

04;12

Экспериментальное исследование анодной области свободно горящей дуги атмосферного давления в инертных газах

I. Общая характеристика разряда. Режимы малых токов

© Г.А. Дюжев, Н.К. Митрофанов, С.М. Школьник

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 15 августа 1995 г.)

Работа посвящена экспериментальному исследованию анодной области свободно горящей дуги атмосферного давления в инертных газах в диапазоне токов от единиц до сотен Ампер. Использовался вольфрамовый катод в термоэмиссионном режиме и медный водоохлаждаемый анод большого диаметра, что обеспечивало естественную форму привязки дуги на аноде.

Дается общая характеристика разряда, а также приводятся результаты исследования анодной области при малых токах, когда привязка дуги к аноду одиночная, контрагированная, но безэрозионная. Приведены результаты измерений параметров плазмы и плотности тока в анодной привязке, проводится сопоставление полученных значений с теми, которые характерны для катодной привязки.

Введение

Исследования анодных процессов в дуговых разрядах атмосферного давления ведутся достаточно давно. Обзор результатов ранних работ можно найти в [1–3]. В последние годы получены интересные результаты как при изучении анодных процессов в генераторах низкотемпературной плазмы [4], так и в свободно горящих дугах [5,6]. Однако исследования нельзя считать завершенными. Это объясняется чрезвычайным многообразием состояний анодной области, которые реализуются в различных условиях горения разряда. Состояние анодной области зависит не только от тока и рода плазмообразующего вещества, но также и от способа стабилизации дуги, формы электродов и способа их охлаждения, геометрии разрядного устройства и, наконец, от состояния поверхности анода, которое может изменяться в процессе горения дуги.

Наиболее простым объектом исследования является, по-видимому, свободно горящая дуга в атомарном газе с водоохлаждаемыми электродами, но и в этом случае отсутствует полная физическая картина анодных процессов. Остается пока плохо понятным основной, по нашему мнению, вопрос о причинах образования различных форм "привязки" дуги к аноду при изменении тока: множественная и одиночная контракция, контракция с эрозией (пятно), безэрозионная диффузная привязка и т. д.

Целью настоящей работы является попытка найти ответ на этот вопрос на основе экспериментального исследования анодных процессов в широком диапазоне токов. В первых двух частях работы описаны результаты исследования режимов малых и средних токов. Результаты, относящиеся к режимам больших токов, предполагается опубликовать позднее. Смысл

этой терминологии будет разъяснен ниже. Некоторые предварительные результаты экспериментов были опубликованы нами ранее [7,8].

Экспериментальная установка, техника и методика измерений

Дуга атмосферного давления зажигалась в широкой водоохлаждаемой камере объемом 3000 см^{-3} из нержавеющей стали. Камера предварительно откачивалась до давления $p \lesssim 10^{-3}$ мм рт. ст., после чего промывалась инертным газом и наполнялась до давления $p \approx 1.05$ атм. Эксперименты проводились в атмосфере Ar и Xe. Разрядный промежуток был ориентирован вертикально, причем катод располагался снизу, а анод над ним. Катод — запрессованный в медную водоохлаждаемую обойму вольфрамовый стержень диаметром 2–3 мм с длиной выступающей части 8–12 мм. Термоэмиссия катода обеспечивалась за счет его саморазогрева разрядным током. Медный водоохлаждаемый анод с плоским полированным торцом имел заведомо большую площадь поверхности (диаметр 60 мм), что гарантировало сохранение естественной картины привязки дуги на аноде. Межэлектродное расстояние d варьировалось в процессе экспериментов от 6 до 40 мм. Питание дуги обеспечивалось источником постоянного напряжения 70 В. Ток регулировался в пределах $I = 5–250$ А с помощью включенного последовательно с разрядом балластного реостата. При токах более 150 А время горения дуги ограничивалось 5 с. Разряд поджигался обрывом тока во вспомогательной цепи: поджигающий электрод отдергивался от катода при помощи электромагнита. Для визуального наблюдения дуги ее увеличенное изображение проецировалось на экран.

