некоторые результаты, а также обзоры проведенных исследований приведены в [3–8]. В ряде работ исследовано влияние взаимодействия катодной и анодной струй друг с другом и противоположным электродом, например [9–11]. Амплитуда разрядного тока в этих исследованиях обычно не превышает 10 кА. В дугах мегаамперного диапазона при значительных энерговыкладах и высоких давлениях рабочего газа электродные струи оказывают большое влияние как на свойства самой дуги, так и на ее теплообмен с окружающим газом. Эрозия электродов при этом достигает $10^{-3} - 10^{-2}$ г/с [12,13]. Суммарная величина падения напряжения вблизи электродов при амплитуде разрядного тока 60 кА составляет ~ 500 В [14]. Эта величина достигает ~ 1 кВ для дуг мегаамперного диапазона [15–18].

Как отмечается в работе [19], для квазистационарных разрядов с плотностью тока $10^5 - 10^7$ А/см², характерной для приведенных выше условий, возникает разряд со специфическими свойствами. Одним из них является резкий рост падений потенциала у анода и катода, достигающий

нескольких сотен вольт. Объяснение этого явления в настоящее время отсутствует. В данной работе указаны возможные причины anomalно высоких падений напряжений. Исследуется влияние струй квазистационарных дуг мегаамперного диапазона как на ее свойства, так и на теплообмен с окружающим газом, которое, как и сами дуги такого типа, изучено недостаточно.

Разрядная камера и методы диагностики

Первоначальная конструкция разрядной камеры была аналогична конструкции камер мощных электроразрядных ускорителей [20]. При моделировании работы таких ускорителей корпус камеры является анодом. Иницирующая проволочка устанавливалась в узком зазоре между коническим катодом и корпусом камеры. Для получения осесимметричного разряда конструкция камеры была изменена в соответствии с рис. 1.

Изучались сильноточные дуги в водороде и воздухе при начальном давлении 0.1–4.0 МПа и амплитудах раз-

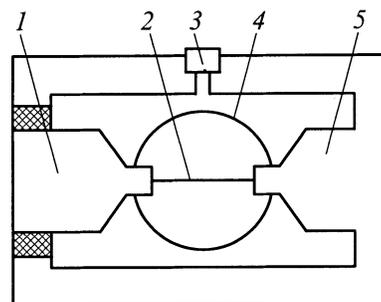


Рис. 1. Диагностическая разрядная камера: 1 — катод, 2 — иницирующая проволочка, 3 — датчик давления, 4 — диагностические окна, 5 — анод.

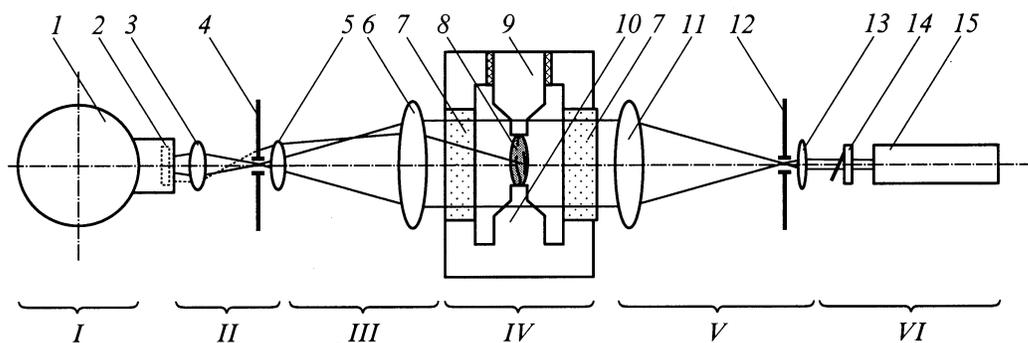


Рис. 2. Схема теневого устройства: I — скоростная фотокамера ЖЛВ-2, II — согласующий объектив, III — приемная часть теневого устройства, IV — разрядная камера, V — коллиматорная часть теневого устройства, VI — источник подсветки; 1 — скоростная фотокамера ЖЛВ-2, 2 — светофильтры, 3 — второй компонент согласующего объектива, 4 — визуализирующая диафрагма, 5 — первый компонент согласующего объектива, 6 — приемный объектив, 7 — диагностические окна, 8 — дуга, 9 — катод, 10 — анод, 11 — коллиматорный объектив, 12 — устройство чистки пучка, 13 — конденсатор, 14 — электродинамический затвор, 15 — аргоновый лазер ЛГН-402.