Параметры плазмы определялись спектроскопически. При помощи системы двух скрещенных зеркал и двухлинзового конденсора в плоскости входной щели монохроматора МДР-3 (1.3 нм/мм) формировалось горизонтально ориентированное уменьшенное изображение разряда. Смещение изображения в направлении оси разряда достигалось поворотом толстой кварцевой пластины. Оптическая система обеспечивала пространственное разрешение ≤ 0.3 мм. Для регистрации излучения был использован оптический многоканальный анализатор фирмы V&M Spectronic, регистрирующая камера которого устанавливалась за выходной щелью монохроматора. При записи спектров излучения дуги выходная щель снималась, а камера анализатора располагалась таким образом, чтобы линейный фотодетектор был ориентирован параллельно направлению дисперсии монохроматора. При измерении поперечных профилей интенсивности излучения дуги фотодетектор устанавливался параллельно щелям МДР-3. Время накопления сигнала ~ 0.1 с.

На различных расстояниях z от анода измерялись радиальные профили интенсивности излучения узких участков сплошного спектра и спектральных линий. Обработка данных осуществлялась с помощью компьютера. Измеренные профили интенсивности, обладающие удовлетворительной симметрией, предварительно сглаживались, а затем подвергались абелевской инверсии по методу Бокастена. Сравнивались два способа усреднения результатов: 1) при каждом z измерения повторялись 3–5 раз, после чего результаты усреднялись; 2) при каждом z проводились однократные измерения, но осуществлялось несколько (3–5) "проходов" по длине изображения разряда. В пределах разброса экспериментальных данных результаты, полученные обоими способами, совпадали.

Концентрация заряженных частиц n определялась из абсолютной интенсивности излучения континуума. Оценки, выполненные для равновесной плазмы, показали, что в условиях атмосферной дуги в инертных газах вкладом электрон-атомного тормозного континуума можно пренебречь по сравнению с интенсивностью рекомбинационного и электрон-ионного тормозного континуумов, тем более что этот вклад убывает с повышением температуры T . Так, в случае ксенона при $T = 6000$ К в интересующей нас области спектра 400–500 нм он составляет 15%, а при $T = 8000$ К — уже менее 3%. Большая часть измерений в Хе проводилась на $\lambda = 443$ нм, в Ag — на $\lambda = 445$ и 456 нм. Рабочая длина волны выбиралась таким образом, чтобы соответствующий ей ξ -фактор был практически постоянен в широком диапазоне изменения условий и в пределах заданного спектрального интервала шириной 1.3–2.0 нм отсутствовало бы наложение "крыльев" линий. Значения $\xi(\lambda)$ взяты из [9]. При определении n слабая зависимость ξ от T не принималась во внимание.

Температура T измерялась по отношению интенсивностей спектральной линии и континуума [10]. Метод применим при наличии частичного локального термодинамического равновесия (ЧЛТР). Известные критерии существования ЧЛТР [10–12] всегда выполняются в плазме атмосферных дуг для верхних уровней с потенциалами возбуждения на ~ 1 –2 В ниже потенциала ионизации. Метод был видоизменен с учетом слабой неидеальности плазмы в соответствии с [13]. Реабсорбция оценивалась в предположении о дисперсионном контуре этих линий. При $\kappa_0 l \ll 1$ реабсорбция для линий с дисперсионным контуром $\sim 1/4 \kappa_0 l$. В наших условиях $\kappa_0 < 4 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$ и $l < 3$ см, т. е. она не превышала 0.3%. Погрешность определения T , которая оценивалась по разбросу экспериментальных данных, составляла $\sim 5\%$.

Общая характеристика разряда

Свободно горящая дуга при атмосферном давлении, вообще говоря, неустойчива. Катодная привязка дуги, имеющая термоэмиссионную природу, сильно контрагирована. При относительно небольших токах (единицы–десятки ампер) сильно контрагирована и анодная привязка. Привязки перемещаются по поверхности электродов, при этом разрядный канал изменяет свою форму, зачастую причудливо изгибаясь и значительно варьируя свою длину. Это приводит к изменению напряжения горения дуги. Неустойчивость дуги определяется как процессами на электродах, так и конвекцией, и разделить влияние этих факторов сложно. Подбором размеров катодного стержня (диаметра и длины выступающей части) можно для некоторого диапазона токов зафиксировать катодную привязку на его конце [14]. Ниже будут описаны результаты исследования именно таких режимов с неподвижной катодной привязкой.

Если катодная привязка неподвижна, то при определенной длине d межэлектродного промежутка, зависящей от тока, горение дуги становится устойчивым. Это имеет место, когда соотношение между d и I таково, что дуга контролируется катодной струей вплоть до поверхности анода. Образование катодной струи связано с сильной контракцией дуги в катодной области ($j \sim 10^4$ А/см 2). Скорость плазмы у основания струи достигает $v \gtrsim 10^4$ см/с [1]. Взаимодействие катодной струи с анодом приводит к образованию так называемой плазменной "тарелки". Режимы, в которых дуга контролируется вплоть до поверхности анода катодной струей, мы будем называть режимами больших токов, хотя переход в такой режим определяется не только током, но и межэлектродным расстоянием. В режиме больших токов анодная привязка слабо контрагированная и диффузная. Эрозии и оплавления анода не наблюдается. При значительном увеличении тока тепловая нагрузка

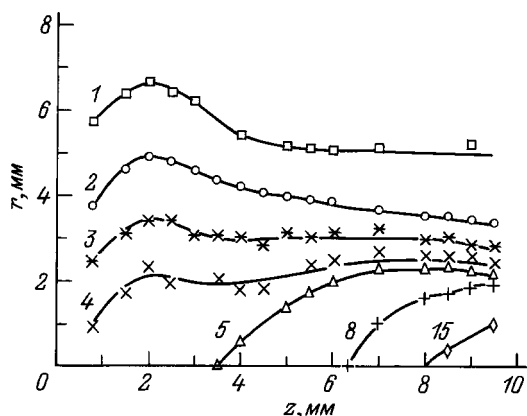


Рис. 1. Дуга в Хе. $d = 10$ мм, $I = 80$ А. Цифры у кривых — n в единицах 10^{16} см^{-3} , для анода $z = 0$.

на анод настолько возрастает, что обычные системы водяного охлаждения оказываются недостаточно эффективными. Анод со стационарной привязкой дуги плавится и разрушается. Для исследования таких режимов используется, например, вращающийся анод (водоохлаждаемый вращающийся барабан) [15].

На рис. 1 представлено экспериментально измеренное поле концентрации в ксеноновой дуге при атмосферном давлении для того режима, когда катодная плазменная струя оказывает заметное влияние на анодную область. "Тарелка" проявляется в виде характерного изгиба изолиний вблизи анода.

С уменьшением тока или увеличением межэлектродного промежутка влияние катодной струи на прианодную область ослабевает (ср. рис. 1 и 2), и ближе к аноду образуется область с примерно однородной в осевом направлении плазмой (рис. 2, а), т. е. то, что принято называть положительным столбом. Плотность тока в положительном столбе, оцененная по полуширине радиального распределения концентрации, составляет $j_c \sim 10^2 \text{ А/см}^2$. Результаты наших измерений подтвердили, что как в катодной струе, так и в столбе плазма находится в состоянии ионизационного равновесия (рис. 3). Анодная привязка при этом становится сильно контрагированной. Причем наиболее вероятна так называемая "множественная анодная контракция" (МАК) [16]: столб дуги вблизи анода разбивается на несколько изолированных каналов, сужающихся к аноду и формирующих у его поверхности яркие плазменные образования. При этом эрозионных повреждений поверхности анода не наблюдается. Дуга становится менее устойчивой из-за перемещения каналов анодной привязки. Такие режимы с множественной анодной контракцией, когда дуга уже не полностью контролируется катодной струей, мы называем режимами средних токов.