рядного тока $0.5-5.0 \cdot 10^5$ А со скоростью его нарастания $0.5-1.0 \cdot 10^{10}$ А/с. Расстояние между вольфрамовыми электродами диаметром 6 мм или медными электродами диаметром 10 мм менялось от 5 до 40 мм. Разряд инициировался взрывом медной или стальной проволоочки диаметром 0.15 мм.

Оптические измерения

Теневая съемка дуги производилась по схеме на рис. 2. Собственное излучение дуги ослаблялось с помощью интерференционных фильтров.

Яркостная температура различных участков дуги оценивалась по плотности почернения скоростных фотографий дуги на пленке. Фотография производилась через различные фильтры (рис. 3). За эталон принималась плотность почернения от капиллярного источника Под-

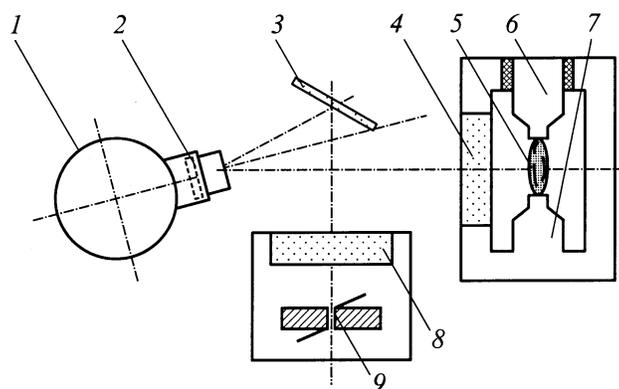


Рис. 3. Схема измерений яркостной температуры: I — скоростная кинокамера ЖЛВ-2; 2 — нейтральные фильтры, широкополосный зеленый фильтр, интерференционный фильтр 5500 Å; 3 — зеркало; 4, 8 — окна; 5 — дуга; 6 — катод; 7 — анод; 9 — эталонный капиллярный источник.

мошенского с яркостной температурой $40 \cdot 10^3$ К. Схема измерений приведена на рис. 3.

Скоростное фотографирование разряда осуществлялось через нейтральные фильтры, оптическая плотность которых менялась от 0.5 до 2. Такое увеличение оптической плотности соответствует уменьшению интенсивности излучения от источника изображения в 100 раз.

Полученные результаты

Осциллограммы тока и напряжения на разрядном промежутке приведены на рис. 4. После взрыва инициирующей проволоочки, еще до вторичного пробоя, видны небольшие конические струйки с анода и катода. Они наблюдаются на фоне слабосветящихся, хаотически разлетающихся частей инициирующей проволоочки и истекают из центральных частей электродов.

После вторичного пробоя через нейтральные фильтры с большой оптической плотностью наблюдается расширение полупрозрачного канала разряда, внутри которого видно образование сначала катодной, а затем анодной струй. Струи истекают с большей части торцов вольфрамовых электродов диаметром 6 мм (рис. 5).

Близкое к симметричному расширению полупрозрачного канала разряда в водороде происходит со скоростью $2-7 \cdot 10^2$ м/с в зависимости от начального давления (рис. 6), что согласуется с ранее полученными нами результатами [17].

Для воздуха при атмосферном давлении скорость расширения $4.1 \cdot 10^2$ м/с при амплитуде разрядного тока 100 кА. Через $70 \mu\text{s}$ при диаметре вольфрамовых электродов 6 мм наблюдается образование мощной катодной струи, связанной с увеличением плотности тока до $5 \cdot 10^5-10^6$ А/см² из-за роста амплитуды разрядного тока с одновременным уменьшением диаметра канала разряда. Уменьшение диаметра струи происходит вследствие роста магнитного давления, обусловленного ростом тока

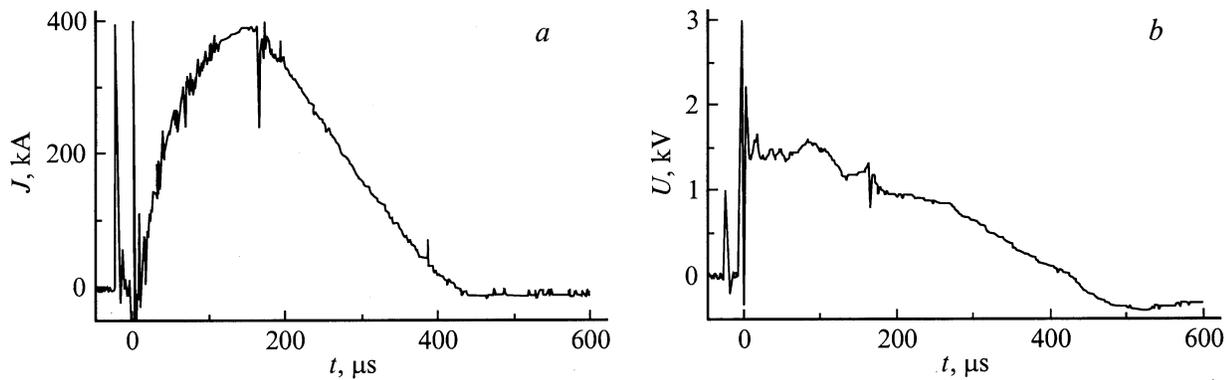


Рис. 4. Осциллограммы тока (*a*) и напряжения (*b*) на разрядном промежутке. Начальное давление водорода 1 МПа, диаметр вольфрамовых электродов 6 мм, *t* — время.