При дальнейшем уменьшении тока количество отдельных привязок в МАК уменьшается и множе-

ственная привязка постепенно превращается в единичную сильно контрагированную привязку. В дуге с одиночной привязкой, как и в дуге с МАК, эрозионных повреждений поверхности анода не наблюдается. Отметим, что уменьшение тока вплоть до минимального, при котором удавалось получить устойчивое горение дуги ($I \approx 5 \text{ А}$), во всем исследованном диапазоне изменения межэлектродного промежутка $d = 6-40$ мм не приводит к формированию диффузной привязки. Режимы с одиночной контракцией на аноде будем называть режимами малых токов. Исследования таких режимов интересны не только тем, что они дают возможность изучить одиночную контрагированную анодную привязку, но и тем, что позволяют получить представление о структуре и параметрах плазмы в отдельных каналах МАК.

Границы между описанными выше режимами достаточно размыты. При переходе от средних токов к большему не существует пороговых значений тока, при которых скачкообразно изменялись бы режимы горения дуги. Переход от МАК к слабо контрагированной привязке происходит в некотором диапазоне токов, в котором отдельные плазменные каналы уже не наблюдаются, структура МАК неразличима, однако радиальные профили интенсивности излучения дуги вблизи анода еще не вполне симметричны (подробнее см. во второй части работы). Переход от малых токов к средним, возникновение вместо одиночной привязки

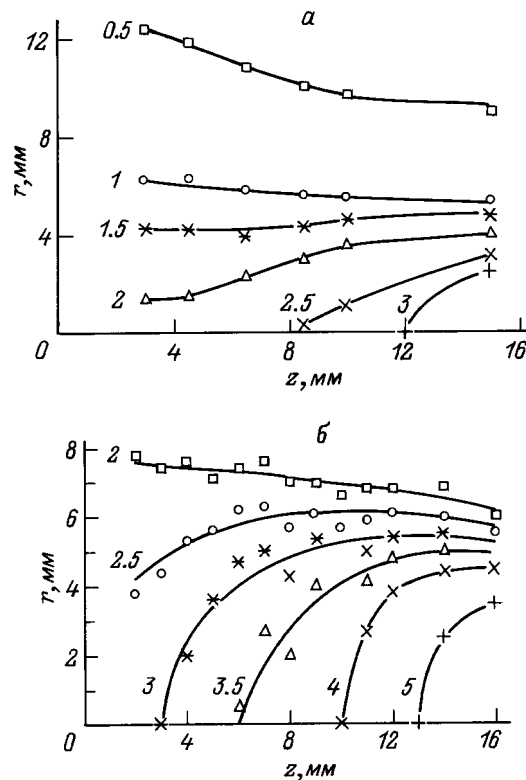


Рис. 2. Дуга в Хе. $d = 25$ мм, цифры у кривых — n в единицах 10^{16} см^{-3} , для анода $z = 0$; I , А: а — 80, б — 135.

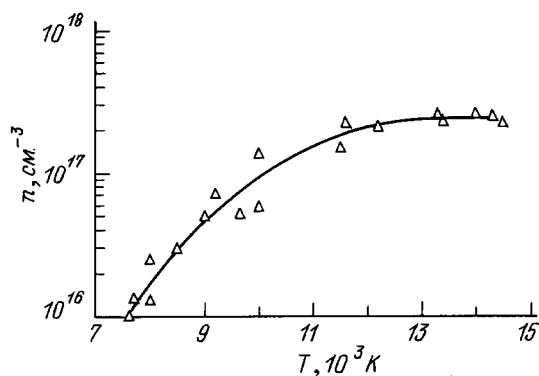


Рис. 3. Соотношение между экспериментально определенными параметрами плазмы в различных режимах горения дуги. Сплошная кривая — расчет по формуле Саха. Дуга в Хе.

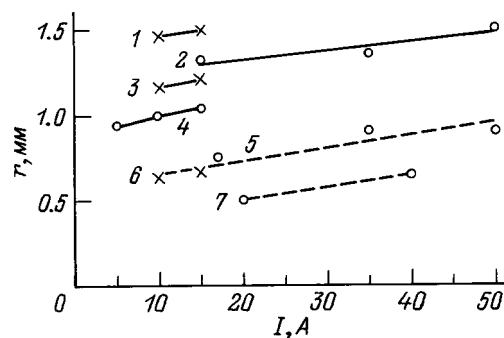


Рис. 4. Радиус привязки дуги к электроду в зависимости от тока. Штриховые линии — катодная привязка, сплошные — одиночная анодная; 1, 2, 5, 6 — дуга в Ar; 3, 4, 7 — дуга в Хе. Крестики — $d = 15$ мм, кружки — $d = 25$ мм.

двойной и т. д. происходят, естественно, скачкообразно. Однако существует достаточно широкий диапазон токов (несколько ампер в Хе и до десятка ампер в Ar), в котором возможно существование дуги как с одиночной, так и с двойной привязкой.

При длительном горении дуги граница режимов несколько смещается в сторону увеличения тока. По нашему мнению, это является результатом изменения состояния поверхности анода. Несмотря на использование ловушки с жидким азотом в откачном тракте, особо чистых газов, длительное обезгаживание катода при саморазогреве разрядом и неоднократное промывание камеры газом, на поверхности анода появляется налет углерода, а в зоне привязки дуги — так называемый "нагар". Привязка дуги к участкам поверхности анода, покрытым "нагаром", затруднена. Тем самым ограничивается возможность перемещения каналов и их дробления при увеличении тока. Следствием такого процесса может быть существование сильно контрагированной одиночной привязки при таких I и d , при которых на свежей поверхности анода реализуется множественная контракция. При этом образуется анодная струя, столкновение которой с катодной формирует в межэлектродном промежутке разнообразные плазменные конфигурации, аналогичные описанным в [17]. Такие режимы нами не исследовались.

Анодная область при малых токах (одиночная контракция)

Визуальные наблюдения показали, что одиночная контракция дуги в анодной области существует в диапазоне токов от единиц до десятков ампер в зависимости от длины межэлектродного промежутка и рода газа, а также от состояния поверхности анода (продолжительности горения дуги). Например, на свежем аноде в ксеноновой дуге при $d = 15$ мм

привязка сохраняется одиночной лишь до токов $I \approx 8-10$ А. При увеличении межэлектродного промежутка до $d = 40$ мм одиночная привязка наблюдается уже до $I \leq 20$ А. Аргоновая дуга более устойчива относительно дробления анодной привязки. В частности, при $d = 40$ мм одиночная контрагированная привязка существует вплоть до $I = 50$ А.

Как отмечалось выше, несмотря на сильную контракцию дуги в анодной области, эрозии анода не наблюдается. В эмиссионных спектрах как ксеноновой, так и аргоновой дуги вблизи анода не удалось обнаружить даже наиболее чувствительные линии материала анода (меди), хотя чувствительность системы регистрации позволила обнаружить ряд линий Си и СII, а также OI в длинноволновой области спектра, где интенсивность континуума заметно снижается.

Результаты измерения радиуса привязки дуги вблизи анода ($z \approx 0.3$ мм) при различных токах и межэлектродных промежутках в Ar и Хе дугах представлены на рис. 4 (нами бралась половина ширины радиального распределения концентрации плазмы на половине высоты). Здесь же для сравнения приведены результаты аналогичных измерений для катодной привязки. Видно, что в исследованном диапазоне условий таким образом определенные радиусы катодной и анодной привязок возрастают приблизительно линейно с током. В отличие от катодной анодная привязка реализуется при существенно более низких плотностях тока $j_a \sim 10^2-10^3$ А/см². В аналогичных условиях плотность тока как в анодной, так и в катодной привязках в ксеноновой дуге выше, чем в аргоновой. При фиксированном токе увеличение межэлектродного промежутка и в Ar (ср. 1 и 2 на рис. 4), и в Хе (ср. 3 и 4 на рис. 4) дуге приводит к возрастанию плотности тока в анодной привязке. Плотность тока в катодной привязке не зависит от межэлектродного промежутка (ср. 5 и 6 на рис. 4) и определяется лишь родом плазмообразующего газа.