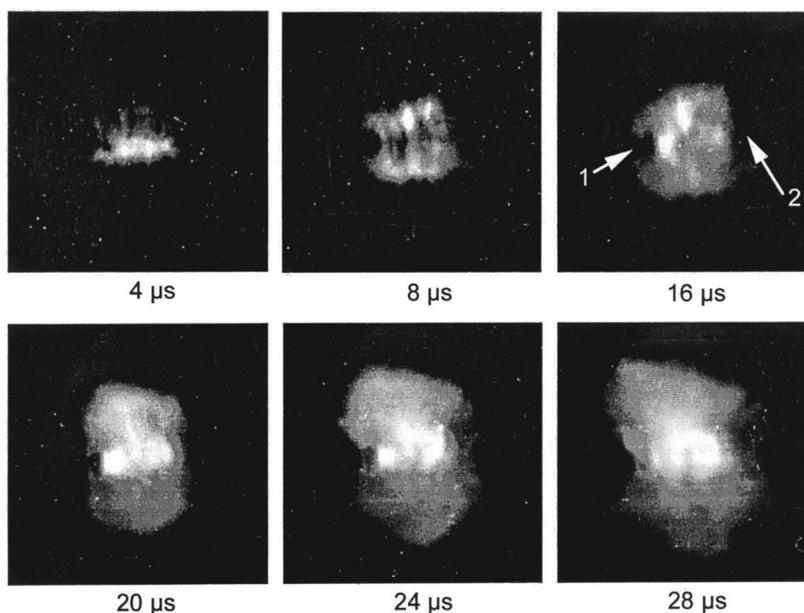


Рис. 5. Образование катодной и анодной струй при расширении полупрозрачного канала разряда в водороде (*1* — катод, *2* — анод).

и к этому моменту времени достигает величины 177 МПа. При этом максимальная яркостная температура в центре струи, у ее основания на расстоянии нескольких миллиметров от катода достигает $59 \cdot 10^3$ К. Яркостная температура у анода достигает максимума к $90 \mu\text{s}$ и составляет $52 \cdot 10^3$ К.

В моменты времени, соответствующие максимуму разрядного тока (рис. 4), плазма становится непрозрачной, свечение с поверхности занимает весь объем и струи не наблюдаются. В более поздние моменты времени в экспериментах с медными электродами диаметром 10 мм виден скачок уплотнения. Он соответствует фронту ударной волны, вызванной взаимодействием мощной катодной струи с окружающим газом. Скачок уплотнения находится далеко за анодом (рис. 7).

Более четко образование катодных и анодных струй прослеживается для разряда в воздухе при атмосферном давлении, диаметре вольфрамовых электродов 6 мм и амплитуде разрядного тока до 100 кА. В этом случае расширение канала разряда и дальнейшее образование струй из-за большей прозрачности разряда можно наблюдать на теневых фоторафиях за более продолжительный период времени (рис. 8).

Мощная анодная струя образуется при разряде в воздухе (вольфрамовые электроды диаметром 6 мм) через $\sim 100 \mu\text{s}$. По мере усиления анодной струи видно перемещение более яркой зоны, связанной с взаимодействием катодной и анодной струй, от анода к катоду. При одинаковой интенсивности анодной и катодной струй светящаяся область образуется на равном расстоянии от

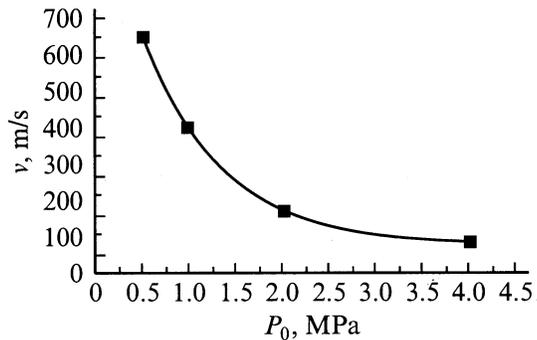


Рис. 6. Зависимость скорости расширения канала разряда в водороде от начального давления. P_0 — начальное давление, v — скорость.