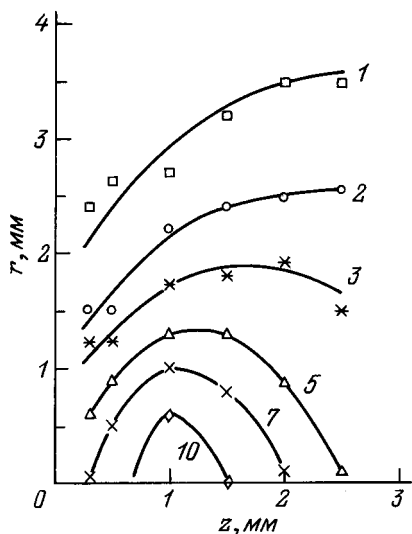


Рис. 5. Одиночная контрагированная анодная привязка. Дуга в Хе, $d = 25$ мм, $I = 15$ А, цифры у кривых — n в единицах 10^{16} см $^{-3}$. Для анода $z = 0$.

О пространственной структуре анодной привязки позволяют судить результаты, приведенные на рис. 5. Видно, что дуговой канал сужается к аноду. Вблизи анода появляется область сильно ионизованной плазмы. Параметры плазмы зависят не только от тока и рода газа, но и от межэлектродного промежутка. Это иллюстрирует рис. 6, на котором показаны осевые распределения концентрации плазмы n близи анода при различных I и d . Отмеченная ранее зависимость плотности тока от межэлектродного промежутка (рис. 4) и аналогичная зависимость концентрации плазмы (ср. 2 и 3 на рис. 6, а, а также 5, 6 и 7 на рис. 6, б) отличают анодную привязку от катодной, характеристики которой от d не зависят.

Приведенные на рис. 6 результаты показывают, что осевые распределения концентрации плазмы в анодной области немонотонны. На некотором расстоянии от анода $z_0 \sim 1$ мм наблюдается максимум концентрации. Поэтому вблизи анода существенный вклад в токоперенос вносит диффузионный ток.

Обращает на себя внимание также существенно более низкий уровень концентрации в максимуме в анодной привязке Аг дуги по сравнению с Хе дугой в одинаковых условиях. Интересно отметить, что при этом температуры плазмы в Хе и Аг при одинаковых значениях I и d близки по величине. Напомним, что плотность тока (по данным рис. 4) в анодной привязке в Хе дуге приблизительно в 1.5 раз выше, чем в Аг дуге.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при малых токах (единицы–десятки ампер) привязка свободно горящей дуги с водоохлаждаемыми электродами к аноду является контрагированной и безэрозионной. При увеличении тока привязка дро-

бится (раздваивается и т. д.). Аргоновая дуга более устойчива, чем ксеноновая, относительно дробления привязки. Одиночная контрагированная анодная привязка имеет некоторое сходство с катодной. Однако имеются и существенные различия: 1) плотность тока в анодной привязке значительно ниже, чем в катодной; 2) параметры анодной привязки (плотность тока, концентрация плазмы) определяются не только током и родом плазмообразующего газа, как в случае катодной привязки, но и длиной межэлектродного промежутка. По-видимому, параметры анодной привязки определяются состоянием плазмы на анодном конце столба разряда.

В заключение отметим, что спад концентрации при $z < z_0$ (рис. 6) объясняется охлаждением столба дуги анодом, т. е. z_0 — характерный размер теплового слоя у анода в контрагированной дуге. Однако сама контракция есть результат развития некоторой неустойчивости именно в анодной области разряда. Такой вывод позволяют сделать результаты, приведенные во второй части работы. Протяженность контрагированной части дуги вблизи анода (во всяком случае, при минимальных токах, когда МГД эффекты не являются определяющими) задается толщиной анодного слоя, который сформировался бы, если диффуз-

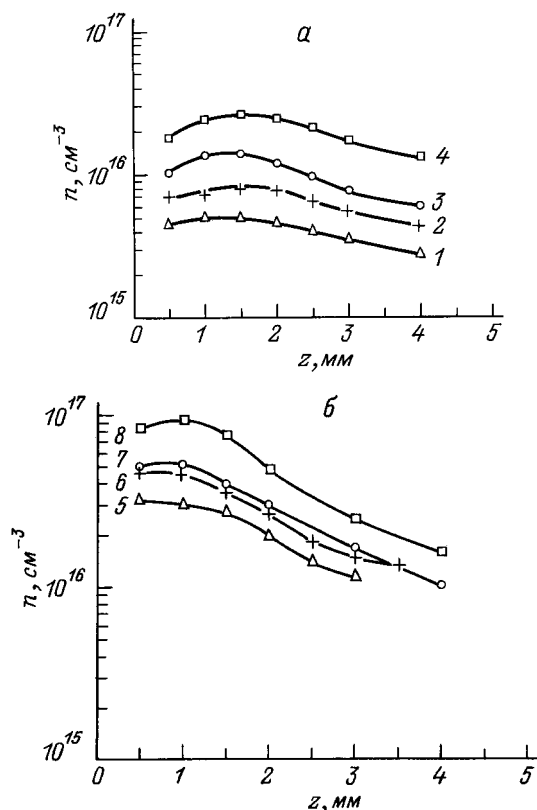


Рис. 6. Осевой ход концентрации в одиночной контрагированной анодной привязке. а — Аг дуга: $I = 10$ (1); 15 (2, 3), 35 А (4); $d = 15$ (1, 2), 25 мм (3, 4); б — Хе дуга: $I = 10$ (5–7), 15 А (8); $d = 15$ (1); 25 (6); 40 мм (7, 8).

ное замыкание тока на анод в этих условиях было бы устойчиво. Этот размер определяется параметрами столба разряда, в то время как величина z_0 определяется параметрами контрагированного канала.

Описанные в настоящей работе исследования стали возможны частично благодаря гранту № R5D000 и R5D300 Международного научного фонда.

Список литературы

- [1] Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: ИЛ, 1961. 370 с.
- [2] Грановский В.А. Электрический ток в газе. Установившийся ток / Под ред. Л.А. Сена, В.Е. Голанта. М.: Наука, 1971. 543 с.
- [3] Нейман В. // Экспериментальные исследования плазмотронов / Под ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: Наука, 1977. С. 253-292.
- [4] Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Ващенко С.П. и др. // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. № 4. Вып. 1. С. 62-65.
- [5] Sanders N.A., Pfender E. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55. N 3. P. 714-720.
- [6] Leveroni-Calvi E., Pfender E. // Proc. ASME Weld. Joining Process. Winter Meeting, 1991.
- [7] Dyuzhev G.A., Mitrofanov N.K., Shkol'nik S.M. // Proc. Intern. Symp. on Elect. Cont. Theory and Applications (ISECTA). Almaty (Kazakhstan), 1993. P. 64-72.
- [8] Дюжев Г.А., Митрофанов Н.К., Школьник С.М. // Матер. конф. "Физика и техника плазмы". Минск, 1994. Т. 1. С. 143-146.
- [9] Hofsaess D. // JQSRT. 1978. Vol. 1. P. 339-352.
- [10] Физика и техника низкотемпературной плазмы / Под ред. С.В. Дресвина. М.: Атомиздат, 1972. 352 с.
- [11] Wilson R. // JQSRT. 1962. Vol. 2. P. 477.
- [12] Dravin Y.W. // Z. Physik. 1969. B. 228. H. 4. S. 99-119.
- [13] Митрофанов Н.К. // Опт. и спектр. 1995. Вып. 4. С. 597-600.
- [14] Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В. и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. Новосибирск: Наука СО, 1982. 158 с.
- [15] Буланый П.Ф., Поляков С.П. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 3. С. 541-546.
- [16] Sanders N.A., Etemadi K., Hsu K.C., Pfender E. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. P. 4136-4145.
- [17] Брон О.Б., Сушков Л.К. Поток плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. Л.: Энергия, 1975. 212 с.