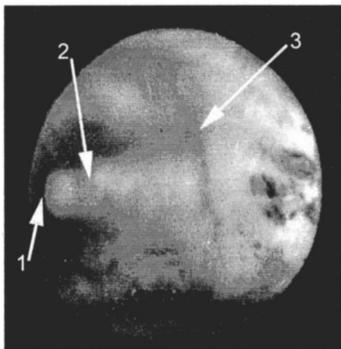


Рис. 7. Разряд в водороде. Образование ударной волны, вызванное струей с катода. 1 — катод, 2 — положение анода, 3 — скачок уплотнения.

анода и катода (рис. 9). При увеличении интенсивности анодной струи ударно сжатая зона смещается к катоду (рис. 10).

Для разряда в водороде наблюдался немонотонный рост напряжения на дуге и установившегося давления в камере при увеличении длины разрядного промежутка (рис. 11). Кроме того, наблюдались скачки напряжения на разрядном промежутке амплитудой около 400 В. Увеличение напряжения на эту величину по времени соответствовало моменту перехода электродного пятна с боковой поверхности на торец электрода.

По мере образования катодной и анодной струй теневым методом наблюдается мощное движение газа, охватывающее весь разрядный объем. При этом направление движения газа у стенок разрядной камеры со скоростью 100–200 м/с противоположно направлению движения в струе.

Обсуждение результатов

Наблюдаются два типа струй, связанных с образованием пятен различного типа в зависимости от длительности прогрева электрода, плотности тока, размеров и материала электрода и т. д.

Струи первого типа связаны с образованием быстро-перемещающихся электродных пятен. Они истекают из центральных областей электродов и образуются уже при взрыве проволоочки. Струи видны в первые микросекунды после взрыва проволоочки еще до вторичного пробоя на фоне слабосветящихся, хаотически разлетающихся ее частей. Струи, которые видны через полупрозрачный канал разряда на рис. 5, относятся к струям первого типа. Причиной их образования может быть слияние единичных струй от быстроперемещающихся пятен [4].

Струи второго типа истекают из общей ванны расплава электрода, которая образуется после его прогрева. Время прогрева зависит от материала электрода, его диаметра и плотности тока. В наших условиях для вольфрамового катода диаметром 6 мм при плотности тока $5 \cdot 10^5$ А/см² время прогрева составляет 70 мкс. По-видимому, возможно существование двух типов струй одновременно. На аноде (рис. 13) узкая и длинная центральная, более темная струя второго типа видна на более ярком фоне широкой конической струи первого типа.

Как указывается в работах [4,5], причиной возникновения струй второго типа на аноде может быть "пинч-эффект". При токах больше 10 кА магнитное давление становится близким к газокинетическому. Это ведет к сжатию места привязки дуги и его дополнительному прогреву.

Центральная струя по своему виду и создавшим ее причинам напоминает "плазменный фокус", возникающий при сжатии токовой оболочки магнитным полем разряда [21].

Определим параметры эрозивной плазмы вблизи торца катода для струи второго типа через 70 мкс после начала разряда на основании измеренных значений яркостной температуры T и давления P . Согласно [22], концентрация паров металла в районе катодного пятна составляет $10^{19} - 10^{20}$ см⁻³, поэтому плазму можно считать находящейся в состоянии локального термического равновесия, а яркостную температуру T — соответствующей равновесной. Значения концентрации паров металла n и среднего заряда ионов \bar{m} определялись из системы уравнений [23]

$$i \left(\bar{m} + \frac{1}{2} \right) = kT \ln \frac{AT^{3/2}}{\bar{m}n},$$

$$P = n(1 + \bar{m})kT, \quad A = 6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} \text{ eV}^{-3/2}. \quad (1)$$

Здесь i — среднее значение потенциала ионизации для вольфрама в точке $\bar{m} + 1/2$. Величина P оценивалась по положению скачка уплотнения согласно формуле, приведенной в [24],

$$P = P_H \left(\frac{l}{0.64d} \right)^2.$$

Здесь P_H — давление газа в невозмущенной среде, l — расстояние от электрода до скачка, d — диаметр электрода. Величина l/d составила 3.6. Величина P_H

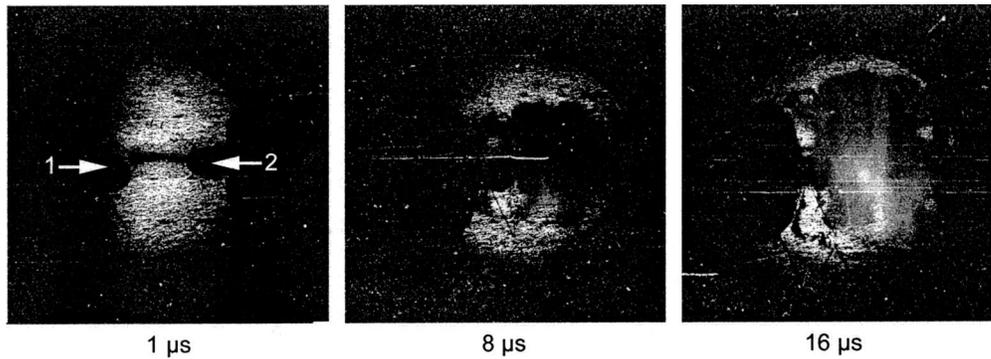


Рис. 8. Теневая фотография расширяющегося разряда в воздухе: 1 — катод, 2 — анод.

определялась датчиком давления, соединенным каналом с разрядной камерой. Показания датчика соответствовали давлению у стенки разрядной камеры. Поэтому значение P_H , равное 4 МПа, соответствующее измеренному значению l , является заниженным. В этом случае $P = 126$ МПа. Эта величина дает нижний предел давления P . Для более точного определения P использовалось предположение о равенстве магнитного и газокINETического давлений у основания струи [4,5]. Основанием для такого предположения является наблюдавшееся сжатие струи. Магнитное давление равно $P[\text{МПа}] = 1.6 \cdot 10^{-10} J^2 / r^2 [\text{А/см}^2]$, $P = 177$ МПа при $J = 3.16 \cdot 10^5$ А и $r = 0.3$ см. Система (1) при $T = 59 \cdot 10^3$ К и $P = 177$ МПа для вольфрамовой плазмы имеет решение $\bar{m} = 3.1$, $n = 5.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Яростная температура у анода к моменту времени $t = 90 \mu\text{s}$ составляет $52 \cdot 10^3$ К, а давление $P = 190$ МПа. Средний заряд иона \bar{m} и концентрация ионов анодной плазмы n , определенные по той же методике, что и у катода, составляют соответственно $\bar{m} = 2.6$, $n = 7.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Более высокие значения n на аноде соответствуют большему эрозионному износу анода, если считать, что как и в работе [2], скорости истечения струй с анода и катода одинаковые. Это соответствует результатам, полученным в работе [12].

Значения \bar{m} и n , определенные у катода и анода по измеренным значениям T и P из соотношений (1), близки к значениям \bar{m} и n , рассчитанным в работе [25] для плазмы паров алюминия, титана и железа. Поэтому для приближенных оценок проводимости и длины пробега излучения по Росселанду используются усредненные результаты этих расчетов.

Для определенных у катода и анода значениях T , \bar{m} и n величина проводимости составляет $\sim 400 (\Omega \cdot \text{см})^{-1}$, что при плотности тока $j \sim 10^6 \text{ А/см}^2$ соответствует напряженности поля $E \sim 2.5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$. Плотность тока $j \sim 10^6 \text{ А/см}^2$ соответствует оптическим данным, из которых следует, что в моменты времени 70–90 μs выбранный для оценки диаметр светящихся зон вблизи электродов близок к диаметру электродов. Суммарное падение напряжения в зонах у электродов составляет $\sim 1 \text{ кВ}$ [15–18]. Тогда суммарная протяженность зоны l , на которую приходится это падение, составляет $l = U/E = 1000/2500 = 0.4 \text{ см}$, при общей длине разрядного промежутка 1.7 см.

Таким образом, зоны, на которых выделяется наибольшая энергия, расположены вблизи катода и анода и имеют протяженность около 0.2 см каждая. Росселандов пробег излучения в них того же порядка. Поэтому плазма является полупрозрачной для длин волн, в которых

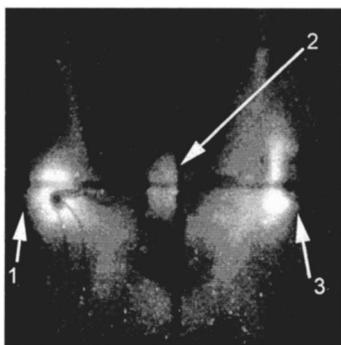


Рис. 9. Образование светящейся области на равном расстоянии от анода и катода. 1 — катод, 2 — светящаяся область в центре разряда, 3 — анод.

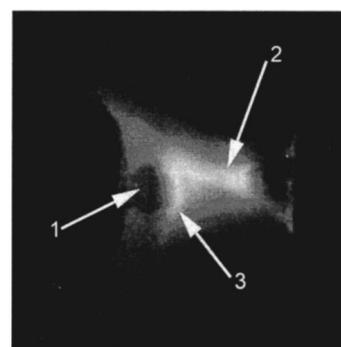


Рис. 10. Ударно сжатая область, вызванная обтеканием катода анодной струей. 1 — катод, 2 — анодная струя, 3 — ударно сжатая область.

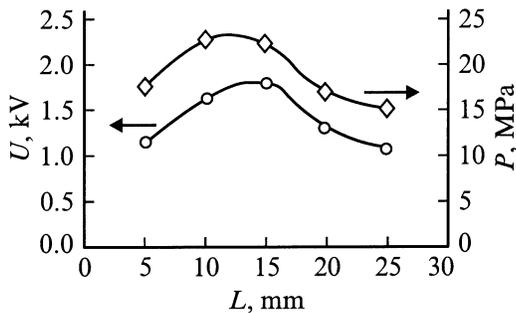


Рис. 11. Зависимости падения напряжения (U) на разрядном промежутке и установившегося давления (P) в камере от расстояния между электродами (L). Ток ~ 300 kA, начальное давление водорода 1 МПа, медные электроды диаметром 10 mm.

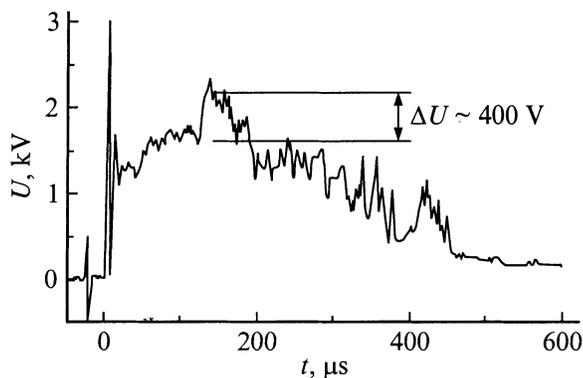


Рис. 12. Скачок напряжения ~ 400 V, вызванный переходом электродного пятна с боковой поверхности на торец анода.

излучается большая часть энергии. Для полностью прозрачной плазмы при таких параметрах полная мощность рекомбинационного излучения из зон с длиной 0.2 см и диаметром 6 mm превосходила бы величину мощности JU на несколько порядков. Для полупрозрачной плазмы, по-видимому, она сравнима с вложенной мощностью. В пользу приэлектродных зон с длиной 0.2 см с высокой излучательной способностью в указанные моменты времени говорят следующие факты: 1) наличие на некоторых скоростных фотографиях ярких светящихся зон длиной 0.2–0.3 см у торцов электродов (рис. 14); 2) падение напряжения ~ 1 kV, зарегистрированное в месте установки инициирующей проволоочки в узком зазоре длиной 0.2–0.4 см между цилиндрическим анодом и коническим катодом электроразрядного ускорителя в начальные моменты времени [15,20]; 3) упоминавшееся ранее увеличение напряжения на 400 V на аноде при перемещении дуги на его торец.

В этом случае скачку напряжения $U = 400$ V у анода при напряженности поля $E = 2500$ V/cm, определенной ранее из проводимости и плотности тока, соответствует длина l

$$l = \frac{U}{E} = \frac{400}{2500} = 0.16 \text{ cm.}$$

Одной из причин высоких приэлектродных падений напряжения может быть взаимодействие струй с поверхностью противоположного электрода (рис. 10) или между собой. В последнем случае взаимодействие должно происходить вблизи одного из электродов. В пользу этой гипотезы говорит зависимость напряжения на разрядном промежутке от его длины, приведенная на рис. 11. Видно, что напряжение на дуге максимально на длине ~ 15 mm. Эта длина, по-видимому, соответствует наиболее эффективному взаимодействию катодной струи с анодом (для медных электродов диаметром 10 mm анодная струя не образуется). С дальнейшим ростом длины разрядного промежутка зона взаимодействия струй исчезает и напряжение падает. Увеличение напряжения при взаимодействии струй связано с появлением составляющей скорости носителей тока, перпендикулярной оси разряда.

Следуя [22], оценим скорость катодной струи u_2 после разгона в зоне, расположенной за объемным зарядом, а также вклад газодинамического давления и электромагнитного импульса. Рассматривается катодная струя в момент времени $70 \mu\text{s}$, когда анодная струя еще не успела образоваться. В качестве контрольного сечения с индексом 1 выберем область плазмы на границе с

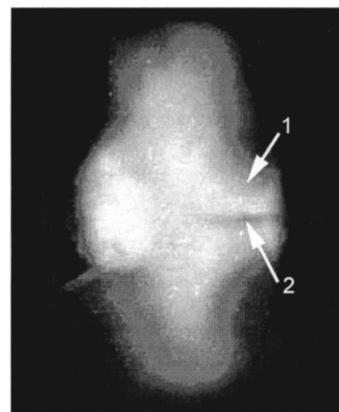


Рис. 13. Струя металла с анода второго типа (2) на фоне более яркого излучения струи первого типа (1).

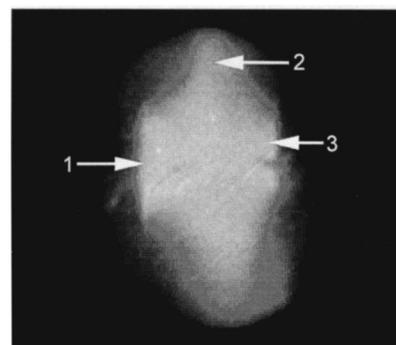


Рис. 14. Светящиеся зоны (1, 3) длиной 0.2–0.3 см у торцов электродов. Образование "плазменной тарелки" (2), вызванное взаимодействием анодной и катодной струй.

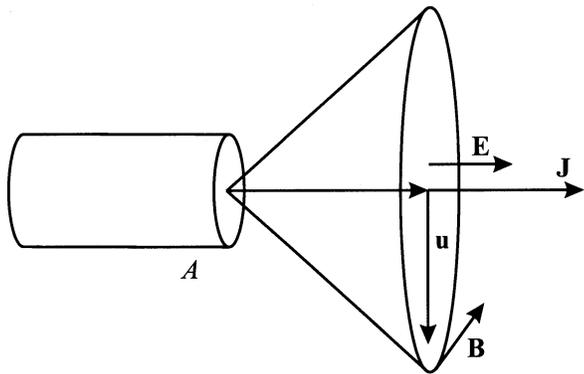


Рис. 15. Появление дополнительной напряженности поля E вблизи анода A , обусловленной поперечной составляющей u .

областью объемного заряда и будем считать, что именно к ней относятся измеренные значения T и P . Второе контрольное сечение с индексом 2 находится перед зоной резкого роста напряжения на аноде. Считая, как и в [22], $u_1 = 0$ и $P_2 \ll P_1$, закон сохранения импульса запишем в виде

$$Gu_2 = SP_1 + I, \quad (2)$$

где I — суммарное приращение электромагнитной силы, которая, как и в [22], определяется по формуле

$$I = \left(\frac{J}{c}\right)^2 \ln \frac{a_k}{a} \sim \left(\frac{J}{c}\right)^2 \ln \frac{L}{a}.$$

Здесь G — суммарный расход материала катода, J — полный ток дуги, u_1 и u_2 — скорости струи в контрольных сечениях, S — площадь электрода, a_k — радиус дуги в контрольном сечении 2, a — радиус электрода, L — длина разрядного промежутка, c — скорость света.

Ввиду того, что угол разлета струи с осью составляет $\sim 45^\circ$ и $a < L$, $a_k \sim L$. Согласно [12], для катода из сплава ВНЖ (вольфрам — 80%, никель — 10%, железо — 10%) расход составляет $6.5 \cdot 10^{-3}$ г/С, что для тока $J = 3.16 \cdot 10^5$ А соответствует $G = 2.1 \cdot 10^3$ г/с. Подставляя $L = 1.7$ см и $a = 0.3$ см при $P_1 = 177$ МПа, получим $SP_1 = 4.86 \cdot 10^3$ Н, $I = 17.3 \cdot 10^3$ Н. Тогда из формулы (2) находим $u_2 = 1.05 \cdot 10^4$ м/с.

Таким образом, основную роль в ускорении паров металла для дуг с силой тока $J > 3 \cdot 10^5$ А играют электромагнитные силы, величина которых более чем в три раза превосходит величину газодинамических сил, несмотря на довольно высокие давления у основания струи. Полученная оценка носит весьма приближенный характер, так как давление P_2 отлично от нулевого, а суммарный расход катода, определенный в [12], соответствует как паровой, так и капельной фазе. Однако при оценке скорости u_2 обе эти погрешности отчасти компенсируют друг друга.

Еще одной из возможных причин высокого падения напряжения в приэлектродных областях может являться несовпадение направления тока и скорости струи (рис. 15).

Дополнительная напряженность поля E , обусловленная скоростью u поперек магнитного поля дуги B равна, как известно, $E = u \times B$, где $B = \mu J / 2\pi r$. Если угол разлета струи велик, то поперечная составляющая скорости близка к продольной скорости. Для последней литературные данные [1–3,7] и проделанные оценки дают величину порядка 10^4 м/с. Если $J \sim 10^5$ А, $r = 3 \cdot 10^{-3}$ м, что соответствует данным экспериментов, то $E \sim 10^3$ В/см. Для меньших углов разлета эта же величина E соответствует большим амплитудам разрядного тока.

Анодная и катодная струи улучшают теплообмен между дугой и окружающим ее газом. Ранее нами было установлено, что эффективность нагрева водорода в разрядной камере увеличивается с уменьшением расстояния между электродами [18]. При этом одновременно увеличивается амплитуда акустических колебаний, зарегистрированных датчиком давления на стенке разрядной камеры. Возможно, что такие акустические колебания вызваны взаимодействием анодной и катодной струй. Обнаруженное движение газа у стенок камеры в противоположном направлении по отношению к направлению движения в струях также способствует улучшению теплообмена. Таким образом мощные анодные и катодные струи могут являться причиной, создающей интенсивное вихревое течение газа в разрядной камере, что ведет к улучшению теплообмена.

Заключение

1. Для разряда в водороде при начальном давлении 1 МПа и разрядном токе $\sim 3 \cdot 10^5$ А определены параметры приэлектродной эрозионной плазмы у катода: $T = 59 \cdot 10^3$ К, $P = 177$ МПа, $\bar{m} = 3.1$, $n = 5.3 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$. Параметры плазмы у анода близки к этим значениям.

2. Установлен продольный размер области у электродов, на которую приходится суммарное падение напряжения ~ 1 кВ. Он составляет ~ 0.2 см для каждого из электродов.

3. Высокие падения напряжения в приэлектродных областях обусловлены высокой излучательной способностью эрозионной плазмы; наличием ударно сжатых областей из-за взаимодействия струй между собой, с противоположным электродом и окружающим газом; движением струй поперек магнитного поля, созданного током разряда.

4. Установлено, что струи создают интенсивное вихревое течение газа в объеме, тем самым улучшая теплообмен между дугой и окружающим газом.

Авторы выражают свою признательность А.Г. Куприну за предоставленные экспериментальные результаты, полученные в близких условиях.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-15-96605).

Список литературы

- [1] Плотто А.А., Рожков В.Н., Капин А.Т. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. Вып. 8. С. 494–507.
- [2] Брон О.Б., Суиков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. Л.: Энергия, 1975. 216 с.
- [3] Любимов Г.А., Раховский В.И. // УФН. 1978. Т. 125. Вып. 4. С. 665–706.
- [4] Крикберг И.А., Зверев Е.А. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 1. С. 88–95.
- [5] Немчинский В.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 35–42.
- [6] Немчинский В.А. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 2. С. 235–240.
- [7] Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [8] Juttner B. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1987. Vol. PS-15. N 5. P. 481–487.
- [9] Султанов М.А., Киселевский Л.И. // ТВТ. 1966. Т. 4. № 3. С. 375–379.
- [10] Дюжнев Г.А., Евласов В.Ю., Школьник С.М. // Генераторы низкотемпер. плазмы. Тез. докл. X Всесоюз. конф. Минск, 1986. Ч. I. С. 123–124.
- [11] Брециких А.Ф., Сысун В.И., Хромой Ю.Д. // Генераторы низкотемпер. плазмы. Тез. докл. XI Всесоюз. конф. Новосибирск, 1989. Ч. II. С. 101–102.
- [12] Будин А.В., Коликов В.А., Левченко Б.П. и др. // ТВТ. 1994. Т. 32. № 4. С. 628–630.
- [13] Цветков И.В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1994. Т. 58. № 10. С. 156–159.
- [14] Митин Р.В. // Свойства низкотемпературной плазмы и методы ее диагностики. Новосибирск: Наука, 1977. С. 105–138.
- [15] Рутберг Ф.Г., Богомаз А.А., Будин А.В. и др. // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 1. С. 100–106.
- [16] Игнатко В.П., Чернявский Г.М. // Материалы I Всесоюз. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. Новосибирск, 1990. С. 88–110.
- [17] Богомаз А.А., Бородин В.С., Левченко Б.П., Рутберг Ф.Г. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 1. С. 121–123.
- [18] Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.
- [19] Игнатко В.П. // IV Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Аннотации докл. Ч. II. Киев, 1975. С. 17–18.
- [20] Богомаз А.А., Будин А.В., Коликов В.А. и др. // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 1. С. 64–79.
- [21] Лукьянов С.Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: Наука, 1975. 407 с.
- [22] Любимов Г.А. // Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука, 1977. С. 207–226.
- [23] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматгиз, 1966. 688 с.
- [24] Крист, Шерман, Гласс // РТК. 1966. № 1. С. 87–92.
- [25] Замышляев Б.В., Ступицкий Е.Л., Гузь А.Г., Жуков В.Г. Состав и термодинамические функции плазмы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984. 144 с.